

**PROGRAMACIÓN REACTIVA EN UN PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL
SECTOR OBRAS EN INGENIERÍA CIVIL**

**MAYRA ALEJANDRA MORALES QUINTERO
CRISTHIAN FELIPE SALCEDO MAFLA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
PALMIRA
2019**

**PROGRAMACIÓN REACTIVA EN UN PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL
SECTOR OBRAS EN INGENIERÍA CIVIL**

MAYRA ALEJANDRA MORALES QUINTERO

CÓDIGO 1453615

CRISTHIAN FELIPE SALCEDO MAFLA

CÓDIGO 1453789

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR POR
EL TÍTULO DE: INGENIERO INDUSTRIAL**

DIRECTOR

MG. ÁLVARO JULIO CUADROS LÓPEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

PALMIRA

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO 1

JURADO 2

AGRADECIMIENTOS

A Dios por todas las bendiciones que me ha brindado en mi vida. A mi familia por su apoyo, comprensión, amor y motivación que me ha permitido crecer como persona y culminar satisfactoriamente cada una de las etapas de mi vida. A mi compañero de trabajo de grado por su amistad, sabiduría y dedicación para el desarrollo de este proyecto.

Mayra Alejandra Morales Quintero

A la energía universal y a mi familia por su apoyo incondicional, enseñanzas y colaboración a lo largo de mi vida, permitiéndome llegar a donde estoy hoy en día. A mi compañero de tesis por su amistad, tenacidad y dedicación

Cristhian Felipe Salcedo Mafla

Agradecemos a todos los profesores del programa de Ingeniería industrial, por transmitir todos sus conocimientos y experiencia permitiéndonos formarnos como profesionales. A nuestro director de trabajo de grado Álvaro Julio Cuadros por la confianza depositada, colaboración y apoyo brindado a lo largo de este ciclo, permitiéndonos adquirir conocimientos vitales para nuestro desarrollo como profesionales.

A nuestros compañeros y amigos que nos apoyaron y motivaron durante cada una de las fases de este proceso.

Los Autores

RESUMEN

Un proyecto es un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único, y que requiere una inversión de recursos y tiempo (Project Management Institute, 2018). En el sector construcción existen organizaciones tanto públicas como privadas que trabajan mediante la ejecución de proyectos, los cuales en ocasiones presentan retrasos con respecto al cronograma inicial producto de aplazamientos causados por el dueño, órdenes de cambios solicitados, cambios en el análisis del suelo, entre otros (Burgos Marín & Vela Ávila, 2015).

Se plantea el uso de la programación reactiva a través la sinergia de dos modelos matemáticos con el fin de ayudar a la toma de decisiones de reprogramación de actividades del proyecto, frente a los retrasos ocasionados durante la ejecución de este; de tal manera, que se genere un nuevo cronograma y presupuesto asociado.

Palabras Claves: Proyectos, Programación Reactiva, Construcción, métodos de reprogramación

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	12
1.1 ENUNCIADO DEL PROBLEMA	12
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo general.....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
1.3 MARCO CONCEPTUAL.....	14
1.3.1 Diagrama de red	14
1.3.2 Línea base	15
1.3.3 Obra civil.....	15
2. CARACTERIZACIÓN DE MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN REACTIVA.....	16
2.1 ENTORNO DE REPROGRAMACIÓN.....	17
2.1.1 Dinámico.....	17
2.1.2 Estático	18
2.2 ESTRATEGIAS DE REPROGRAMACIÓN.....	19
2.2.1 Proactiva.....	19
2.2.2 Reactivo.....	19
2.2.3 Predictiva-Reactiva.....	19
2.3 MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN REACTIVA.....	20
2.3.1 Reprogramación total.....	20
2.3.2 Reprogramación parcial.....	21
2.3.3 Acción reparadora	21
2.4 APLICACIONES DE LOS MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN REACTIVA ..	22
2.4.1 Caso aplicación de reprogramación total y acción reparadora	22
2.4.2 Caso aplicación de reprogramación completa y parcial.....	24
3. METODO DE PROGRAMACIÓN REACTIVA EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS	26
3.1 OBTENCIÓN INFORMACION CASO DE ESTUDIO.....	27
3.1.1 Actividades caso de estudio	27
3.1.2 Especificaciones de precedencias y duraciones.....	27
3.1.3 Requerimientos.....	27
3.1.4 Programación de actividades en la línea tiempo y diagrama de Gantt ..	27
3.2 MODELO MATEMÁTICO	28
3.2.1 Modelo matemático 1.....	28
3.2.2 Modelo matemático 2.....	32

3.2.3 Modelo propuesto	37
4. CASO DE ESTUDIO.....	42
4.1 OBTENCION INFORMACION CASO DE ESTUDIO.....	42
4.1.1 Actividades caso de estudio	42
4.1.2 Especificaciones de precedencias y duraciones.....	44
4.1.3 Requerimientos.....	45
4.1.4 Programación de actividades en la línea tiempo y diagrama de Gantt ..	47
4.2 ANÁLISIS DE ESCENARIOS.....	48
4.2.1 Plan inicial.....	48
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
4.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	53
5. CONCLUSIONES	54
REFERENCIAS	56
ANEXOS.....	60
Anexo 1. Modelo matemático en AMPL Caso 1	60
Anexo 2. Modelo matemático en AMPL Caso 2	63
Anexo 3. Modelo matemático en AMPL Caso 3	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Descripción de actividades, Caso de aplicación 1	23
Tabla 2 Actividades caso de estudio.....	43
Tabla 3 Duración de actividades, caso de estudio.....	44
Tabla 4 Costos y tiempos Caso de estudio.....	46
Tabla 5 Resumen de resultados obtenidos.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Aspectos relevantes de la reprogramación reactiva	17
Figura 2 Esquema modelo planteado	28
Figura 3 Casos aplicados en el modelo referente	33
Figura 4 Diagrama de Gantt para plan inicial.....	47
Figura 5 Informe comparativo Caso No. 1 – Diagrama de Gantt	50
Figura 6 Informe comparativo Caso No. 2 – Diagrama de Gantt	51
Figura 7 Informe comparativo Caso No. 3 – Diagrama de Gantt	52

INTRODUCCIÓN

Un proyecto es un esfuerzo temporal que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único, y que requiere una inversión de recursos y tiempo (Project Management Institute, 2018). Este se encuentra sujeto a incesante incertidumbre que se manifiesta de diversos modos, tales como recortes no previstos de presupuestos, sobrecostos, errores humanos, cambios en la precedencia de las actividades, ausentismo laboral, requisitos legales, entre otros) (Garrido & Carrillo, 2013).

Existen empresas tanto públicas como privadas, que debido a las actividades económicas que desempeñan, trabajan mediante la ejecución de proyectos, tales como las organizaciones destinadas a la construcción de obras de ingeniería civil. Por ende, estas organizaciones deben aplicar conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas que permitan controlar las actividades que conforman el proyecto, de tal manera, que se logren los objetivos planteados al inicio.

Pero, el desarrollo de los proyectos de obras de ingeniería civil presenta grandes inconvenientes durante la fase de ejecución. Por ejemplo, en Colombia las construcciones tardan en promedio entre un 40 y 60 por ciento más de lo establecido en el cronograma inicial y finalizan con sobrecostos entre 30 y 50 por ciento más de lo planeado (Sánchez Silva, 2013). Por lo que se hace necesario la inclusión de una estrategia que permita reparar el cronograma interrumpido o retrasado para afrontar los retrasos ocasionados en la ejecución del proyecto (Garrido & Carrillo, 2013).

Por lo tanto, con este trabajo se pretende aplicar dicho enfoque de programación reactiva con el fin de facilitar la toma de decisiones en el control de un proyecto de obra civil.

El contenido de este trabajo se estructura de la siguiente manera:

En los capítulos 1, se identifica el problema, se establecen los objetivos de la investigación y se describen conceptos de apoyo para el desarrollo del trabajo de grado.

En el capítulo 2, se realiza una caracterización de los métodos de programación reactiva en el cual, mediante revisión de literatura, se explica los entornos de reprogramación, las estrategias de reprogramación, los métodos de programación reactiva, como también, se describen casos aplicativos de la programación reactiva.

Luego en el capítulo 3, se establece un método de programación reactiva enfocándolo en los proyectos de construcción. Posteriormente en el capítulo 4, se evidencia la validación del método de programación reactiva en un caso de estudio relacionado con infraestructura vial (construcción de carreteras).

Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas tras la realización de la investigación y se plantean futuros focos de trabajo.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 ENUNCIADO DEL PROBLEMA

Hay organizaciones tanto públicas como privadas, cuyas actividades económicas dependen de la ejecución de proyectos. Estas deben aplicar conocimientos, habilidades, herramientas y técnicas que permitan controlar las actividades, de tal manera, que logren los objetivos planteados al inicio.

Las compañías cuya actividad económica es la construcción de obras de ingeniería civil funcionan mediante el desarrollo de proyectos. Esta clase incluye la construcción de puentes, autopistas, calles, carreteras, puertos marítimos y fluviales, aeropuertos, presas, y en un sentido más amplio el conjunto de elementos físicos y organizacionales que soportan el desarrollo de una sociedad (Sánchez Silva, 2013).

En ocasiones, el desarrollo de los proyectos de obras de ingeniería civil presentan grandes inconvenientes durante la fase de ejecución, por ejemplo, en Colombia las construcciones tardan en promedio entre un 40 y 60 por ciento más de lo establecido en el cronograma inicial y cuestan entre 30 y 50 por ciento más de lo planeado (Sánchez Silva, 2013). De acuerdo con lo anterior, se puede destacar un caso, que consistió en la construcción de 2.596 Km de vía, para el cual se tenía previsto un plazo de veinticuatro (24) meses, a partir de la fecha de la orden de inicialización. Sin embargo, tramos de esta carretera se retrasaron entre seis (6) y veinticuatro (24) meses. En otro caso presentado por el mismo autor se evidencia el incremento del presupuesto inicial, pasando de un valor inicial de 374'000.000 COP\$ a 1.402'000.000 COP\$ por kilómetro de obra (Molina Díaz, Mora Mora, & Rodríguez Cárdenas, 2010).

Otro ejemplo de excesos de duración en los proyectos viales es la rehabilitación de un tramo de la vía Jamundí – Timba, en el Departamento del Valle del Cauca, Colombia, para la cual se había estimado una duración de 5 meses (150 días) y tuvo una duración real de 6.5 meses (194 días) (Gómez & Orobio, 2015).

Esta problemática no solo se da a nivel nacional, afecta a todos los países del mundo. Según un informe presentado en el 2016 por Risk Analytics de BNamericas, de los 158 principales proyectos de infraestructura, 60 presentaron demoras que superan un 31,8%; donde México arrojó las peores estadísticas, cuyos proyectos presentaron un 71,4% de retraso en promedio, de esta manera superando la media colombiana (Saez, 2016).

Según un estudio realizado por Burgos Marín y Vela Ávila las causas principales de las deficiencias presentadas en los proyectos son: retrasos ocasionados por el dueño, órdenes de cambios solicitadas, cambios constructivos, diferencias en las condiciones de campo, condiciones atmosféricas desfavorables, aceleración de trabajo (pérdida de productividad), suspensión del trabajo, error al cotizar los precios de materiales y equipos, errores en el expediente técnico y problemas misceláneos (Burgos Marín & Vela Ávila, 2015).

De acuerdo con lo anterior, se plantea la siguiente pregunta problema:

¿Qué decisión tomar frente los retrasos ocasionados por eventos inesperados?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Aplicar un método de programación reactiva en un proyecto del sector construcción para facilitar la toma de decisiones en el control de proyectos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar métodos de programación reactiva en proyectos de obra civil, mediante una revisión de literatura.
- Proponer un método de programación reactiva ajustado al ambiente de los proyectos de construcción de carreteras.
- Validar la propuesta metodológica en un proyecto de ingeniería

1.3 MARCO CONCEPTUAL

Los siguientes conceptos serán empleados en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

1.3.1 Diagrama de red

Un diagrama de red es un esquema que permite presentar las relaciones de precedencia que hay entre las actividades de un proyecto. Existen dos enfoques diferentes para la creación de este, las cuales son la red de actividades en arcos AOA (Activity On Arc) y la red de actividades en nodos (AON) (Activity on Node network). En el primer tipo de esquema, se utiliza arcos para representar actividades y nodos para representar eventos, siendo un evento, el punto donde un o varias actividades se complementan y/o inician otras. En el segundo esquema, los nodos

representan las actividades y los arcos indican las relaciones de precedencia. Para la consideración del presente trabajo se empleará el AOA, debido a que este es utilizado para la modelación matemática, como lo es esta investigación. (Krajewski, Ritzman, & González Ruiz, 2000)

1.3.2 Línea base

La línea base de un proyecto permite establecer la ruta a seguir para la realización de este y para la consecución de sus objetivos. Contemplando aspectos como el tiempo, presupuesto y las precedencias existentes entre las actividades (Project Management Institute, 2019). En el trabajo investigativo se encuentra la aplicación de este concepto a la hora de evaluar el caso de estudio, información que se encuentra consignada en el acta de inicio del proyecto.

