

**DISEÑO DE MODELO PARA LA MINIMIZACIÓN DE COSTOS
GENERADOS POR LA ACELERACIÓN DE UN PROYECTO
PERTENECIENTE AL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN EN EL VALLE
DEL CAUCA**

**DANIELA ALEJANDRA ALVARADO SANABRIA
ANGIE DANIELA PEREA RIOS**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA
2020**

**DISEÑO DE MODELO PARA LA MINIMIZACIÓN DE COSTOS
GENERADOS POR LA ACELERACIÓN DE UN PROYECTO
PERTENECIENTE AL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN EN EL VALLE
DEL CAUCA**

**DANIELA ALEJANDRA ALVARADO SANABRIA
ANGIE DANIELA PEREA RIOS**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniera Industrial

Director: Álvaro Julio Cuadros López

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GUADALAJARA DE BUGA
2020**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	6
1 INTRODUCCIÓN	8
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.2 OBJETIVOS	11
1.2.1 Objetivo general.....	11
1.2.2 Objetivos específicos	11
1.3 ANTECEDENTES	11
2 MÉTODOS DE SOLUCIÓN EXACTA UTILIZADOS PARA LA ACELERACIÓN DE ACTIVIDADES EN UN PROYECTO.....	13
2.1 CARACTERIZACIÓN DE MÉTODOS DE SOLUCIÓN EXACTA.....	16
2.1.1 Programación lineal	16
2.1.2 Programación entera	17
2.1.3 Branch and bound – algoritmo de ramificación y acotamiento	18
2.1.4 Programación dinámica.....	20
2.1.5 Programación no lineal	21
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MÉTODOS DE SOLUCIÓN EXACTA DE ACUERDO AL ENFOQUE DEL PROBLEMA.....	22
3 FORMULACIÓN DEL MODELO PARA LA ACELERACIÓN DE ACTIVIDADES ...	23
4 APLICACIÓN DEL MODELO A UN CASO DE ESTUDIO DEL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN	30
4.1 INTRODUCCIÓN AL CASO DE ESTUDIO	30
4.2 DESARROLLO DEL MODELO PROPUESTO.....	31
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
4.3.1 Análisis de sensibilidad.....	46
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
6 ANEXOS	51
BIBLIOGRAFÍA	67

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Características generales de los métodos de solución exacta	22
Tabla 2. Escala de probabilidad	25
Tabla 3. Escala de impacto.....	26
Tabla 4. Matriz probabilidad por impacto.....	26
Tabla 5. Costo de las actividades del proyecto.	33
Tabla 6. Actividades predecesoras	34
Tabla 7. Cálculo de la pendiente de costo para las actividades críticas.....	38
Tabla 8. Riesgos de calidad al acelerar las actividades críticas.	40
Tabla 9. Cálculo del puntaje de riesgo de incumplimiento ($P \times I$).....	41
Tabla 10. Priorización de los riesgos	41
Tabla 11. Costo potencial de pérdida de calidad (PQLC).....	42
Tabla 12. Resultados obtenidos de la aplicación del modelo propuesto.....	46
Tabla 13. Recopilación de datos después de variar el parametro dp	47

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Clasificación del problema de equilibrio Tiempo - Recursos o Tiempo - Costo	14
Ilustración 2. Formulaciones y métodos de solución	15
Ilustración 3. Diagrama de flujo de solución del algoritmo Branch and Bound	20
Ilustración 4. Puente en Tuluá ubicado en la calle 28 entre Cra. 28 y Cra. 30.....	31
Ilustración 5. Puente en Tuluá ubicado en la calle 28 entre Cra. 28 y Cra. 30 – vista superior	31
Ilustración 6. Costo adicional por acelerar el proyecto	48

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo de la pendiente de costo	25
Ecuación 2. Cálculo del puntaje de riesgo de incumplimiento	26
Ecuación 3. Función objetivo del modelo matemático de minimización de costos generados por la reducción de tiempo.	28
Ecuación 4. Reducción máxima de tiempo en las actividades.....	29
Ecuación 5. Tiempo de inicio de las actividades	29
Ecuación 6. Duración del proyecto	29
Ecuación 7. Cantidad máxima de actividades a acelerar.	29
Ecuación 8. Restricción de no negatividad.	29

LISTADOS DE ANEXOS

Anexo 1. Relación de los costos de mano de obra utilizada en las actividades del proyecto	51
--	----

Anexo 2. Relación de los costos de maquinaria y equipos utilizados en las actividades del proyecto.....	54
Anexo 3. Cronograma inicial de actividades e identificación de Actividades criticas...	59
Anexo 4 Actividades Críticas	60
Anexo 5. Formulación modelo matemático.....	61
Anexo 6. Resultados arrojados por el programa AMPL de las variables X y Y.	65
Anexo 7. Resultados arrojados por el programa AMPL de las variables yf, w y costos	65
Anexo 8. Cronograma de actividades con duración de 270 días del proyecto.	66

RESUMEN

Acercar las actividades que componen un proyecto es una manera de disminuir sus tiempos de finalización cuando se presentan retrasos durante la ejecución del proyecto o cuando la fecha de terminación programada por el contratista en la fase de planificación no es aceptable para el cliente.

La aceleración o "crashing" de las actividades consiste en la adición de recursos con el fin de que éstas se completen de manera más rápida, lo que genera un aumento de los costos estimados inicialmente. Esta disyuntiva es conocida como el problema de compensación entre el tiempo de finalización y el costo del proyecto o "TCTP".