1.3.3 Obra civil

Está vinculada al desarrollo de infraestructuras para la población. En este caso, el uso del término civil procede de la ingeniería civil, que recibe dicha denominación para diferenciarse de la ingeniería militar (Porrás Moya & Díaz, 2015).

2. CARACTERIZACIÓN DE MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN REACTIVA

Los proyectos en el mundo real están sujetos a incesante incertidumbre que se manifiesta en eventos inesperados, tales como entregas retrasados de los materiales, ausentismo laboral, demoras en autorizaciones legales, entre otros., de tal manera, que esto ocasiona retrasos en la programación de las distintas actividades que conforman el proyecto, lo que provoca un exceso en los tiempos de ejecución total con respecto a lo inicialmente planteado (Garrido & Carrillo, 2013; Lledó & Rivarola, 2007).

En proyectos, el término de reprogramación se entiende como una técnica que permite actualizar y corregir las actividades permitiendo así cumplir con lo pactado inicialmente. Para esto se recurre a realizar una transformación del cronograma, como respuesta a las diversas complicaciones que se puedan presentar en el transcurso del desarrollo del proyecto (Pérez Cervantes, 2004; Pfeiffer, Kádár, Csáji, & Monostori, 2007).

Para la realización de una reprogramación en un proyecto se deben tener en cuenta dos aspectos decisivos para la selección del método a utilizar, los cuales son el entorno y las estrategias, como se evidencia a continuación:

Figura 1 Aspectos relevantes de la reprogramación reactiva



Fuente: Adaptado de Vieira, Herrmann y Lin (Vieira, Herrmann, & Lin, 2003)

2.1 ENTORNO DE REPROGRAMACIÓN

Existe una dependencia entre el entorno y los diferentes tipos de interrupciones que generan eventos imprevistos durante la programación. Algunos sucesos inesperados que se pueden presentar en un proyecto son: averías de la maquinaria, variabilidad de la eficiencia de las operaciones, entre otros (Pfeiffer et al., 2007). A continuación, se describen los entornos de reprogramación.

2.1.1 Dinámico

En los entornos de programación dinámicos, los trabajos aparecen en un horizonte de tiempo infinito, es decir el número de trabajos:

- Sin variabilidad de llegadas: Se asemeja a un proceso productivo tipo cíclico, es decir, donde existe un conjunto de productos que presentan una frecuencia constante.
- Con variabilidad de llegada: Se caracteriza por un proceso de producción Flow Shop, donde existe un proceso continuo, pero está orientado a las líneas de fabricación del producto, es decir, producción en masa.
- Con variabilidad en el flujo de proceso: Es similar a un proceso de producción Job Shop, donde las tareas fluyen a través de todos sus procesos siguiendo el mismo orden (Fang & Xi, 1997)

2.1.2 Estático

En un entorno estático, las actividades se encuentran descritas de manera precisa y el número de ellas es finita además de contar con toda la información a lo largo del todo el proceso. Dentro de este tipo de entorno podemos encontrar los siguientes:

- Estocástico: Se caracteriza porque alguna información sobre las actividades es incierta, es decir existe información asociada a probabilidades.
- Determinístico: Se caracteriza por contar con toda la información precisa y exacta en cuanto a las actividades que hacen parte del cronograma para lograr ejecutar el proyecto (Fang & Xi, 1997).

2.2 ESTRATEGIAS DE REPROGRAMACIÓN

Existen tres estrategias de reprogramación las cuales son las siguientes:

2.2.1 Proactiva

La programación proactiva tiene como objetivo concebir cronogramas de línea de base robustos contemplando tantos factores como sea posible, de tal manera que se pueda contar con la suficiente protección contra posibles eventos disruptivos que generan que los tiempos de inicio de la actividad planificados se desvíen de los tiempos de inicio predichos y se generen por tanto dificultades en el cronograma de línea base durante la ejecución del proyecto (Demeulemeester & Herroelen, 2009; Núñez Pichardo, 2015)

2.2.2 Reactivo

Los procedimientos de programación reactiva se enfocan en reparar el cronograma de referencia cuando la protección incorporada o las consideraciones realizadas inicialmente fallan durante la ejecución del proyecto (Demeulemeester & Herroelen, 2009)

2.2.3 Predictiva-Reactiva

Este tipo de estrategia comienza calculando un cronograma predictivo sobre un problema estático en donde se debe actualizar la información para lograr adaptarlo a circunstancias cambiantes, tomando así la característica de ser reactiva a las circunstancias generadas durante la ejecución de un proyecto (Pfeiffer et al., 2007).

La programación de proyectos se centra en la optimización bajo supuestos idealizados de estabilidad del entorno, lo cual supone, que en la mayoría de los casos, la información sobre las actividades esta completa y se trabaja en un ambiente determinístico estático. Estos supuestos implican aceptar que el tiempo estimado para las actividades se cumple cabalmente, los recursos siempre están disponibles, los materiales e insumos siempre llegan a tiempo, las fechas de inicio y finalización de las actividades no cambian, nuevas actividades no son incorporadas, y ninguna actividad previamente programada es eliminada (Herroelen & Leus, 2004).

No obstante, en un proyecto real las actividades que lo conforman están sujetas a incesante incertidumbre, relacionada con eventos no predecibles por el gerente del proyecto, mediante una programación robusta. Por ende, se hace necesario la incorporación de acciones que permitan contrarrestar riesgos no identificados, asociados a la gestión del proyecto, tal como la incorporación del enfoque de programación reactiva que se centra en la integración de la incertidumbre al proceso de administración de proyectos (Garrido & Carrillo, 2013).

2.3 MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN REACTIVA

Dentro de la estrategia de reprogramación reactiva, existen métodos que generan y actualizan los programas existentes y entre ellos se pueden encontrar los siguientes:

2.3.1 Reprogramación total

La reprogramación completa significa que en cada punto de reprogramación, todos los trabajos del cronograma anterior (inicial) que no se procesaron están involucrados durante la formulación del cronograma (Pfeiffer et al., 2007).

Cuando se presenta una interrupción, la parte faltante de las actividades se descartan y se genera un cronograma nuevo, lo cual implica esfuerzos computacionales grandes, es decir, que el nuevo cronograma puede desviarse significativamente del inicial y requerir un tiempo de cálculo excesivo (Kuster, Jannach, & Friedrich, 2010; Vlk & Barták, 2015).

Por tanto, una programación total permite responder a eventos inesperados en un enfoque dinámico, considerando la nueva información y la generación de un nuevo cronograma. De tal manera, que al no poder realizar una acción reparadora en el proyecto es necesario cambiar totalmente las precedencias de las actividades que hacen parte de la línea base, pudiendo realizar modificaciones como la adicción de nuevas actividades o la eliminación de las existentes (Demeulemeester & Herroelen, 2009).

2.3.2 Reprogramación parcial

La reprogramación parcial consiste en reprogramar solo un subconjunto de todas las actividades donde tiene efecto el evento inesperado, en lugar de optimizar las actividades futuras no afectadas; este método a diferencia del método de reprogramación total intenta conservar el cronograma inicial tanto como sea posible (Kuster et al., 2010; Pfeiffer et al., 2007).

2.3.3 Acción reparadora

El método de reparación del cronograma mediante acciones reparadoras propone desplazar hacia la derecha posponiendo cada actividad afectada para hacer que el cronograma sea factible (Pfeiffer et al., 2007).

Una acción reparadora es una técnica simple de restauración de la línea base. La acción reparadora consiste en desplazar hacia adelante (empujar), en el tiempo, la

ejecución de las actividades subsecuentes del proyecto, siempre que la holgura de tiempo entre las actividades lo permita (Garrido & Carrillo, 2013).

2.4 APLICACIONES DE LOS MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN REACTIVA

A continuación, se describen dos aplicaciones de métodos de programación reactiva en proyectos, involucrando la aparición de eventos inesperados.

2.4.1 Caso aplicación de reprogramación total y acción reparadora

En el artículo “Programación reactiva en la administración de proyectos: aproximación conceptual y aplicaciones prácticas”, se plantea una técnica de acción reparadora para restaurar la línea base cuando se presenta un evento inesperado, la técnica consiste en desplazar hacia adelante en el tiempo las actividades, teniendo en cuenta la holgura que tengan (Garrido & Carrillo, 2013).

Los autores describen un caso de estudio que consiste en la instalación de tuberías en un ambiente determinístico estático. La estructura se presenta bajo el esquema AOA en el cual se describe dieciséis actividades reales y una actividad ficticia, como se evidencia en la siguiente figura (Garrido & Carrillo, 2013).

Tabla 1 Descripción de actividades, Caso de aplicación 1

i	Descripción de i	Precedencia	t_i^P	c_i^P
A	Organizar personal y equipo	No	2,00	5
B	Transporte al lugar de la obra	A	2,00	10
C	Adquirir tubería	A	3,17	4
D	Adquirir válvulas	A	2,83	3
E	Trazar ejes	B	2,00	5
F	Acondicionar accesorios	C	2,17	5
G	Excavar zanjas	F	5,17	8
H	Preparar cajas para válvulas	G	2,83	4
I	Colocar tubería	B	3,17	4
J	Colocar anclajes de concreto	I	2,83	5
K	Colocar válvulas	D, E, H	3,00	5
L	Probar tubería	J, K	2,17	2
M	Rellenar	J, K	3,17	5
N	Terminar cajas para válvulas	J, K	2,00	3
O	Limpieza	M, N	2,00	1
P	Retirar equipo y personal	L, O	2,17	10

Fuente: Tomada de Garrido y Carrillo (2013).

Durante la ejecución de las actividades se presenta un evento inesperado en la semana 21, lo que conlleva retrasos en el cronograma del proyecto, por tanto el gerente del proyecto se ve obligado a tomar decisiones disponiendo de dos alternativas, las cuales son reparar las actividades del proyecto o reprogramar totalmente las actividades. Como primera instancia, se identifica que las actividades M y O son críticas, por ende, se establece que la única opción para reparar la consistencia de la línea base será acortar la duración de “M”, “O” o ambas, lo cual implica asignar recursos financieros, de personal o tiempo (Garrido & Carrillo, 2013).

Para la asignación de recursos financieros se requiere la incorporación del concepto de quiebre de un proyecto, el cual se basa en la aceleración de actividades asumiendo sobrecostos con el fin de reducir el tiempo de entrega. De tal manera, que se cumpla con el objetivo generado por este gestor, que es el de no exceder la duración del proyecto (Garrido & Carrillo, 2013).

Con esta alternativa se genera una reparación del cronograma inicial, frente a la aparición del evento inesperado en la fase de ejecución, basada en el enfoque racional de la programación reactiva (Garrido & Carrillo, 2013).

Por tanto, la programación reactiva es una herramienta de contingencia estructurada que mediante la reparación y actualización del cronograma inicial ayuda a tomar decisiones frente a evento inesperados, teniendo como objetivo principal mantener la línea base, y estando supeditada a la disponibilidad de recursos financieros o restricción de duración del proyecto (Garrido & Carrillo, 2013).

Este artículo a la investigación aporta el concepto de programación reactiva, como también incorpora el concepto quiebre para la aceleración de proyectos que han sufrido retrasos por imprevistos no contemplados en la programación robusta.