A su vez, con el paso del tiempo se hizo evidente que el acortamiento de la duración de las actividades del proyecto disminuye su calidad y por ello, se hace necesario considerar esta variable para abordar problemas de compensación de forma práctica y real.

En el presente trabajo se aborda el TCTP teniendo en cuenta el Costo potencial por pérdida de calidad "PQLC" que hace referencia al costo directo asociado a retrabajos o modificaciones para conseguir que la actividad cumpla con los requerimientos de calidad al ser acelerada. Para ello, se propone una metodología que incluye un modelo de programación lineal entera mixta y posteriormente es validada por medio de su aplicación a un proyecto de construcción de un puente ubicado en el departamento del Valle del Cauca (Colombia).

Palabras clave: aceleración, Calidad, programación del proyecto, tiempo, costo, programación lineal

SUMMARY

Crashing project activities is a way to decrease its completion times when there are delays during the execution of the project or when the completion date scheduled by the contractor in the planning phase is not acceptable to the client.

The acceleration or "crashing" of the activities consists of adding resources in order to these activities can be completed more quickly, and this generates an increase in the initially estimated costs. This trade-off is known as time cost trade off problem or "TCTP".

In turn, with the passage of time it became evident that the shortening of the duration of the project activities decreases its quality and, therefore, it is necessary to consider this variable to tackle compensation problems in a practical and real way.

In this work, the TCTP is addressed taking into account the Potential Quality Loss Cost "PQLC", which refers to the direct cost associated with reworks or modifications to ensure that the activity meets the quality requirements when is accelerated. To do this, a

methodology is proposed, this includes a mixed integer linear programming model and is subsequently validated through its application to a bridge construction project located in the department of Valle del Cauca (Colombia).

Keywords: Crashing, Quality, project scheduling, time, cost, linear programming

1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de la gestión de proyectos es garantizar que estos se terminen en el tiempo programado, dentro del presupuesto y con el nivel de desempeño planeado, manteniendo una buena relación con los clientes (Kerzner, 2013). Sin embargo, problemas como un clima adverso, fallas de diseño, problemas con contratistas, entre otros, hacen que los proyectos de construcción experimenten demoras durante su ejecución.

En este sentido, realizar la aceleración del proyecto garantiza su entrega en la fecha prevista o incluso antes de la fecha estipulada por el cliente. Para ello, algunas de las actividades del proyecto pueden completarse más rápido de lo normal ya sea gastando menos tiempo en ellas o más dinero para cubrir los gastos de los recursos adicionales que se les asignan. Por lo tanto, acelerar un proyecto aumenta su costo.

En respuesta a ello, los planificadores de proyectos apuntan a reducir la duración de las actividades que conforman el proyecto y a su vez tratan de minimizar los costos adicionales generados por estas. En la gestión de proyectos esta disyuntiva es conocida como el problema de compensación entre el tiempo de finalización y el costo del proyecto o “TCTP” (*Time-cost trade off problem*). Así mismo, una técnica empleada para conseguir las reducciones planteadas por el TCTP, es el “crashing” o choque de la duración de las actividades, que implica una asignación extra de recursos como materiales, mano de obra y equipos.

Desde finales del siglo XX, los problemas de compensación incluyen otros aspectos además del tiempo y el costo. Babu & Suresh (1996) sugirieron que la calidad del proyecto podría verse afectada por la aceleración de las actividades del proyecto. En situaciones reales, aunque la calidad general del proyecto cumpla con los objetivos globales, si alguna de las actividades individuales del proyecto no cumple con los requisitos del contratista del mismo, puede ser necesario realizar modificaciones y reprocesos, y estos están asociadas con demoras de tiempo y costos excesivos. Es por esto que el costo potencial de pérdida de calidad PQLC (*Potential Quality Loss Cost*) debe ser considerado al bloquear las actividades del proyecto para desarrollar cronogramas prácticos y rentables.

En este trabajo se resolverá el problema del TCTP teniendo en cuenta el costo potencial de pérdida de calidad (PQLC). Las autoras plantean un modelo que busca la minimización de los costos generados por la aceleración de un proyecto perteneciente al sector de la construcción en el Valle del Cauca.

La metodología para la realización de este trabajo se compone inicialmente de la caracterización de los métodos de solución exacta utilizados para la aceleración de actividades de un proyecto mediante la revisión bibliográfica, posteriormente, se formula un modelo mediante el cual se va a realizar la aceleración. Seguidamente, se caracteriza el proyecto caso de estudio y, por último, se valida la utilidad del modelo propuesto por medio de su aplicación a este caso de estudio.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Tradicionalmente, el rendimiento de los proyectos se ha visto como una función que depende del tiempo, del costo y de la calidad (Pillai, Joshi, & Rao, 2002) (Wi & Jung, 2010). En este sentido el PMI ha reportado un notorio descenso en el logro de los objetivos y cumplimiento del presupuesto de los proyectos desde los años 2012 hasta 2016, que dan muestra de la decadencia del desempeño de los mismos, generada en gran magnitud por la poca utilización de la gestión de proyectos (“Project Management Institute,” 2017).

Como muestra de los problemas que presenta el sector de la construcción en el panorama internacional, cabe resaltar el proyecto ferroviario de alta velocidad de California, que podría ser cancelado debido a que, según información publicada el 1 de octubre de 2018, se estima que el periodo de finalización de las obras pasará del 2029 al 2033 a causa de retrasos en la adquisición de tierras, cambios de ruta, órdenes de cambio, la posibilidad de hacer túneles a través de las cadenas montañosas para llegar al sur de California, problemas de diseño, entre otros (Global Construction Review, 2018).