2.4.2 Caso aplicación de reprogramación completa y parcial

En el artículo “Applying Local Rescheduling in response to Schedule Disruptions” una discusión sobre investigaciones de reprogramación parcial, donde logran definir que este tipo de estrategia no intenta optimizar todo el futuro de inmediato, primero se intenta resolver los problemas localmente (Kuster et al., 2010)

Los autores presentan como punto de partida aplicaciones de tipo DM (Administración de interrupciones) y RCPSP (Problema de programación de tareas con recursos restringidos) donde logran realizar una descripción detallada donde muestran que en este tipo de modelos es posible modificar los tiempos de inicio y asignación. Los autores plantean una extensión para este tipo de aplicaciones que tiene como propósito principal la elección de alternativas para la subcontratación además de contar con la posibilidad de cancelar y sustituir actividades. Además,

describen un algoritmo para lograr resumir el procedimiento de reprogramación parcial (Kuster et al., 2010).

Tras la realización de este estudio se concluyó lo siguiente:

- Los métodos desarrollados de reprogramación parcial brindan resultados más eficientes que la reprogramación completa.
- El beneficio relativo asociado con la aplicación de reprogramación parcial aumenta junto con el tamaño del problema.

En resumen, se puede afirmar que la reprogramación parcial funciona particularmente bien si el problema considerado es complejo y si hay poco tiempo disponible para la identificación de una buena solución. Ambos aspectos se dan típicamente en aplicaciones realistas de gestión de interrupción operacional (Kuster et al., 2010).

De acuerdo con la revisión de la literatura, en la reprogramación reactiva se pueden aplicar tres métodos que son la reprogramación total, la reprogramación parcial y la acción reparadora. El criterio para seleccionar el método más favorable depende de varios aspectos, tales como la capacidad económica para solventar sobrecostos, la disposición de tiempos adicionales al de las actividades del plan inicial, la relevancia entre las precedencias que exista entre las actividades, la disponibilidad de recursos adicionales (mano de obra, maquinaria y equipo, etc.) y el tiempo disponible para responder a la ruptura del proyecto. Además, se pueden presentar restricciones de carácter ambiental y social que impidan realizar modificaciones al plan inicial (Garrido & Carrillo, 2013; Kuster et al., 2010; Pfeiffer et al., 2007)

3. METODO DE PROGRAMACIÓN REACTIVA EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS

La construcción de carreteras son un proyecto de obra civil que contemplan aspectos administrativos, tales como los procesos de contratación, aprobación y obtención de licencias, etc. (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2017).

Para la ejecución de las obras de infraestructura se puede convocar mediante una licitación pública o privada. Las licitaciones tanto públicas como privadas tienen como objetivo la satisfacción del cliente, cumplimiento de las fechas de entrega, calidad de la obra y utilización de los avances tecnológicos (Universidad EAFIT, s. f.).

En este contexto, es importante cumplir con las condiciones de la licitación pactadas en el acta de inicio y cronograma inicial, es decir, alcance, presupuesto y tiempo de entrega (Lledó & Rivarola, 2007).

Una vez adjudicado la licitación y puesta en marcha la obra puede ocurrir eventos que afecten la ejecución real del proyecto respecto al cronograma inicial, por lo cual el gestor del proyecto debe tomar una decisión que permita cumplir con el tiempo de entrega y/o el presupuesto pactado (Garrido & Carrillo, 2013).

Dentro de las posibles decisiones que puede tomar el gestor del proyecto se puede contemplar incrementar el tiempo de entrega sin incurrir en sobrecostos, acelerar actividades del proyecto asumiendo sobrecostos, considerar ambas restricciones.

De acuerdo con la revisión de literatura, se empleará la programación reactiva para facilitar la toma de decisiones mediante la actualización y/o corrección del cronograma inicial, como se evidencia a continuación.

3.1 OBTENCIÓN INFORMACIÓN CASO DE ESTUDIO

3.1.1 Actividades caso de estudio

Para iniciar un proyecto es necesario el establecimiento de un cronograma inicial donde se detallan aspectos relevantes como las actividades que conforman el proyecto y la duración de estas. De tal manera que sirve para validar información acerca del estado del proyecto con respecto a la planificación inicial, es decir tiempos de inicio, duración de actividades y tiempo de duración total del proyecto (Lledó & Rivarola, 2007).

3.1.2 Especificaciones de precedencias y duraciones

Es necesario definir las precedencias de las actividades además del tiempo de duración estimado para cada actividad, de esta manera se puede ir definiendo en primera instancia el plan inicial.

3.1.3 Requerimientos

En requerimientos se consideran los tiempos y costos asociados a la ejecución de actividades para cumplimiento del cronograma de la línea base.

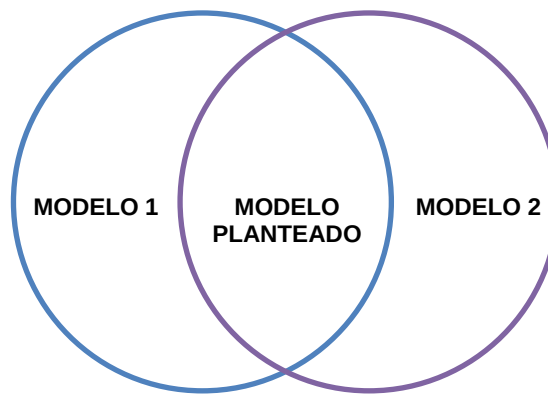
3.1.4 Programación de actividades en la línea tiempo y diagrama de Gantt

Teniendo en cuenta la información definida en el numeral 3.1.2, se procede a realizar un diagrama de Gantt donde se ilustre de mejor manera las precedencias entre las actividades que conforman el proyecto.

3.2 MODELO MATEMÁTICO

Para la generación del modelo a utilizar en el caso de estudio de proyectos de obra civil, se tendrán como base la utilización de dos modelos matemáticos, descritos a continuación, los cuales contemplan la programación de un proyecto desde el punto de vista lineal y que involucra variables tales como las precedencias de actividades, objetivos de minimización de costos, tiempos de entrega, etc., generando el modelo del numeral 3.3.3.

Figura 2 Esquema modelo planteado



Fuente: Elaboración propia.

3.2.1 Modelo matemático 1

El primer modelo que se toma como referencia para la realización del trabajo de investigación es “Proyecto de Reliable Construction Co” (Hillier & Lieberman, 2010). En este se expone un modelo de programación lineal que tiene como objetivo la ejecución de un proyecto de construcción de una planta, dado un tiempo máximo de terminación de este.

En el modelo, los autores propusieron aplicar el concepto de quiebre de un proyecto, el cual hace referencia a la aceleración de actividades con el fin de reducir el tiempo de entrega, y la evaluación de los costos generados por el quiebre. De tal manera,

que se cumplan con las condiciones de entrega y a su vez, se minimicen los incrementos presupuestarios para la finalización del proyecto (Hillier & Lieberman, 2010).

Para el cálculo del costo de quiebre ahorrado por día (o por periodo), se emplean las fórmulas dadas en las ecuaciones 1 y 2, donde el costo de quiebre y el tiempo de quiebre, es suministrado por expertos y/o ejecutores del proyecto.

$$\text{Máxima reducción en tiempo en días} = \text{Tiempo normal} - \text{Tiempo quiebre}$$

Ecuación 1

$$\text{Costo quiebre por día ahorrado} = \frac{\text{Costo de quiebre} - \text{Costo normal}}{\text{Máxima reducción en tiempo en días}}$$

Ecuación 2

Como el objetivo del problema es reducir los costos asociados a la aceleración de actividades, los autores emplearon la programación lineal considerando los limitantes del proyecto. Lo cual permitió establecer el siguiente modelo:

- **Enunciado del problema**

Sea Z el costo total de reducir las actividades, dado que existe una restricción de duración máxima del proyecto.

- **Índices:**

Sea

j = las actividades que conforman el proyecto

Donde j = Actividad A, Actividad B, ..., Actividad N

- **Variables de decisión**

Las variables de decisión son:

X_j = Reducción de la duración actividad j debido al quiebre de esta actividad j [días]

Mrt_j = Reducción máxima de tiempo para la actividad j [días]

$Cqda_j$ = Costo de quiebre por día ahorrado en la actividad j [\$/días]

tn_j = Tiempo normal de duración planteado inicialmente para la actividad j [días]

Y_j = tiempo de inicio de la actividad j [días] Para j = Actividad B, ..., Actividad N

Dado los valores $X_A, X_B, \dots, X_N$, no es necesario una variable de este tipo para la actividad A, puesto que una actividad que inicia el proyecto tiene un valor automático de cero (Hillier & Lieberman, 2010).

- **Parámetros**

$Y_{\text{TERMINACIÓN}}$ = Duración del proyecto, es decir, el tiempo en el que se alcanza el nodo Terminación de la red de proyecto [días]

- **Función objetivo**

Minimizar el costo total asociado a la reducción del tiempo de ejecución total del proyecto (reducción en las actividades).

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^N Cqda_j * X_j \quad [\$]$$

Ecuación 3

- **Restricciones**

Duración del proyecto: En esta restricción se contempla la duración máxima deseada, es decir, el tiempo en días (unidad de tiempo empleada en el ejercicio) que debe durar como máximo la ejecución de todas las actividades que conforman el proyecto.

$$Y_{\text{TERMINACIÓN}} \leq \text{duración total maxima del proyecto [días]}$$

Ecuación 4

Reducción máxima: Representa la máxima reducción posible de tiempo que puede tener cada una de las actividades (j) del proyecto, dadas por los valores calculados usando la ecuación 1.

$$X_j \leq Mrt_j$$

Ecuación 5

No negatividad: La cantidad de días reducidos y el tiempo de inicio de la actividades no pueden ser negativas, es decir, deben ser igual o mayor a cero.

$$X_A \geq 0; X_B \geq 0; \dots X_N \geq 0$$

$$Y_B \geq 0; Y_C \geq 0; \dots Y_N \geq 0, Y_{\text{TERMINACIÓN}} \geq 0$$

Ecuación 6

Tiempo de inicio: Aplica para las actividades que tienen predecesoras, de tal manera, que no se puedan iniciar hasta haber finalizado las anteriores. Por ejemplo, se puede considerar una actividad j con tiempo de duración normal tn_j y que tiene como predecesora la actividad $j-1$, por ende, la fórmula general para este tipo de restricción estaría dada por la Ecuación 7.

$$Y_{j-1} \geq Y_j + tn_j - X_j$$

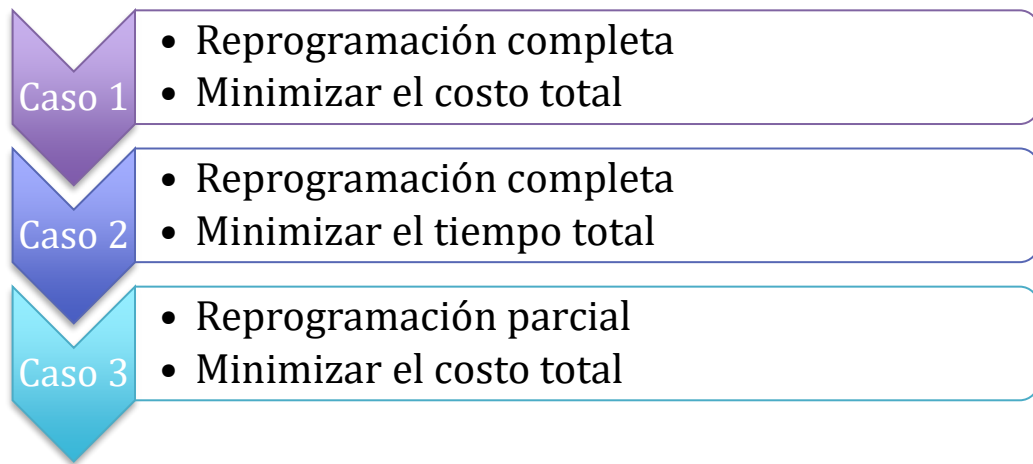
Ecuación 7

3.2.2 Modelo matemático 2

En el artículo “Construction rescheduling based on a manufacturing rescheduling framework” los autores proponen un modelo de optimización de proyectos de construcción para un entorno determinístico que involucra el monitoreo, actualización y reprogramación a lo largo del proyecto (Liu & Shih, 2009).

Para la realización del estudio, se proponen tres casos, en el primero se da una reprogramación completa que tiene como función objetivo la minimización de los costos totales, el segundo caso plantea una reprogramación completa que busca minimizar la duración del proyecto y finalmente una reprogramación parcial que tiene como finalidad la minimización del costo total.

Figura 3 Casos aplicados en el modelo referente



Fuente: Elaboración propia.

En el caso, se considera un proyecto que posee n actividades designadas mediante el índice i , las cuales para su ejecución tienen un requerimiento de recursos j sujeto a la duración. Además, se establece la relación de precedencia entre las actividades que componen el proyecto, generando lo siguiente:

- **Índices**

Sea:

i = Actividades que conforman el proyecto.

Donde: i = Actividad 1, Actividad 2, ..., Actividad e

j = Recursos necesarios para la ejecución de la actividad i .

Siendo: j = Recurso 1, Recurso 2, ..., Recurso r

k = Días que conforman la ejecución de las actividades i .

Donde: k = Día 1, Día 2, ..., Día 630

- **Parámetros**

rc_j = Costo unitario por día del recurso j
 rl_j = Límite diario del tipo de recurso j por día
 idc = Costo indirecto diario
 os_i = Día de inicio de la actividad i en el cronograma inicial
 od_i = Duración de la actividad i en el cronograma inicial
 rt = Día en el que inicia la reprogramación
 pa_i = Porcentaje de finalización de la actividad i
 ad_i = Número real de días de trabajo para la actividad i
 cb = Presupuesto del proyecto

- **Variables**

CD_i = Duración de la actividad i
 $RUCD_{ij}$ = Cantidad de recurso j utilizado de acuerdo con la duración de la actividad i
 S_i y S_s = Tiempo de inicio de la actividad i y su sucesor s , respectivamente

- **Conjuntos**

P = Conjunto de pares de actividades con relaciones de precedencia
 D_i = Conjunto de opciones de duración para la actividad i
 S_k = Actividades en progreso el día k
 M = Conjunto de actividades que están finalizadas
 L = Conjunto de actividades en progreso
 $Ceil$ = Función que extrae el entero mínimo que es mayor al valor de entrada

- **Función objetivo**

La función objetivo determina la minimización de los costos totales del proyecto, teniendo en cuenta la cantidad de recursos de cada actividad, su duración y los

costos indirectos a lo largo de todo el proyecto. Como se puede evidenciar en la Ecuación 8.

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^r \left(\sum_{i=1}^e \text{RU}_{\text{CD}_i j} * \text{CD}_i * \text{rc}_j \right) + (\text{S}_e + \text{CD}_e) * \text{idc}$$

Ecuación 8

Se puede definir como función objetivo solo la minimización de la duración del proyecto, tal como se ve en la Ecuación 9.

$$\text{Min } Z = (\text{S}_i + \text{CD}_i) \text{ Para } i = e$$

Ecuación 9

- **Restricciones**

Relación de precedencia: Representa las relaciones de precedencia entre las actividades que usan el conjunto de actividades pares.

$$\text{S}_s - \text{S}_i \geq \text{CD}_i \quad i = 1, 2, \dots, e; \text{ all } (i, s) \in P; \forall \text{CD}_i \in D_i$$

Ecuación 10

Limitación de recursos: Restringe el uso diario de recursos j para todas las actividades i del proyecto.

$$\text{rl}_j \geq \sum_{i=1}^{\text{AS}_k} \text{RU}_{\text{CD}_i j} ; \quad \forall i \in \text{S}_k; k = 1, 2, \dots, ; (\text{S}_e + \text{CD}_e);$$

Ecuación 11

Restricciones adicionales: Estas restricciones se plantean como adicionales para casos de actualización la programación:

Restricciones de las actividades en curso: Se aplica a las actividades que deben ejecutarse continuamente después de la reprogramación:

$$S_i = rt; \forall i \in L$$

Ecuación 12

$$S_i \geq rt; \forall i \in L$$

Ecuación 13

Restricciones de las actividades programadas para la programación parcial: Representa una condición cuando las actividades en progreso se puede dividir, por ende los planificadores pueden posponer algunas actividades incompletas para liberar recursos importantes para acelerar la duración de las actividades en la ruta crítica.

$$S_i = os_i; \forall i \in M$$

Ecuación 14

$$D_i = od_i; \forall i \in M$$

Ecuación 15

Modificaciones de productividad: Puede representar las modificaciones de la productividad con un ajuste de la duración de las actividades.

$$D_i = \text{Ceil} (od_i * (1 - pa_i) * (pa_i \div od_i) \div pa_i$$

Ecuación 16

$$D_i = (odi - adi)$$

Ecuación 17

Limitación de presupuesto: se adopta para modificar las condiciones de productividad

$$cb \geq \sum_{j=1}^r \left(\sum_{i=1}^n RU_{CD_{ij}} * CD_i * rc_j \right) + (S_e + CD_e) * idc$$

Ecuación 18

3.2.3 Modelo propuesto

El modelo propuesto está basado en lo enunciado en el modelo matemático dos, incorporando conceptos como el costo quiebre y tiempo de quiebre enunciado en el modelo matemático uno. De tal manera que se utilizan variables, conjuntos, parámetros y restricciones expuestos en los modelos tomados como referencia, como se describe a continuación:

- **Supuestos**

La duración de las actividades se plantea en días, se toma como semana seis (6) días calendario.

Como unidades se utilizan para costos pesos colombianos y para duraciones días.

Los costos indirectos diarios del proyecto están contemplados en el presupuesto generado para cada actividad.

- **Conjuntos e índices**

Índices

Sea: i = Actividades que conforman el proyecto.

Donde: i = Actividad 1, Actividad 2, ..., Actividad n

s = Actividades sucesoras de la actividad i .

Donde i = Actividad 1, Actividad 2, ..., Actividad $(n - 1)$

Conjuntos Se define los siguientes:

Conjunto pares, el cual especifica las precedencias entre las actividades del proyecto

Conjunto pares = {actividades, actividades}

Conjunto M, conjunto de actividades que ya están finalizadas

Parámetros

D_i = Duración normal de la actividad i [días]

R_i = Reducción maxima de la actividad i [días]

CR_i = Sobre costo reducción diario de la actividad i [\$/día]

CN_i = Costo normal diario de la actividad i [\$/día]

IDC = Costo indirecto diario [\$/día]

- **Variables**

X_i = Cantidad de días reducidos de la actividad i [días]

Y_i = Tiempo de inicio de la actividad i [días]

Antes de continuar con las restricciones y la función objetivo, es preciso resaltar que, en función de la necesidad, se pretenda minimizar el costo total, el tiempo total o ambas. En este orden ideas, se propone evaluar tres (3) casos en aras de cumplir con las presunciones deseables por el gestor del proyecto, tales como la minimización del costo total o el tiempo de entrega.

Para ello, se considera de acuerdo con cada caso un conjunto de restricciones acordes al caso y una función objetivo, respectivamente.

Las relaciones de precedencia del conjunto pares, la cantidad máxima de días a reducir la actividad i , el inicio del proyecto en tiempo cero (0) y la no negatividad de variables, son restricciones que aplican para los tres casos en consideración.

Actividades precedentes: Se aplica para cada una de las actividades que tienen actividades predecesoras. De tal manera que ninguna actividad sucesora podría iniciar sin haber terminado la duración de la actividad anterior.

$$Y_s - Y_i \geq D_i - X_i \quad \forall i, s \in \text{Conjuntos pares}$$

Ecuación 19

Límite de reducción máxima: Representa la máxima reducción posible de tiempo para cada una de las actividades.

$$X_i \leq R_i \quad \forall i$$

Ecuación 20

Inicio del proyecto: El proyecto debe iniciar con la actividad 1.

$$Y_i = 0 \text{ Para } i = 1$$

Ecuación 21

No negatividad: La cantidad de días reducidos y el tiempo de inicio de la actividades no pueden ser negativas, es decir deben ser igual o mayor a cero.

$$X_i \geq 0; \forall i$$

$$Y_i \geq 0; \text{ Para } i = \text{Actividad B}, \dots, \text{Actividad N}$$

$$Y_{\text{TERMINACIÓN}} \geq 0$$

Ecuación 22

- **Caso 1: Minimizar tiempo total**

Se ajusta la Ecuación 9 del modelo referente 2, para determinar la minimización del tiempo total del proyecto, así:

Función objetivo

$$\text{Min } Z = (Y_i + D_i) \text{ Para } i = n$$

Ecuación 23

- **Caso 2: Minimizar costo total con restricción de tiempo de entrega**

Para determinar función objetivo para la minimización del tiempo total y el costo total del proyecto, se genera la Ecuación 24, a partir de la Ecuación 3 del modelo matemático 1 y la Ecuación 8 del modelo referente 2, como se muestra a continuación:

Función objetivo

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n (CR_i * X_i + D_i * CN_i) + (Y_n + D_n) * IDC [\text{\$}]$$

Ecuación 24

Restricciones adicionales

Tiempo de terminación del proyecto: Esta restricción permite que no se supere la duración estimada del proyecto.

$$Y_i + D_i \leq \text{duración estimada del proyecto} \quad \text{Para } i = n$$

Ecuación 25

No reducción de tiempo para actividades finalizadas

$$X_i = 0 \quad \forall i \in M$$

Ecuación 26

- **Caso 3: Minimizar costo total con restricción de presupuesto**

Para determinar la minimización del costo total del proyecto, se utiliza como función objetivo la Ecuación 24 definida anteriormente:

Restricciones adicionales

Se emplean las restricciones de tiempo de terminación del proyecto y No reducción de tiempo para actividades finalizadas determinadas en Ecuación 25 y en la Ecuación 26, respectivamente. Adicionalmente, se formula la siguiente restricción para este caso en particular:

$$\sum_{i=1}^n (CR_i * X_i + D_i * CN_i) + (Y_n + D_n) * IDC \leq \text{Presupuesto del proyecto}$$

Ecuación 27

4. CASO DE ESTUDIO

La construcción de infraestructura más que un fin, se constituye como un medio a través del cual las demás actividades económicas crecen y se desarrollan. En este sentido, según Fedesarrollo, por cada peso de valor agregado en obras civiles, se impulsa 1.4 de pesos de producción por la utilización de la infraestructura como insumo (Secretaría de vías e infraestructura, 2017).

Para la aplicación de los modelos propuestos en el capítulo anterior se tomaron en cuenta las actividades descritas en el caso de estudio 4151.LP.04.2015 (código de proceso SECOP), el cual tuvo como objeto la Construcción del pavimento de la carrera 100B entre la abscisa k0+000 (ubicada 50 metros hacia el sur de la intersección de la carrera 98 con calle 3) y la abscisa k0+800 en el sector altos de santa Elena - comuna 18 del municipio de Santiago de Cali, el cual tendría 800 metros de longitud y 7.20 metros de ancho (Sistema electrónico de contratación pública, 2015).

El plazo establecido (duración cronograma proyectado) por la secretaria de infraestructura y valorización fue de ciento (120) días calendario a partir del acta de inicio y el presupuesto oficial para la realización del proyecto se estimó en Mil seis millones ciento setenta y ocho mil novecientos sesenta y un pesos M/Cte. (\$1.006.178.961) cuya estimación se realizó mediante estudios de mercado efectuados por la secretaria (Sistema electrónico de contratación pública, 2015).

4.1 OBTENCIÓN INFORMACIÓN CASO DE ESTUDIO

4.1.1 Actividades caso de estudio

Del cronograma inicial del proyecto se extrajo la información de las actividades que componen el proyecto, las cuales se enuncian en la Tabla 3 Actividades caso de

estudio, a estas para la consideración del ejercicio se le asignó un subíndice con el cual se empleará en la ejecución del modelo.