Así mismo, en América Latina, los retrasos y sobrecostos impactaron para el año 2016 a 75% de los proyectos hidroeléctricos, debido a que de un total de 91 proyectos eléctricos, 40 estaban retrasados y 30 excedieron el presupuesto original. En estas obras, los factores que más inciden en las demoras son los cambios en el diseño, el mal manejo financiero y la oposición de la comunidad (Bnamericas, 2016).

En el ámbito nacional, de acuerdo con la cámara colombiana de la construcción CAMACOL, la actividad de la construcción se divide en edificaciones y obras civiles. Este sector ha sido uno de los de mayor crecimiento en la economía, logrando ser una industria dinámica y superior a otros sectores importantes del país (ProColombia, 2016). Sin embargo, el panorama no es muy diferente al observado a nivel mundial, como muestra de ello se evidencia que para el año 2016 se reportaron 83 construcciones entre las que se destacan complejos deportivos, proyectos para acueductos y obras de infraestructura vial, que durante años han estado sumidas en retrasos e irregularidades por falta de planeación, corrupción o abandono y han puesto en riesgo 1,3 billones de pesos del presupuesto de la nación (El Tiempo, 2016).

Del mismo modo, para el año 2017 diez concesiones viales de cuarta generación (4G), que en total sumaban 1300 kilómetros de trabajos a lo largo de todo el país se encontraban frenadas por retrasos en inicio de obras debido a falta de licencias ambientales, consultas previas por definir, convocar y realizar y hallazgos arqueológicos (Portafolio, 2017).

De acuerdo con García (2009), en la industria de la construcción se producen deficiencias variadas que se traducen en gasto excesivo de recursos y limitada competitividad, entre ellas se encuentran:

- Curva de aprendizaje limitada y poca capacitación.

- Influencia de las condiciones climáticas.
- Fragmentación del proyecto e incentivos negativos.
- Relaciones opuestas entre quienes intervienen los proyectos.
- Deficiente planificación o ausencia de la misma.
- Actividad basada en la experiencia limitando la apropiación de nuevos conocimientos.
- Prevalencia de métodos productivos tradicionales inhibiendo la posibilidad de investigación y desarrollo.

Los problemas mencionados ocasionan demoras importantes a la mitad del proyecto, y, para ponerse al día en el cronograma Gray & Larson (2009) proponen reducir el tiempo en algunas de las actividades críticas, donde los costos adicionales derivados de la actualización en el programa deben ser comparados con las consecuencias de estar retrasado. Esto es de especial importancia cuando el cumplimiento del tiempo de finalización establecido es una prioridad.

Los proyectos están compuestos por un grupo de procesos. Borja & Puertas (2012) clasifican estos en iniciación, planificación, ejecución, seguimiento, control y proceso de cierre. La planificación se encarga de gestionar el alcance del proyecto, el tiempo, los costos, la calidad, los recursos humanos, las comunicaciones, los riesgos y las adquisiciones que serán necesarios para la ejecución del proyecto (Institute Project Management, 2013). Sin embargo, a pesar del arduo trabajo en el proceso de planificación, CAMACOL (2015) plantea que, los diversos problemas expuestos, entre otros tantos, conllevan a que 98% de los proyectos de construcción incurran en costos adicionales o excedan su cronograma adicional en la fase de ejecución.

Ahora bien, en el caso puntual de los proyectos de construcción, Monghasemi et al., (2015) sostienen que estos son complicados, dado que los tomadores de decisiones se encuentran frente a múltiples posibles alternativas que deben reducir para llegar a la mejor solución, lo que representa un compromiso entre varios objetivos que a menudo puede ser conflictivos.

Los elementos mencionados evidencian que realizar aceleraciones de proyecto es una necesidad frecuente en el sector de la construcción, a partir de allí surge la siguiente pregunta:

¿Cómo diseñar un modelo que permita la minimización de los costos generados por la aceleración de un proyecto perteneciente al sector de la construcción?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Diseñar un modelo que permita la minimización de los costos generados por la aceleración de un proyecto perteneciente al sector de la construcción en el Valle del Cauca.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los métodos de solución exacta utilizados para la aceleración de actividades de un proyecto mediante revisión bibliográfica
- Formular un modelo para la aceleración de un proyecto del sector de la construcción
- Validar el modelo por medio de su aplicación en un caso de estudio

1.3 ANTECEDENTES

El problema de compensación de tiempo costo se introdujo a finales de la década de 1950 después del origen del método clásico de la ruta crítica (CPM) (Mohammadipour & Sadjadi, 2016). Este problema se concentró principalmente en acortar la duración general del proyecto al reducir el tiempo requerido para completar las actividades individuales (Kim, Kang, & Hwang, 2012). En este orden de ideas, los investigadores han desarrollado diferentes modelos y han aplicado muchos métodos para optimizar el problema de la compensación tiempo - costo en proyectos pertenecientes a diversos sectores.