Tabla 2 Actividades caso de estudio

Subíndice	Nombre actividad
1	Localización y replanteo áreas a reparar
2	Excavación de tierra a mano hasta 80 cm de profundidad
3	Excavación y retiro de saldos a máquina hasta 1.20 m de profundidad
4	Excavación y retiro de saldos a máquina hasta 1.20 m de profundidad
5	Retiro saldos de excavación a mano
6	Escarificación, conformación y compactación de la subrogante obra de pavimentación
7	Escarificación, conformación y compactación de la subrasante obras de pavimentación
8	Suministro e instalación de material granular tipo INVIAS para subbase, compactación del 95% del p.m. obras de pavimentación
9	Suministro e instalación de material granular tipo INVIAS para subbase, compactación del 95% del p.m. obras de pavimentación
10	Suministro e instalación de material granular tipo INVIAS para base, compactación del 100% del p.m. obras de pavimentación
11	Suministro e instalación de material granular tipo INVIAS para base, compactación del 100% del p.m. obras de pavimentación
12	Suministro e instalación de emulsión asfáltica para imprimación a máquina obras de pavimentación
13	Suministro e instalación de emulsión asfáltica para imprimación a máquina obras de pavimentación
14	Suministro e instalación de emulsión asfáltica para imprimación a máquina obras de pavimentación
15	Construcción sardinel trapezoidal en concreto simple (h=40 cm) $f'c= 3000$ psi incluye antisol
16	Nivelación cámara de inspección $f'c =3500$ psi incluye material preparado in situ, aditivo para curado y retiro de escombros
17	Nivelación cámara de inspección $f'c =3500$ psi incluye material preparado in situ, aditivo para curado y retiro de escombros
18	Construcción sumidero sencillo tipo "b", EMCALI, $f'c=3500$ psi incluye excavación
19	Construcción sumidero sencillo tipo "b", encale, $f'c=3500$ psi incluye excavación

20	Demarcación y señalización vial con marcas longitudinales 0,12 m de ancho y 0,23 mm de espesor en pintura acrílica en frío para tráfico con suministro de microesferas reflectabas (según norma INVIAS y ntc 1360-1)
21	Demarcación y señalización vial con marcas transversales de 0,23 mm de espesor en pintura acrílica en frío para tráfico con suministro de microesferas reflectabas (según norma INVIAS y ntc 1360-1)
22	Demarcación y señalización vial con marcas transversales de 0,23 mm de espesor en pintura acrílica en frío para tráfico con suministro de microesferas reflectabas (según norma INVIAS y ntc 1360-1)
23	Demarcación y señalización vial con marcas transversales de 0,23 mm de espesor en pintura acrílica en frío para tráfico con suministro de microesferas reflectabas (según norma INVIAS y ntc 1360-1)
24	Fin

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 Especificaciones de precedencias y duraciones

En la Tabla 4 Duración de actividades, caso de estudio se describen las duraciones y las relaciones de precedencia existentes entre las actividades que componen el proyecto.

Tabla 3 Duración de actividades, caso de estudio

Subíndice	Duración Normal (días)	Actividad Predecesora
1	12	-
2	6	1
3	12	1
4	18	14
5	6	1
6	6	2,5
7	6	13,18
8	6	3,6
9	6	4,7
10	6	14
11	12	9
12	6	14
13	6	10,12,16
14	12	8
15	12	9

16	6	14
17	6	15
18	6	10,12,16
19	6	11,17,22
20	6	19,23
21	6	19,23
22	6	15
23	12	15
24	1	20,21

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Requerimientos

Para el planteamiento de los requerimientos se tomó como referente el modelo uno, enunciado en el Capítulo 3, definiéndoles así:

- Tiempo normal: Tiempo duración de la actividad en el plan inicial en días.
- Tiempo de quiebre: Tiempo mínimo de duración de la actividad en días.
- Costo normal: Costo según la duración normal, teniendo en cuenta los recursos asignados en el plan inicial en pesos.
- Costo de quiebre: Costo según la duración mínima teniendo en cuenta el aumento de los recursos iniciales en pesos.
- Máxima reducción en tiempo: Tiempo máximo de reducción para cada actividad en días.
- Costo de quiebre por día ahorrado: Costo asumido por cada día que se reduzca la duración de la actividad según el plan inicial en pesos.

Para la determinación, del tiempo y costo de quiebre se convocaron seis ingenieros civiles del Ingenio del Cauca S.A.S y de empresas constructoras de la ciudad de Palmira, sin embargo, solo uno brindó asesoría para el caso de estudio, el cual fue el Ingeniero Civil Bernardo Perea Cruz, Gerente de la empresa Constructora BPC S.A.S de la ciudad de Palmira, Valle del Cauca, el cual estimó con base en su

experiencia en el sector que el porcentaje promedio de incremento para generar los tiempos de quiebre expuestos en Tabla 4 es del treinta (30) por ciento. Como también, el experto expuso que las actividades correspondientes al suministro e instalación de emulsión asfáltica no pueden acelerarse.

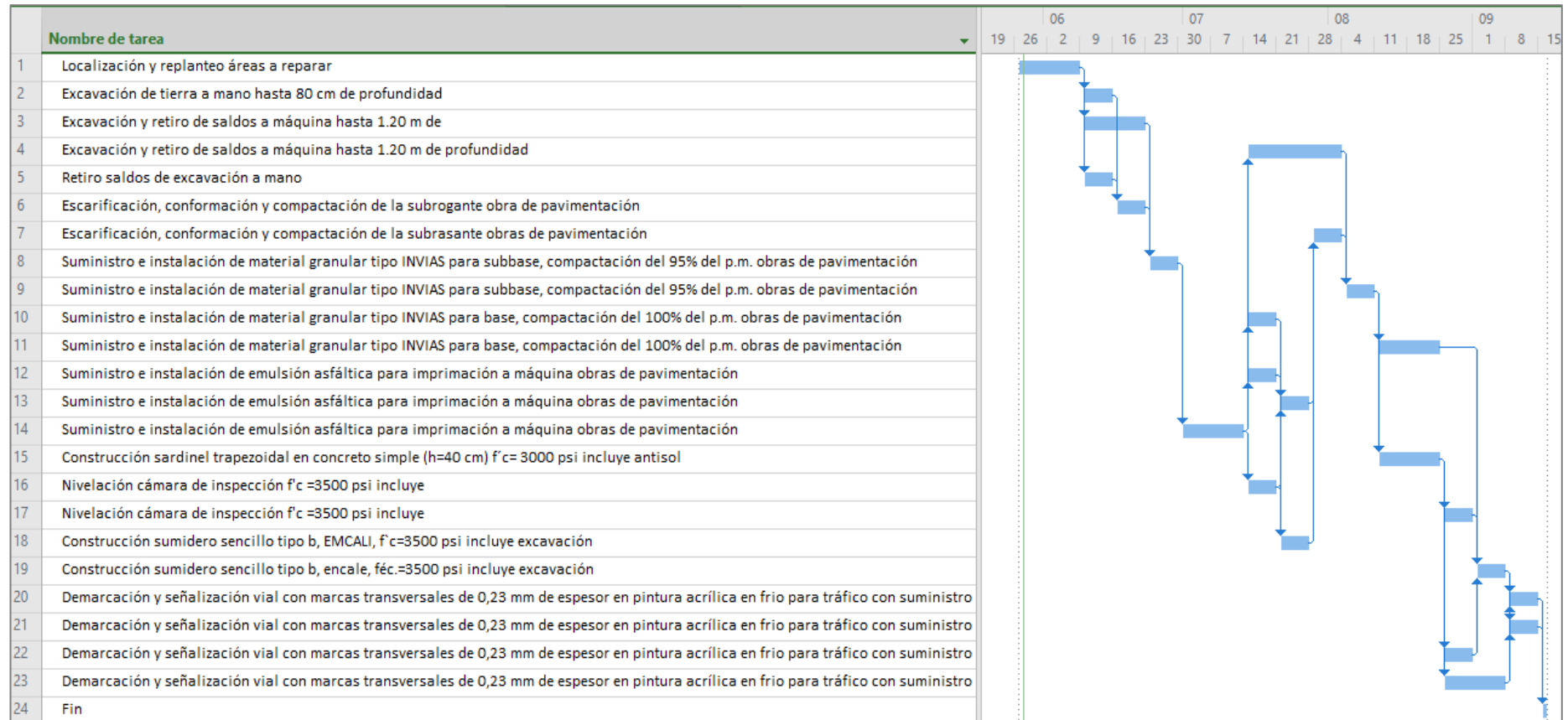
Tabla 4 Costos y tiempos Caso de estudio

Sub-índice	Normal	Quiebre	Presupuesto	Pto diario	Costo quiebre	Máxima reducción (días)	Costo quiebre (día ahorrado)
1	12	8	\$ 5.364.000	\$ 447.000	\$ 6.973.200	4	\$ 402.300
2	6	4	\$ 91.795	\$ 15.299	\$ 119.334	2	\$ 13.769
3	12	6	\$ 56.637.000	\$ 4.719.750	\$ 73.628.100	6	\$ 2.831.850
4	18	12	\$ 62.300.700	\$ 3.461.150	\$ 80.990.910	6	\$ 3.115.035
5	6	4	\$ 164.375	\$ 27.396	\$ 213.688	2	\$ 24.656
6	6	3	\$ 7.651.275	\$ 1.275.213	\$ 9.946.658	3	\$ 765.128
7	6	3	\$ 7.651.275	\$ 1.275.213	\$ 9.946.658	3	\$ 765.128
8	6	6	\$ 83.966.197	\$ 13.994.366	\$ 109.156.056	-	\$ -
9	6	6	\$ 83.966.197	\$ 13.994.366	\$ 109.156.056	-	\$ -
10	6	6	\$ 65.933.400	\$ 10.988.900	\$ 85.713.420	-	\$ -
11	12	12	\$ 65.933.400	\$ 5.494.450	\$ 85.713.420	-	\$ -
12	6	3	\$ 6.462.000	\$ 1.077.000	\$ 8.400.600	3	\$ 646.200
13	6	4	\$ 6.462.000	\$ 1.077.000	\$ 8.400.600	2	\$ 969.300
14	12	7	\$ 212.756.400	\$ 17.729.700	\$ 276.583.320	5	\$12.765.384
15	12	7	\$ 212.756.400	\$ 17.729.700	\$ 276.583.320	5	\$12.765.384
16	6	4	\$ 43.143.200	\$ 7.190.533	\$ 56.086.160	2	\$ 6.471.480
17	6	4	\$ 43.143.200	\$ 7.190.533	\$ 56.086.160	2	\$ 6.471.480
18	6	5	\$ 643.008	\$ 107.168	\$ 835.910	1	\$ 192.902
19	6	5	\$ 643.008	\$ 107.168	\$ 835.910	1	\$ 192.902
20	6	4	\$ 1.201.340	\$ 200.223	\$ 1.561.742	2	\$ 180.201
21	6	5	\$ 1.201.340	\$ 200.223	\$ 1.561.742	1	\$ 360.402
22	6	3	\$ 13.619.200	\$ 2.269.867	\$ 17.704.960	3	\$ 1.361.920
23	12	6	\$ 402.520	\$ 33.543	\$ 523.276	6	\$ 20.126
24	1	1	\$ -			-	

Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Programación de actividades en la línea tiempo y diagrama de Gantt Cuando se cuenta con la información definida anteriormente, se procede a graficar un diagrama de Gantt, ilustrando las precedencias entre actividades.

Figura 4 Diagrama de Gantt para plan inicial



Fuente: Elaboración propia

4.2 ANÁLISIS DE ESCENARIOS

4.2.1 Plan inicial

Para calcular el plan inicial del proyecto, se utilizó el modelo adaptado mostrado en el capítulo anterior, el cual tiene por objetivo minimizar los costos globales del proyecto, incluyendo el costo de desarrollar una actividad en condiciones normales, y el costo adicional de reducir en tiempo la elaboración de las actividades en caso de ser necesario. Para mostrar la funcionalidad del modelo en la reprogramación se plantea la siguiente situación del caso de estudio:

Luego de transcurridos veinticuatro (24) días del proyecto y haber realizado la actividad número 8 por completo, se realizó una suspensión del proyecto debido a que se requería presentar para su aprobación el Plan de Manejo Ambiental con el fin de obtener la autorización o permiso para la ejecución de la carrera 100B. En consecuencia, se generó un retraso con respecto al cronograma inicial de la actividad número 14 de treinta (30) días Calendario.

En la óptica de optimizar la duración total del proyecto, el costo total del proyecto o ambas, frente a la interrupción descrita anteriormente, se ejecuta la modelación matemática expresada en el capítulo 3 utilizando los datos del caso de estudio.

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la ejecución del modelo matemático propuesto se empleó el Software AMPL, que a diferencia de programas como MS Project (que es una herramienta de gestión y control de proyectos del paquete de software Office), permite la inclusión de variables, restricciones y parámetros para la optimización de una manera automática.

Complementando lo anterior, se comparte el resultado arrojado al correr el modelo mediante el Software AMPL, de los tres casos evaluados y de la Línea Base.

Tabla 5 Resumen de resultados obtenidos

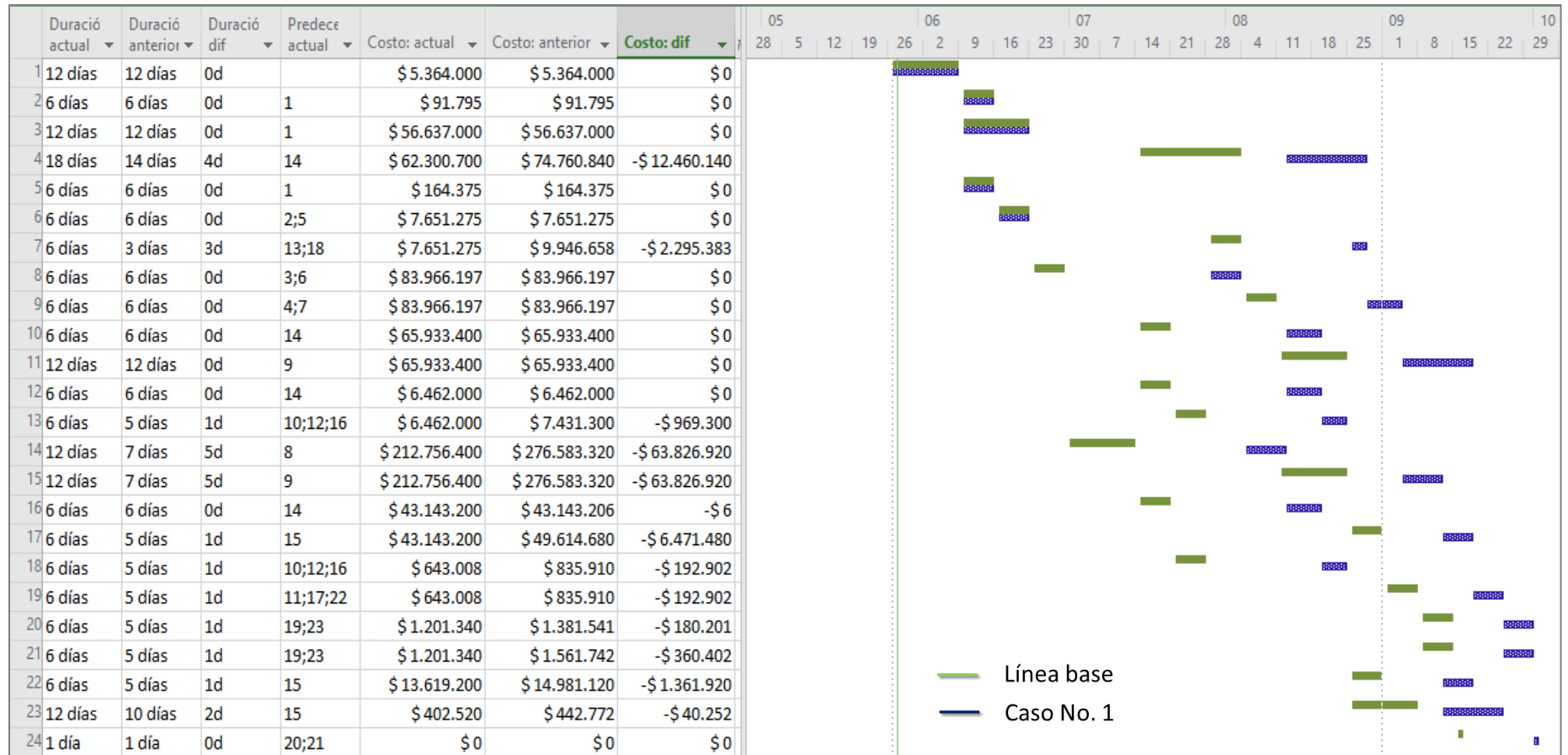
Resultados obtenidos	LÍNEA BASE	CASO # 1	CASO # 2	CASO # 3
Tiempo total del proyecto	96	109	119	126
Costo total del proyecto	\$ 982.093.224	\$ 1.134.270.000	\$ 1.006.618.107	\$ 982.093.224
% Var. Tiempo vs Línea Base	0%	14%	24%	31%
% Var. Costo vs Línea Base	0%	15%	2%	0%

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el caso de estudio y la situación imprevista inducida, se observa que el modelo, según el cronograma inicial, el tiempo óptimo en el cual se minimizan los costos globales del proyecto es noventa y seis (96) días, generando una reducción de 24 días de holgura según lo pactado en la duración estimada en el Acta de Inicio.

Con lo planteado en el caso 1, se logra obtener una reducción en el tiempo de terminación del proyecto de once (11) días, respecto a la duración estimada en el Acta de Inicio. Sin embargo, esta mejora se produce mediante la generación de un sobrecosto por acelerar actividades a tiempos de quiebre, aumentando el presupuesto global del proyecto en un 15%, que equivale a \$ 152.176.776.

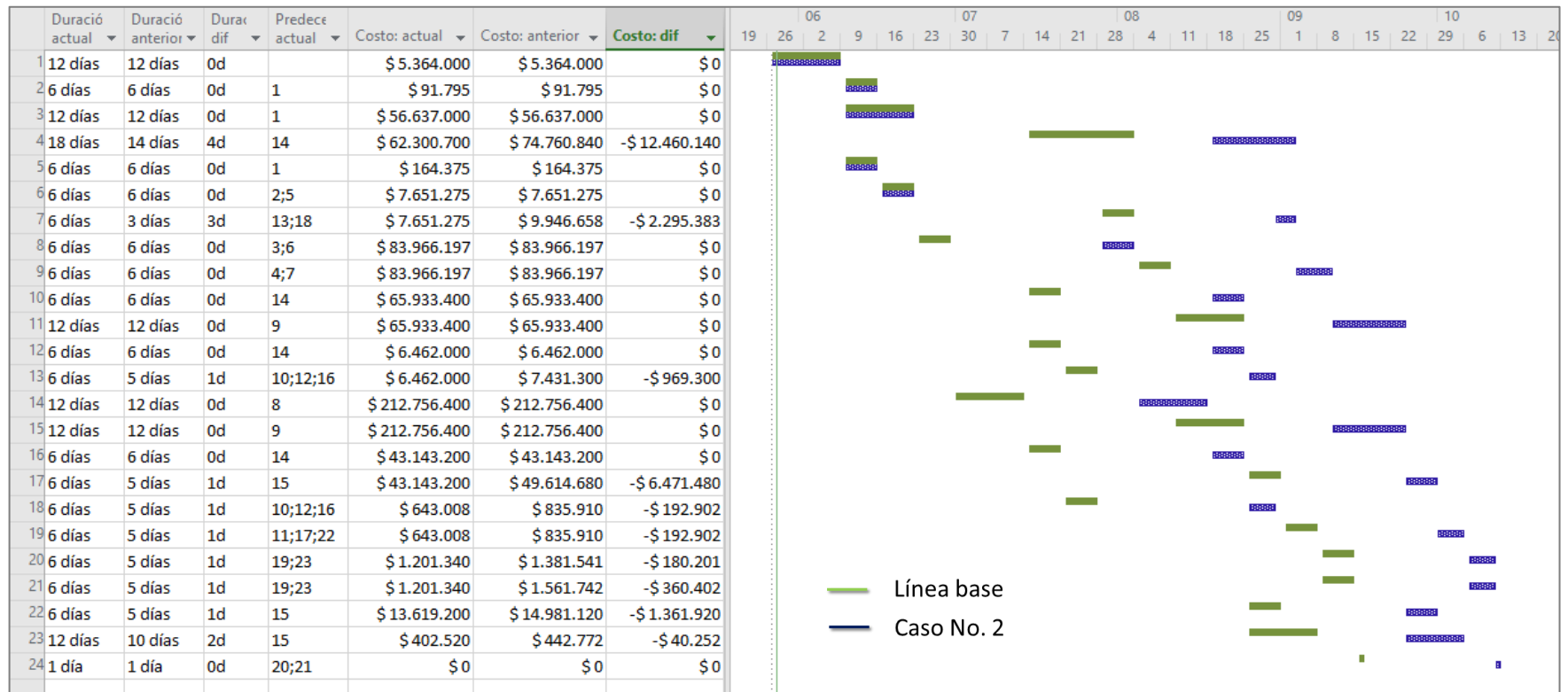
Figura 5 Informe comparativo Caso No. 1 – Diagrama de Gantt



Fuente: Elaboración propia.

En el caso 2, se logra una reducción en el tiempo de terminación del proyecto de un (1) día, respecto a la duración estimada en el Acta de Inicio, acelerando algunas actividades y acarreando un costo mayor de \$ 24.524.883, equivalente a un incremento del 1% respecto al presupuesto definido para la obra. Como se evidencia este caso cumple la restricción relacionada con la duración máxima que podría tener el proyecto, es decir, ciento veinte días.

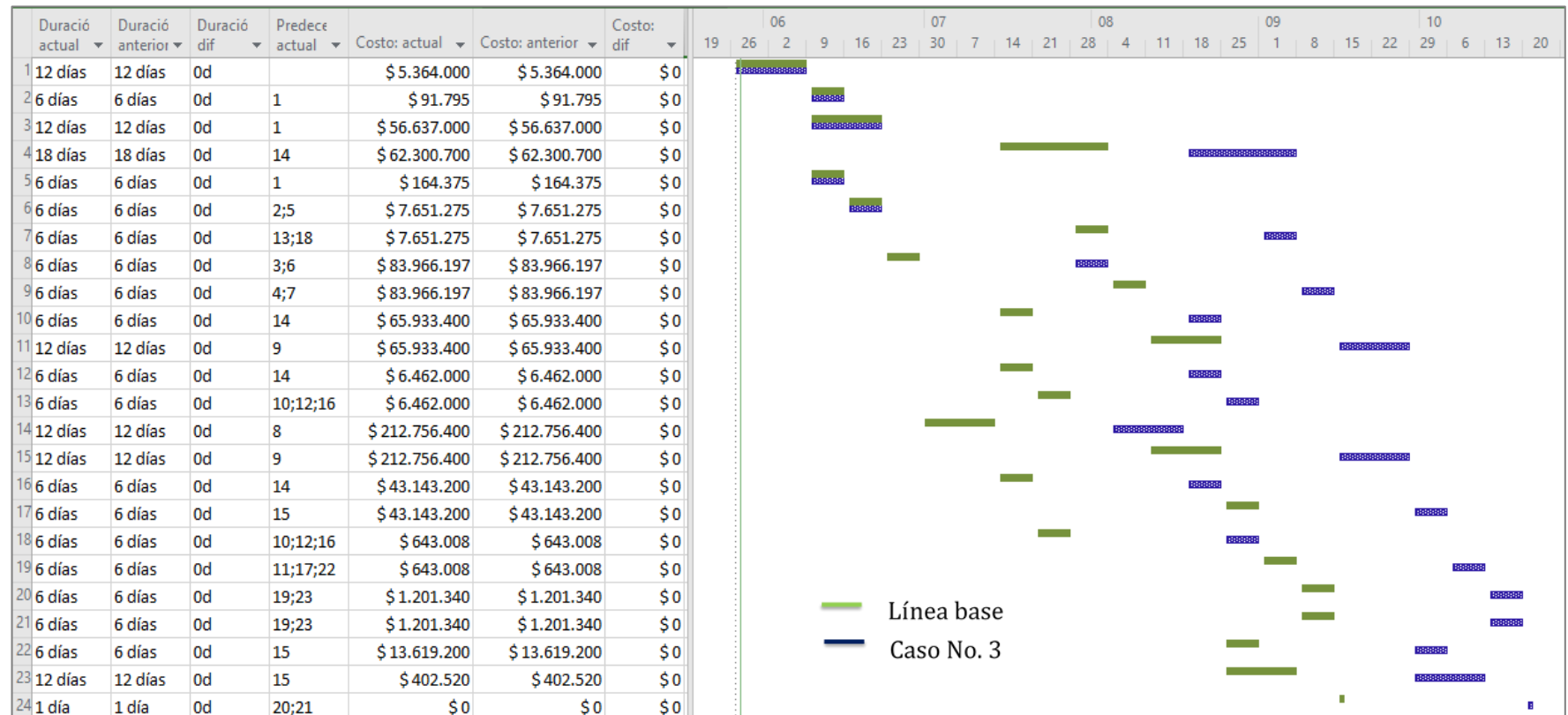
Figura 6 Informe comparativo Caso No. 2 – Diagrama de Gantt



Fuente: Elaboración propia.