Ejemplo de ello es el artículo *Scheduling Project Crashing Time Using Linear Programming Approach: Case Study*. En este, los autores Karmaker y Halder (2017) proponen un modelo para encontrar una compensación adecuada entre tiempo y costo para acelerar el proceso de ejecución de un proyecto de construcción. El método de la ruta crítica (CPM) es usado para determinar la duración y el costo más largos necesarios para completar el proyecto. Posteriormente el problema de compensación de tiempo-costo (TCTP) se formula como un modelo de programación lineal. Para determinar la solución del modelo se utiliza el programa LINDO y para implementar el modelo propuesto, se recopilaron los datos necesarios a través de entrevistas y discusiones directas con los gerentes de proyecto caso de estudio. El análisis revela que a través de una programación adecuada de todas las actividades, el proyecto puede completarse dentro de los 120 días a partir de una duración inicial de 140 días. La reducción de la

duración del proyecto en un 17% se logra al aumentar el costo en un 3.73%, lo cual es satisfactorio.

Con el paso del tiempo, expertos han afirmado que considerar sólo las variables de costo y tiempo no es suficiente para tener un acercamiento a la realidad de los proyectos y poder modelarlos de manera exitosa. Se hizo evidente que el acortamiento de la duración de las actividades disminuye su calidad y, en consecuencia, la calidad del proyecto, existiendo una relación de compromiso entre tiempo, costo y calidad que dio origen al TCQTP (Time Cost Quality Trade off Problem) (Orm & Jeunet, 2018).

Como respuesta a ello, en el artículo *Time Cost Quality Trade-off Problems: A survey exploring the assessment of quality*, los autores Orm & Jeunet, (2018) definen e identifican el impacto de la calidad en la aceleración de proyectos, además proporcionan una clasificación de TCQTP (Time Cost Quality Trade-off Problem) basada en supuestos de modelado y métodos de solución y categorizan los artículos que han contribuido en el tema de programación de proyectos teniendo en cuenta el tiempo, el costo y la calidad.

De acuerdo con Lin, Qian, Cui & Miao (2010) los problemas de calidad implicados por la aceleración se resuelven utilizando la revisión para corregir los defectos de diseño resultantes. Por lo tanto, para dichos proyectos, la calidad se tiene en cuenta implícitamente con la repetición. Esta forma de abordar la calidad se contempla en las siguientes dos referencias.

La primera de ellas es el artículo *A New Model for Solving Time-Cost-Quality Trade-Off Problems in Construction*. En este, sus autores Fu & Zhang (2016) desarrollan un modelo de programación no lineal basado en el problema de programación de proyectos multimodo con restricción de recursos.

Una mala calidad afecta negativamente la duración de los proyectos y sus costos totales, sin embargo, los autores afirman que esta calidad puede recuperarse mediante trabajos de reparación durante la construcción. El objetivo de este estudio es reducir la duración del proyecto a un bajo costo y a su vez minimizar el costo total de calidad que incluye el costo de prevención y el costo de la reparación de la falla. Es decir, encontrar un punto de equilibrio entre los costos, la calidad y el tiempo del proyecto, que sea adecuado para el tomador de decisiones.

Para resolverlo, se utiliza un algoritmo de salto de rana barajado (SFLA por sus siglas en inglés) y para examinar el rendimiento del algoritmo modelo usa como ejemplo un proyecto de construcción de un ferrocarril elevado.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios. Se realiza un análisis de sensibilidad y una comparación con diferentes objetivos para determinar el periodo de duración del proyecto más conveniente, además, se determina el umbral de calidad para ayudar a los tomadores de decisiones a abordar el problema de tiempo, costo y calidad.

La segunda referencia es el artículo *Project cost, quality, risk trade off analysis in a time-constrained problem*, en este es posible evaluar la funcionalidad de un modelo de programación exacto al realizar aceleración de proyectos cuando se adiciona una nueva variable. Para ello, los autores Mohammadipour & Sadjadi (2016) buscan resolver un problema de aceleración de proyectos mediante la técnica Crashing considerando las variables tiempo, costo, calidad y riesgo. Como ya se ha mencionado, la reducción del tiempo de las actividades del proyecto genera un incremento en los costos, sin embargo, el objetivo de los tomadores de decisiones en los proyectos es que este costo sea el menor posible. A su vez, la aceleración de las actividades puede producir un aumento de los riesgos que amenazan el proyecto y la degradación de la calidad. Por tanto, estas dos variables también son tenidas en cuenta en el modelo propuesto.

Para resolver este modelo los autores transforman el modelo de objetivos múltiples en un modelo de un solo objetivo mediante la técnica de logro de objetivos, que es una técnica multi criterio introducida por Gembicki & Haimen(1975). Posteriormente el problema se resuelve aplicado un modelo de programación lineal entera mixta utilizando el Software Lingo 11.0. El modelo propuesto tiene muchas aplicaciones prácticas y muestra resultados eficientes cuando se consideran como en este caso diferentes objetivos en conflicto, en comparación con las técnicas tradicionales donde solo se evalúa un objetivo.

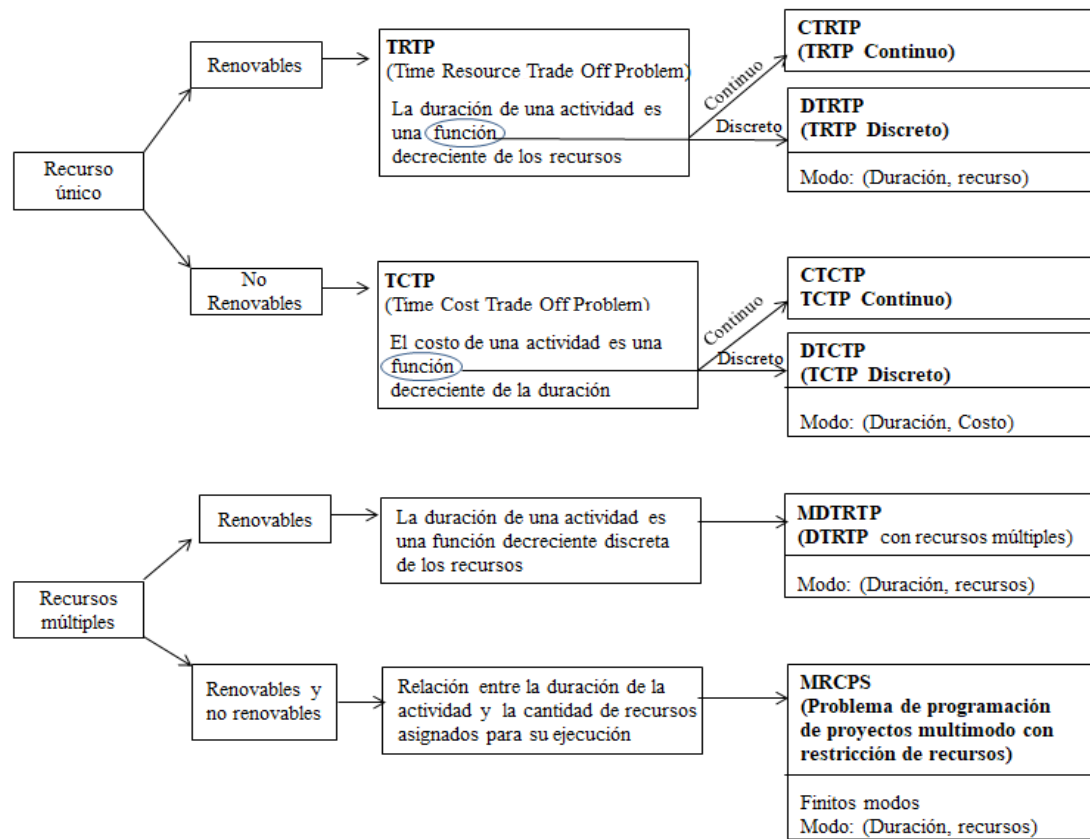
2 MÉTODOS DE SOLUCIÓN EXACTA UTILIZADOS PARA LA ACELERACIÓN DE ACTIVIDADES EN UN PROYECTO

La necesidad de acelerar un proyecto surge cuando el cliente desea anticipar la fecha de finalización del mismo, o cuando el proyecto se encuentra retrasado respecto al cronograma realizado en la fase de programación. En ese momento el gerente del proyecto enfrenta el desafío de comprometerse entre diferentes aspectos conflictivos como la reducción del tiempo de finalización, el incremento de los costos y la afectación de la calidad.

En el caso del presente trabajo, el objetivo es programar un único proyecto buscando minimizar su tiempo de finalización, sujeto a restricciones de recursos en un entorno determinista. Es por esto que, con el fin de delimitar el tipo de problema a abordar, en este caso se caracterizarán las diferentes formas de aceleración a través de las variables número de recursos (individual versus múltiple) y en su categoría (continua o discreta, renovable o no), así como en objetivos (individual versus múltiple).

Una primera categoría de los problemas de aceleración de proyectos puede basarse en el número y la clasificación de los recursos, así como en el tipo de relación entre la duración y los recursos, como se muestra en la Ilustración 1.

Ilustración 1 Clasificación del problema de equilibrio Tiempo - Recursos o Tiempo - Costo



Fuente: Tomado de *Time Cost Quality Trade-off Problems: A survey exploring the assessment of quality*. Bou & Jeunetb.2018

En el caso de un solo recurso renovable como mano de obra o equipo, se consideran problemas de intercambio de recursos y tiempo (TRTP) en donde la duración de una actividad es una función decreciente de la cantidad del recurso renovable. Cuando esta función es continua, se denominan problemas de compensación de recursos de tiempo continuo (CTRTP). Por el contrario, si esta función es discreta, se obtiene problemas de compensación de recursos de tiempo discreto (DTRTP) en los que cualquier actividad puede ejecutarse de acuerdo con varios modos de procesamiento y cada uno de estos representa una posible asignación del recurso con una duración correspondiente.