En el caso 3, no se realiza ninguna aceleración de actividades pese a la interrupción inducida, traduce este escenario al concepto de Reprogramación parcial mediante la Acción reparadora (Right Shift), desplazando todas las actividades después de la interrupción en un tiempo igual a la duración de ésta. La duración total del proyecto excede 6 días sin generar ningún sobre costo, cumpliendo con la restricción de no superar el presupuesto generado para el proyecto.

Figura 7 Informe comparativo Caso No. 3 – Diagrama de Gantt



Fuente: Elaboración propia

Analizando la información dada la solución que optimiza el costo total y cumple con la duración en el proyecto es el caso 2. Pero, para la toma de decisión en cual reprogramación realizar, el gestor del proyecto deberá decidir si posee los recursos financieros para incrementar el presupuesto o en su defecto asume el imprevisto ampliando la duración pronosticada para el proyecto en seis días.

4.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad proporciona a los tomadores de decisiones un factor importante frente a cambios constantes del entorno por ejemplo una variación de precios (Anderson & Sweeney, 2016)

Para la realización del análisis de sensibilidad se utilizó la programación mediante lenguaje AMPL, bajo el supuesto que para el gestor del proyecto la minimización del tiempo es lo más importante, es decir, la solución dada por el Caso No. 1.

Tras la realización de variaciones se hizo correr nuevamente el modelo lo que arrojó los siguientes resultados:

La solución óptima tendrá un costo de \$1.134.810.000 y una duración de 108 días, debido a que se hace variar en una unidad el tiempo máximo de reducción de la actividad 21.

CONCLUSIONES

Según la caracterización de los métodos de reprogramación reactiva, también es importante tener en cuenta aspectos como el entorno, las estrategias y las políticas de reprogramación. El entorno permite determinar si se modifican las actividades a lo largo del proyecto, si se permite eliminar o agregar nuevas actividades. Las estrategias permiten tener en cuenta la posibilidad de que se presenten nuevos imprevistos a lo largo del proyecto por lo que se puede direccionar el objetivo de la reprogramación en respuesta a nuevos imprevistos. Las políticas establecen la frecuencia con la que se debe revisar el cumplimiento del proyecto según el plan inicial.

A partir de los modelos referentes, se propone un método que permite reprogramar el plan inicial para mantener el resultado global del proyecto en términos de tiempo y costo, mediante el acta de inicio del proyecto, la programación inicial de las actividades y la combinación realizada de los modelos referentes.

De acuerdo con los resultados del caso de estudio, se establece que dependiendo de la relevancia del tiempo y costo global del proyecto se puede modificar el modelo adaptando las ecuaciones que le permitan al modelo cambiar la estructura del plan inicial, ya sea optando por acciones reparadoras de desplazar hacia la derecha o por reducir la duración de las actividades redistribuyendo recursos y asumiendo sobrecostos. Por lo anterior, se concluye que la función objetivo que se utilice en el modelo condiciona el resultado del costo y tiempo del proyecto, además del tipo de medidas para alcanzar dicho resultado.

Futuros trabajos de investigación podrían encaminarse a considerar los siguientes aspectos:

- Contemplar en el modelo matemático los requerimientos de recursos, tales como personal, maquinaria, entre otros.
- Considerar para la ejecución del modelo el cambio de un modelo determinístico a uno estocástico, evaluando riesgos que podrían impactar la duración del proyecto.
- Contar con la asesoría de otros expertos para la determinación de porcentajes correspondientes a costos y tiempos de quiebre.
- El modelo planteado solo se aplicó a un caso de estudio, para validar su funcionalidad, sería necesario aplicarlo a otros proyectos de obra civil.

REFERENCIAS

- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2017). *Estudio económico del Sector de la construcción Obra - Mantenimiento*. Bogotá.
- Anderson, D. R., & Sweeney, D. J. (2016). *Métodos cuantitativos para los negocios* (13.^a ed.). CENGAGE Learning.
- Burgos Marín, M., & Vela Ávila, D. (2015). *Análisis de las causas del incumplimiento de la programación en las obras civiles*. Universidad Militar Nueva Granada. Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/7285/1/BurgosMarinMateo.2015.VelaAvilaDaniel.2015.pdf>
- Demeulemeester, E. L., & Herroelen, W. (2009). *Robust project scheduling*. Now.
- Fang, J., & Xi, Y. (1997). A rolling horizon job shop rescheduling strategy in the dynamic environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13(3), 227-232. <https://doi.org/10.1007/BF01305874>
- Garrido, A., & Carrillo, J. (2013). Programación reactiva en la administración de proyectos: aproximación conceptual y aplicaciones prácticas. *Revista EAN*, 0(74), 72. <https://doi.org/10.21158/01208160.n74.2013.737>
- Gómez, H. D., & Orobio, A. (2015). Effects of uncertainty on scheduling of highway construction projects. *DYNA*, 82, 155-164. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n193.47453>
- Herroelen, W., & Leus, R. (2004). Project scheduling under uncertainty: Survey and research potentials. *European Journal of Operational Research*, 289-306. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.002>
- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*. (McGraw-Hill Interamericana, Ed.). Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=V1hjswEACAAJ&dq=Introducción+a+la+investigación+de+operaciones,+escrito+por+Frederick+S.+Hiller+y+Gerald+J.+Lieberman&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEWiztrK49ZDhAhVHvFkKHRPdA-cQ6AEILDAB>

- Krajewski, L. J., Ritzman, L. P., & González Ruiz, A. C. (2000). *Administración de operaciones: estrategia y análisis*. Pearson Educación. Recuperado de https://books.google.com.co/books/about/Administración_de_operaciones.htm?id=B6LAqCoPSeoC&redir_esc=y
- Kuster, J., Jannach, D., & Friedrich, G. (2010). Applying Local Rescheduling in response to schedule disruptions. *Annals of Operations Research*, 180(1), 265-282. <https://doi.org/10.1007/s10479-008-0488-x>
- Liu, S.-S., & Shih, K.-C. (2009). Construction rescheduling based on a manufacturing rescheduling framework. *Automation in Construction*, 18(6), 715-723. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2009.02.002>
- Lledó, P., & Rivarola, G. (2007). *Gestión de proyectos*. Pearson Educacion. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=23wkQwAACAAJ&dq=gestion+de+proyectos+lledo&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi3vJDkm4rhAhXmw1kKHbLqB68Q6AEIKDAA>
- Lledó, P., & Rivarola, G. (2007). *Gestión de proyectos*. Recuperado 26 de mayo de 2019, de <https://books.google.com.co/books?id=23wkQwAACAAJ&dq=gestion+de+proyectos+pablo+lledo&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwizh6S-w7riAhUlq1kKHQgoAqcQ6AEIKTAA>
- Molina Díaz, C. A., Mora Mora, Y. S., & Rodríguez Cárdenas, L. G. (2010). Causas de los sobrecostos generados en la construcción de las vías del Plan 2500. *Revista N3 Ingenieros Militares Investigación en ingeniería militar y civil*, 3(2145-3144), 31-37. Recuperado de <https://www.esing.mil.co/?idcategoria=387091>
- Núñez Pichardo, W. (2015). *Métodos para la reprogramación de la producción*. Universitat Politecnica de Valencia.
- Pérez Cervantes, J. C. (2004). *Planeación y control de obra del Instituto de Religión Tampico: propuesta de análisis y evaluación de planeación estratégica y riesgo*. Universidad de las Américas Puebla. Recuperado de

- http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/mgc/perez_c_jc/
- Pfeiffer, A., Kádár, B., Csáji, B. C., & Monostori, L. (2007). Simulation supported analysis of a dynamic rescheduling system. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.569.5030&rep=rep1&type=pdf>
- Porras Moya, D. A., & Diaz, J. E. (2015). *La planeación y ejecución de las obras de construcción dentro de las buenas prácticas de la administración y programación (Proyecto Torres de la 26 - Bogotá)*. Recuperado de [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2951/4/LA PLANEACIÓN Y EJECUCIÓN DE LAS OBRAS DE CONSTRUCCIÓN DENTRO DE LAS BUENAS PRÁCTICAS DE LA ADMIN.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2951/4/LA%20PLANEACION%20Y%20EJECUCION%20DE%20LAS%20OBRAS%20DE%20CONSTRUCCION%20DENTRO%20DE%20LAS%20BUENAS%20PRACTICAS%20DE%20LA%20ADMIN.pdf)
- Project Management Institute. (2018). ¿Qué es la Dirección de Proyectos? Recuperado 4 de junio de 2018, de <https://americalatina.pmi.org/latam/AboutUS/QueEsLaDireccionDeProyectos.aspx>
- Project Management Institute. (2019). Línea de base - Conocimiento de gestión de proyectos. Recuperado 3 de marzo de 2019, de <https://project-management-knowledge.com/definitions/b/baseline/>
- Saez, E. (2016). *Los atrasos en las obras de infraestructura de América Latina suponen un 12,9% de sobrecosto - Construcción Pan-Americana*. Recuperado de <http://www.construccion-pa.com/noticias/los-atrasos-en-las-obras-de-infraestructura-de-america-latina-suponen-un-129-de-sobrecosto/>
- Sánchez Silva, E. M. (2013). La infraestructura física en Colombia: deficiencias y principales desafíos. Recuperado 15 de octubre de 2017, de <https://www.razonpublica.com/index.php/econom-y-sociedad-temas-29/6995-la-infraestructura-fisica-en-colombia-deficiencias-y-principales-desafios.html>
- Secretaría de vías e infraestructura. (2017). *Generalidades del proceso y análisis sectorial*. Recuperado de http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:czpSdsHrg4UJ:contratacion.huila.gov.co/up_loads/%3FArchivo%3D20171114154413.pdf+&cd=8&

hl=es&ct=clnk&gl=co

Sistema electrónico de contratación pública. (2015). Detalle del proceso: 4151.LP.04.2015. Recuperado 27 de noviembre de 2018, de <https://www.contratos.gov.co/consultas/detalleProceso.do?numConstancia=15-1-137796>

Universidad EAFIT. (s. f.). *Proyectos-Licitaciones ¿Qué es una licitación?* Recuperado de <http://www.trabajo.gov.ar/left/licitaciones/index.htm>

Vieira, G. E., Herrmann, J. W., & Lin, E. (2003). Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies, Policies, and Methods. *Journal of Scheduling*, 6(1), 39-62. <https://doi.org/10.1023/A:1022235519958>

Vlk, M., & Barták, R. (2015). Replanning in Predictive-reactive Scheduling. Recuperado de [https://www.cs.bgu.ac.il/~icaps15/dc/6.Replanning in Predictive-reactive Scheduling.pdf](https://www.cs.bgu.ac.il/~icaps15/dc/6.Replanning%20in%20Predictive-reactive%20Scheduling.pdf)

ANEXOS

Anexo 1. Modelo matemático en AMPL Caso 1

MODELO MATEMÁTICO 1

#Comandos empleados para el análisis de sensibilidad
solve;
display _varname, _var, X.rc, X.slack, X.ub, X.lb

CONJUNTOS

set actividades;
conjunto de actividades con índice i

set pares within {actividades, actividades};
Conjuntos de precedencias de actividades i,s

set m within {actividades};
#conjunto de actividades finalizadas que se activa para
#los casos 1, 2 y 3

PARÁMETROS

param D{i in actividades};
Duración normal de la actividad i (días)

param R{i in actividades};
Reducción máxima de tiempo de la actividad i (días)

param CR{i in actividades};
Sobrecosto de la reducción diaria de la actividad i (\$/día)

param CN{i in actividades};
Costo normal diario de la actividad i (\$/día)

param IDC;
Costo indirecto diario del proyecto (\$/días)

VARIABLES DE DECISIÓN

var X{i in actividades}>=0;
Cantidad de días a reducir la actividad i (días)

var Y{i in actividades}>=0;
Tiempo de inicio de la actividad i (días)

var costo;

Variable auxiliar que se activa en el caso 1 para calcular
el costo del proyecto

FUNCIÓN OBJETIVO

minimize CTP:

sum{i in actividades}
(Y[24]+D[24]);
función objetivo auxiliar que se activa en el caso 1 (días)