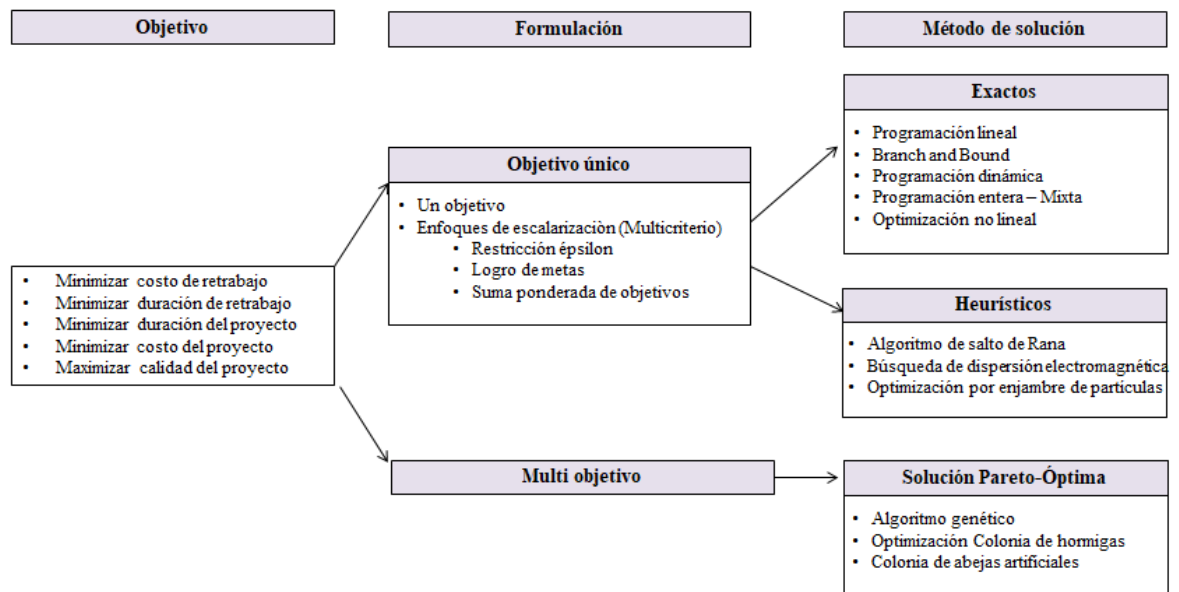
Otra categoría la conforman los recursos únicos no renovables como la energía, el dinero o las materias primas, sin embargo, en la literatura sólo el dinero es considerado un recurso único no renovable, representando este el costo de cualquier categoría de recursos, lo que lleva a problemas de equilibrio de tiempo - costo (TCTP). Por ejemplo, el dinero como recurso no renovable puede representar el costo de las horas extras que son un recurso renovable único, o el costo de varios recursos renovables y no renovables como componentes, equipos y mano de obra. En tales problemas de compensación tiempo - costo, el costo de cualquier actividad es una función decreciente de su duración. Esta función puede ser continua (CTCTP) o discreta (DTCTP).

En el DTCTP cada actividad puede ser ejecutada de forma que los recursos que componen los costos directos del proyecto se utilizan para acortar la duración de la actividad. A su vez, desde 1998 en este se ha introducido el “Crashing” o choque de la duración de las actividades. Xu, Zheng, Zeng, Wu, & Shen (2012) refieren que en esta técnica la duración / costo de una actividad está determinada por la selección del modo y la reducción de la duración aplicada dentro del modo seleccionado, lo que conduce a un DTCTP multimodo (MDTCTP).

Por otra parte, cuando se utilizan varios recursos renovables y la duración de una actividad es una función discreta decreciente de la cantidad de recursos asignados a su ejecución, se obtienen problemas de compensación de tiempo – costo discreto multimodo (MDTRTP). También se presenta el caso en el que se contemplan recursos renovables y/o no renovables los cuales son tratados por medio de problemas de programación de proyectos Restringidos en Múltiples modos (MRCPSP), para los cuales el problema de programación restringido de proyectos (RCPSP) es un caso especial ya que hay un solo modo de ejecución.

Para abordar las problemáticas mencionadas, varios objetivos, formulaciones y métodos de solución se consideran en la literatura, como se muestra en la Ilustración 2.

Ilustración 2. Formulaciones y métodos de solución



Fuente: Adaptado de *Time Cost Quality Trade-off Problems: A survey exploring the assessment of quality*. Bou & Jeunetb.2018

Al momento de acelerar, los principales objetivos se enfocan en minimizar la duración del proyecto o su costo o maximizar la calidad del mismo como una agregación de cualidades individuales, es decir, cualidades de las actividades. En el caso opuesto,

cuando la calidad del proyecto es evaluada de manera binaria, es decir, el proyecto es aceptado o rechazado de acuerdo a si cumple totalmente o no con las exigencias del cliente, el objetivo pasa a ser minimizar el costo de reproceso o la duración de la repetición.

Las formulaciones de objetivo único son las más comunes e incluyen un objetivo entre los cinco anteriores o utilizan enfoques de escalarización a través de los cuales las soluciones de un problema de optimización multicriterio pueden caracterizarse como soluciones de ciertos problemas de optimización de un solo objetivo. Algunos ejemplos de esto enfoques son el método de las restricciones épsilon, el método de logro de objetivos y la suma ponderada de objetivos.

En la mayoría de problemas de un solo objetivo o un objetivo con enfoque de escalarización, el problema se resuelve de manera óptima utilizando algoritmos exactos (Xu et al., 2012). Estos incluyen técnicas de optimización lineal o no lineal como la programación entra, la programación dinámica, el algoritmo de enumeración, Branch and Bound o el algoritmo de ramificación y unión.

2.1 CARACTERIZACIÓN DE MÉTODOS DE SOLUCIÓN EXACTA.

2.1.1 Programación lineal

La programación lineal estudia el problema de minimizar o maximizar una función lineal en la presencia de desigualdades lineales (Vázquez Romero, 2013). Desde que George B. Dantzig desarrolló el método simplex en 1947, la programación lineal se ha utilizado extensamente en el área militar, industrial, gubernamental y de planificación urbana, entre otras (Javis & Monkhtar S., 1996).

Según Taha (2011) todos los modelos de programación lineal (PL) constan de tres componentes básicos:

1. Las **variables** de decisión que se pretende determinar y esta debe ser mayor o igual a 0.
2. El **objetivo** (la meta) que necesitamos optimizar (maximizar o minimizar).
3. Las **restricciones** que la solución debe satisfacer.

La definición correcta de las variables de decisión es un primer paso esencial en el desarrollo del modelo, una vez hecha, la tarea de construir la función objetivo y las restricciones es más directa (Taha, 2011).

El problema de la programación lineal (PL) crea un proceso de optimización en el cual se eligen valores no negativos de una serie de variables de decisión de modo que maximicen o minimicen una función objetivo, donde su ecuación general es la siguiente:

$$\text{Max o min } Z = C_1X_1 + C_2X_2 + \cdots + C_nX_n$$

Sujeto a las restricciones:

$$A_{11}X_1 + A_{12}X_2 + \cdots + A_{1n}X_n \leq B_1$$

$$A_{21}X_1 + A_{22}X_2 + \cdots + A_{2n}X_n \leq B_2$$

$$A_{m1}X_1 + A_{m2}X_2 + \cdots + A_{mn}X_n \leq B_m$$

Donde:

C_n, A_{mn} y B_m Son constantes dadas. Dependiendo del problema, las restricciones se pueden expresar con signo de igualdad o con signos de mayor o igual que y menor o igual que (Mariana & Gavilánez, 2018).

El objetivo del problema es determinar la mejor solución factible que maximice o minimice el objetivo establecido Z, por lo tanto, para solucionar este tipo de problemas es necesario hacer uso de un algoritmo que determine la solución óptima en una cantidad finita de pasos, ejemplo de ello el algoritmo simplex.

2.1.2 Programación entera

En la programación lineal existen muchos problemas prácticos, en los cuales las variables de decisión solo tienen sentido real si su valor es entero, con frecuencia es necesario asignar a las actividades cantidades enteras de personas, máquinas o vehículos (Vázquez Romero, 2013).

Un problema de programación lineal entera (PLE) es un problema de programación lineal con la restricción adicional de que algunas de las variables deben tomar valores enteros. Cuando todas las variables deben tomar valores enteros se trata de un (PLE), en caso contrario se dice que es una programación lineal entera mixta (Taha, 2011).

Además, cabe mencionar que las variables binarias las cuales solo pueden tomar valores de cero o uno también hacen parte de los problemas de programación lineal entera (PLE).

Los algoritmos de PLE implican los siguientes tres pasos:

Paso 1. Eliminar la restricción entera en todas las variables que sean enteras y reemplazar las variables binarias por el intervalo continuo $0 \leq y \leq 1$. Lo anterior, hará que se convierta en un problema programación lineal (PL).

Paso 2. Resolver la PL que se estableció en el paso anterior, e identifique su óptimo continuo.

Paso 3. Comenzando desde el punto óptimo continuo, se agregan las restricciones especiales que modifiquen iterativamente el espacio de soluciones de PL de modo que finalmente de un punto extremo óptimo que satisfaga los requerimientos enteros. Como ejemplo de métodos generales que generan las restricciones especiales en el paso 3 son:

método de ramificación y acotación – Branch And Bound (B&B) y método de plano de corte.

2.1.3 Branch and bound – algoritmo de ramificación y acotamiento

El primer algoritmo de ramificación y acotamiento o Branch and Bound fue desarrollado en 1960 por Land y Doig para el problema general de PLE combinada o pura (Taha, 2011).

La filosofía del Branch and Bound es resolver un problema de programación lineal entera mixta (PLEM) resolviendo un conjunto de problemas de programación lineal (PL) que son versiones relajadas del PLEM, los cuales pueden ser resueltos por técnicas de solución conocidas o mediante software especializado (Carreño, Escobar, Gallego, & Romero, 2003).

Este algoritmo es una metodología que realiza una búsqueda completa de una solución óptima dentro de todo el espacio de búsqueda, pero con la ventaja de ir reduciéndolo a medida que encuentra puntos de infactibilidad y puntos para los cuales se determina una buena solución de la función objetivo (Tapias-Isaza, Galeano-Ossa, & Hincapié Isaza, 2011).

Además, el algoritmo B&B se basa en dos estrategias: dividir (branching) y explorar (bounding), el primero tiene el fin de disminuir el espacio de búsqueda en espacios de menor tamaño para encontrar la solución de una manera más fácil, también, esta estrategia se debe hacer sucesivamente hasta que la solución de cada sub espacio sea entera. Por otro lado, la exploración consiste en determinar soluciones parciales para cada uno de los sub espacios generados por la división del problema y con cada una de estas soluciones el algoritmo puede ir descartando cada uno de estos espacios. El óptimo global es la mejor solución de las encontradas en cada uno de los sub espacios.

Otro aspecto que considera el algoritmo son las pruebas de sondaje por medio de las cuales realiza la eliminación de nodos infactibles y los nodos para los cuales se obtiene un peor valor de la incertidumbre (mejor valor obtenido de la función objetivo). El proceso anteriormente mencionado permite que el espacio de búsqueda sea reducido y rápido.