RESTRICCIONES

subject to R1{(i,s) in pares}: (Y[s]-Y[i]) >= D[i]-X[i];
Relación de precedencia (días)

subject to R2 {i in actividades}: X[i] <= R[i];
Cantidad máxima de días a reducir la actividad i

subject to R3: Y[1] = 0;
Inicio del proyecto en tiempo 0

subject to R5{i in m}: X[i] = 0;
Restricción de reducción en tiempo para actividades finalizadas

subject to R6: costo = sum{i in actividades} (CR[i]*X[i]+D[i]*CN[i])+(Y[24]+D[24])*(IDC);
Restricción auxiliar para calcular el costo en caso 1

subject to R8: Y[14] = 60;
Restricción auxiliar para simular retraso de 30 días

subject to R9: Y[8] = 24;
Restricción auxiliar para fijar la actividad 8, todos los casos

data; ##### DATA STARTS HERE #####

DATOS

#CONJUNTOS

set actividades:= 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
17 18 19 20 21 22 23 24 ;

conjunto de actividades con índice i

set m:= 1 2 3 5 6 8 ;
#conjunto de actividades finalizadas que se activa para
#los casos 1, 2 y 3

set pares :=(1,3),(1,2),(1,5),(2,6),(5,6),(3,8),(6,8),
 (8,14),(14,4),(14,10),(14,12),(14,16),(10,13),(12,13),
 (16,13),(10,18),(12,18),(16,18),(13,7),(18,7),(4,9),(7,9),
 (9,15),(15,23),(15,22),(15,17),(9,11), (22,19),(17,19),
 (11,19),(19,20),(19,21),(23,20),(23,21),(20,24),(21,24);

Conjuntos de precedencias de actividades i,s

PARÁMETROS

Duración normal de la actividad i (días)

param D:=

1	12	2	6	3	12	4	18	
5	6	6	6	7	6	8	6	
9	6	10	6	11	12	12	6	
13	6	14	12	15	12	16	6	
17	6	18	6	19	6	20	6	
21	6	22	6	23	12	24	1	;

Reducción máxima de tiempo de la actividad i (días)

param R:=

1	4	2	2	3	6	4	6	
5	2	6	3	7	3	8	0	
9	0	10	0	11	0	12	3	
13	2	14	5	15	5	16	2	
17	2	18	1	19	1	20	2	
21	1	22	3	23	6	24	0	;

Sobrecosto de la reducción diaria de la actividad i (\$/día)

param CR:=

1	402300	2	13769	3	2831750	4	3115035	
5	24656	6	765128	7	765128	8	0	
9	0	10	0	11	0	12	646200	
13	969300	14	12765384	15	12765384	16	6471480	
17	6471480	18	192902	19	192902	20	180201	
21	360402	22	1361920	23	20126	24	0	;

Costo normal diario de la actividad i (\$/día)

param CN:=

1	447000	2	15299	3	4719750	4	3461150	
5	27396	6	1275213	7	1275213	8	13994366	
9	13994366	10	10988900	11	5494450	12	1077000	
13	1077000	14	17729700	15	17729700	16	7190533	
17	7190533	18	107168	19	107168	20	200223	
21	200223	22	2269867	23	33543	24	0	;

Costo indirecto diario del proyecto (\$/días)

param IDC:= 0;

Anexo 2. Modelo matemático en AMPL Caso 2

MODELO MATEMÁTICO 2

#Comandos empleados para el análisis de sensibilidad
solve;
display _varname, _var, X.rc, X.slack, X.ub, X.lb

CONJUNTOS

set actividades;
conjunto de actividades con índice i

set pares within {actividades, actividades};
Conjuntos de precedencias de actividades i,s

set m within {actividades};
#conjunto de actividades finalizadas que se activa para
#los casos 1, 2 y 3

PARÁMETROS

param D{i in actividades};
Duración normal de la actividad i (días)

param R{i in actividades};
Reducción máxima de tiempo de la actividad i (días)

param CR{i in actividades};
Sobrecosto de la reducción diaria de la actividad i (\$/día)

param CN{i in actividades};
Costo normal diario de la actividad i (\$/día)

param IDC;
Costo indirecto diario del proyecto (\$/días)

VARIABLES DE DECISIÓN

var X{i in actividades}>=0;
Cantidad de días a reducir la actividad i (días)

var Y{i in actividades}>=0;
Tiempo de inicio de la actividad i (días)

var costo;
Variable auxiliar que se activa en el caso 1 para calcular

el costo del proyecto

FUNCIÓN OBJETIVO

minimize CTP:

sum{i in actividades} (CR[i]*X[i]+D[i]*CN[i])+(Y[24]+D[24])*(IDC);
Costo directos del proyecto + Costos indirectos del proyecto (\$)

RESTRICCIONES

subject to R1{(i,s) in pares}: (Y[s]-Y[i]) >= D[i]-X[i];
Relación de precedencia (días)

subject to R2 {i in actividades}: X[i] <= R[i];
Cantidad máxima de días a reducir la actividad i

subject to R3: Y[1] = 0;
Inicio del proyecto en tiempo 0

subject to R4: (Y[24]+D[24]) <= 120;
restricción de tiempo de terminación del proyecto que se activa
en el caso 2

subject to R5{i in m}: X[i] = 0;
Restricción de reducción en tiempo para actividades finalizadas

subject to R8: Y[14] = 60;
Restricción auxiliar para simular retraso de 10 días

subject to R9: Y[8] = 24;
Restricción auxiliar para fijar la actividad 8, todos los casos

data; ##### DATA STARTS HERE #####

DATOS

#CONJUNTOS

set actividades:= 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
17 18 19 20 21 22 23 24 ;

conjunto de actividades con índice i

set m:= 1 2 3 5 6 8 ;
#conjunto de actividades finalizadas que se activa para
#los casos 1, 2 y 3

set pares :=(1,3),(1,2),(1,5),(2,6),(5,6),(3,8),(6,8),
(8,14),(14,4),(14,10),(14,12),(14,16),(10,13),(12,13),
(16,13),(10,18),(12,18),(16,18),(13,7),(18,7),(4,9),(7,9),
(9,15),(15,23),(15,22),(15,17),(9,11), (22,19),(17,19),

(11,19),(19,20),(19,21),(23,20),(23,21),(20,24),(21,24);
 # Conjuntos de precedencias de actividades i,s

PARÁMETROS

Duración normal de la actividad i (días)

param D:=

1	12	2	6	3	12	4	18	
5	6	6	6	7	6	8	6	
9	6	10	6	11	12	12	6	
13	6	14	12	15	12	16	6	
17	6	18	6	19	6	20	6	
21	6	22	6	23	12	24	1	;

Reducción máxima de tiempo de la actividad i (días)

param R:=

1	4	2	2	3	6	4	6	
5	2	6	3	7	3	8	0	
9	0	10	0	11	0	12	3	
13	2	14	5	15	5	16	2	
17	2	18	1	19	1	20	2	
21	1	22	3	23	6	24	0	;

Sobrecosto de la reducción diaria de la actividad i (\$/día)

param CR:=

1	402300	2	13769	3	2831750	4	3115035	
5	24656	6	765128	7	765128	8	0	
9	0	10	0	11	0	12	646200	
13	969300	14	12765384	15	12765384	16	6471480	
17	6471480	18	192902	19	192902	20	180201	
21	360402	22	1361920	23	20126	24	0	;

Costo normal diario de la actividad i (\$/día)

param CN:=

1	447000	2	15299	3	4719750	4	3461150	
5	27396	6	1275213	7	1275213	8	13994366	
9	13994366	10	10988900	11	5494450	12	1077000	
13	1077000	14	17729700	15	17729700	16	7190533	
17	7190533	18	107168	19	107168	20	200223	
21	200223	22	2269867	23	33543	24	0	;

Costo indirecto diario del proyecto (\$/días)

param IDC:= 0;

Anexo 3. Modelo matemático en AMPL Caso 3

MODELO MATEMÁTICO 3

```
#Comandos empleados para el análisis de sensibilidad  
solve;  
display _varname, _var, X.rc, X.slack, X.ub, X.lb
```

CONJUNTOS

```
set actividades;  
# conjunto de actividades con índice i  
  
set pares within {actividades, actividades};  
# Conjuntos de precedencias de actividades i,s  
  
set m within {actividades};  
#conjunto de actividades finalizadas que se activa para  
#los casos 1, 2 y 3
```

PARÁMETROS

```
param D{i in actividades};  
# Duración normal de la actividad i (días)  
  
param R{i in actividades};  
# Reducción máxima de tiempo de la actividad i (días)  
  
param CR{i in actividades};  
# Sobrecosto de la reducción diaria de la actividad i ($/día)  
  
param CN{i in actividades};  
# Costo normal diario de la actividad i ($/día)  
  
param IDC;  
# Costo indirecto diario del proyecto ($/días)
```

VARIABLES DE DECISIÓN

```
var X{i in actividades}>=0;  
# Cantidad de días a reducir la actividad i (días)  
  
var Y{i in actividades}>=0;  
# Tiempo de inicio de la actividad i (días)  
  
var costo;  
# Variable auxiliar que se activa en el caso 1 para calcular  
# el costo del proyecto
```

FUNCIÓN OBJETIVO

minimize CTP:

sum{i in actividades} (CR[i]*X[i]+D[i]*CN[i])+(Y[24]+D[24])*(IDC);
Costo directos del proyecto + Costos indirectos del proyecto (\$)

RESTRICCIONES

subject to R1{(i,s) in pares}: (Y[s]-Y[i]) >= D[i]-X[i];
Relación de precedencia (días)

subject to R2 {i in actividades}: X[i] <= R[i];
Cantidad máxima de días a reducir la actividad i

subject to R3: Y[1] = 0;
Inicio del proyecto en tiempo 0

subject to R5{i in m}: X[i] = 0;
Restricción de reducción en tiempo para actividades finalizadas

subject to R7:
sum{i in actividades} (CR[i]*X[i]+D[i]*CN[i])+(Y[24]+D[24])*(IDC) <= 982093229;
restricción auxiliar para restringir el presupuesto en caso 3

subject to R8: Y[14] = 60;
Restricción auxiliar para simular retraso de 10 días

subject to R9: Y[8] = 24;
Restricción auxiliar para fijar la actividad 8, todos los casos

data; ##### DATA STARTS HERE #####

DATOS

#CONJUNTOS

set actividades:= 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16
17 18 19 20 21 22 23 24 ;
conjunto de actividades con índice i

set m:= 1 2 3 5 6 8 ;
#conjunto de actividades finalizadas que se activa para
#los casos 1, 2 y 3

set pares :=(1,3),(1,2),(1,5),(2,6),(5,6),(3,8),(6,8),
 (8,14),(14,4),(14,10),(14,12),(14,16),(10,13),(12,13),
 (16,13),(10,18),(12,18),(16,18),(13,7),(18,7),(4,9),(7,9),
 (9,15),(15,23),(15,22),(15,17),(9,11), (22,19),(17,19),
 (11,19),(19,20),(19,21),(23,20),(23,21),(20,24),(21,24);
 # Conjuntos de precedencias de actividades i,s

PARÁMETROS

Duración normal de la actividad i (días)

param D:=

1	12	2	6	3	12	4	18	
5	6	6	6	7	6	8	6	
9	6	10	6	11	12	12	6	
13	6	14	12	15	12	16	6	
17	6	18	6	19	6	20	6	
21	6	22	6	23	12	24	1	;

Reducción máxima de tiempo de la actividad i (días)

param R:=

1	4	2	2	3	6	4	6	
5	2	6	3	7	3	8	0	
9	0	10	0	11	0	12	3	
13	2	14	5	15	5	16	2	
17	2	18	1	19	1	20	2	
21	1	22	3	23	6	24	0	;

Sobrecosto de la reducción diaria de la actividad i (\$/día)

param CR:=

1	402300	2	13769	3	2831750	4	3115035	
5	24656	6	765128	7	765128	8	0	
9	0	10	0	11	0	12	646200	
13	969300	14	12765384	15	12765384	16	6471480	
17	6471480	18	192902	19	192902	20	180201	
21	360402	22	1361920	23	20126	24	0	;

Costo normal diario de la actividad i (\$/día)

param CN:=

1	447000	2	15299	3	4719750	4	3461150	
5	27396	6	1275213	7	1275213	8	13994366	
9	13994366	10	10988900	11	5494450	12	1077000	
13	1077000	14	17729700	15	17729700	16	7190533	
17	7190533	18	107168	19	107168	20	200223	
21	200223	22	2269867	23	33543	24	0	;

Costo indirecto diario del proyecto (\$/días)

param IDC:= 0;