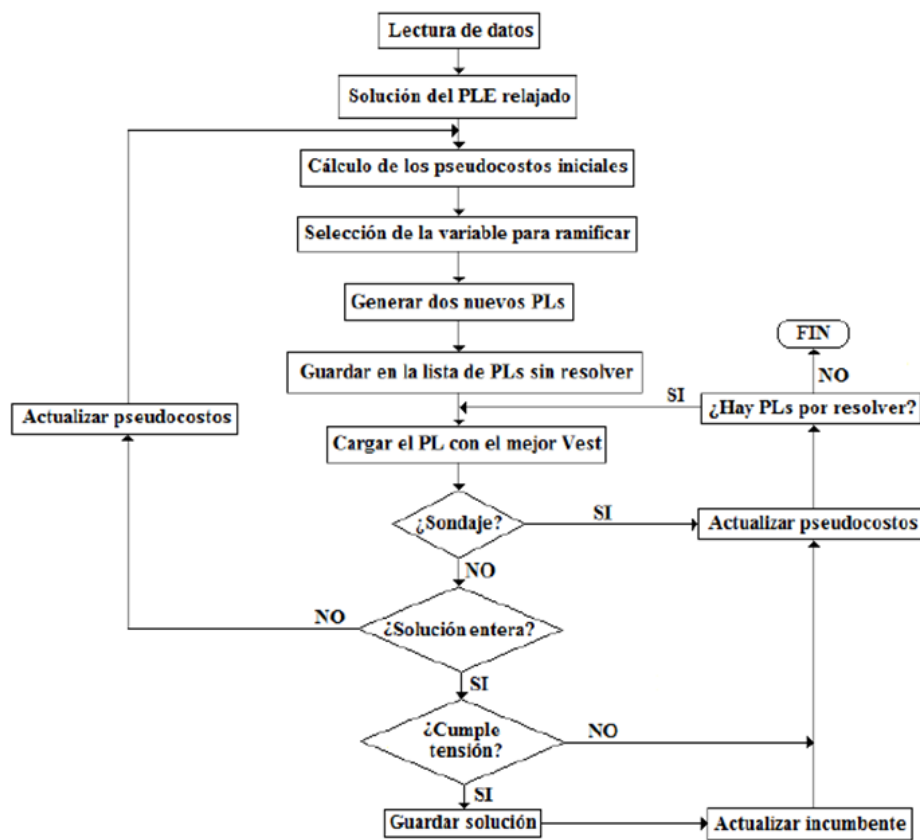
Según Tapias-Isaza et al., (2011) el algoritmo Branch and Bound se encuentra dividido en las siguientes etapas: inicialización, resolver el problema original, selección de variable, sondaje, selección de próximo problema a resolver y finalmente prueba de convergencia.

- **Iniciación:** para iniciar el algoritmo se deben introducir todos los datos del problema, siendo estos la incertidumbre inicial y la lista de problemas candidatos de programación lineal (PL), con la obtención de la incertidumbre inicial se comienza el proceso de sondaje. Si se determina una buena solución inicial el algoritmo podrá sondear una mayor cantidad de nodos y por lo tanto disminuye el espacio de búsqueda de manera más efectiva y por lo tanto, el número de (PL).
- Resolver el problema original y luego solucionar los problemas de programación lineal.

- **Selección de la próxima variable:** una de las estrategias más empleadas es los pseudocostos, estos pueden plantear dos estrategias para la selección de la variable a dividir. La primera estrategia MAX-MAX busca encontrar la variable que produzca la mayor degradación de la función objetivo para que cada uno de los problemas descendientes sea sonado rápidamente. La segunda estrategia llamada MAX-MIN selecciona la variable cuya menor degradación en la función objetivo sea máxima, por lo tanto, se pueden sonar rápidamente los dos sub problema generados.
- **Sondaje:** en esta etapa el algoritmo realiza la eliminación de los nodos para los que se cumplan cualquiera de las siguientes tres condiciones. La primera condición, si la solución del PL encontrada para el nodo es infactible, entonces el nodo es sonado. La segunda condición considera que, si la solución determinada para la PL es menor que la incertidumbre actual, este nodo es sonado, pues las posibles soluciones enteras que se puedan generar a partir de este nodo también tendrán un valor de incertidumbre menor que la incertidumbre actualizada. Finalmente, si la solución de la programación lineal es entera entonces se considera sonado este nodo.
- **Selección del próximo problema a resolver:** en esta etapa se emplean tres estrategias. La primera es conocida como LIFO, esta estrategia escoge el último nodo que ingresa a la lista de PL. la segunda estrategia, se conoce como FIFO, en donde se realiza una búsqueda a lo ancho del árbol y finalmente, la estrategia llamada Vest la cual se basa en la utilización de los pseudocostos para realizar una mejor selección del próximo PL.
- **Prueba de convergencia:** para verificar la convergencia se comprueba si el proceso de optimización ha terminado. En caso de haber terminado, entrega la solución encontrada. En caso contrario, sigue explorando el espacio de búsqueda. Esta prueba no tiene ninguna implicación para el algoritmo, dado que solo entrega el criterio de parada.

En la *ilustración 3* se muestra un diagrama de flujo que indica un sencillo paso a paso para desarrollar el algoritmo Branch and Bound.

Ilustración 3. Diagrama de flujo de solución del algoritmo Branch and Bound



Fuente: Tomado de Tapias Isaza, C. J., Galeano Ossa, A. A., & Hincapié Isaza, R. A. (2011). Planeación de sistemas secundarios de distribución usando el algoritmo branch and bound. 47-64.

2.1.4 Programación dinámica

La idea principal de la programación dinámica (PD) es descomponer el problema en sub problemas, los cálculos se realizan recursivamente donde la solución óptima de un subproblema se utiliza como dato de entrada al siguiente problema, la solución para todo el problema estará disponible cuando se solucionen todos los sub-problemas (Taha, 2011).

Usualmente, se utiliza una matriz que se completa de acuerdo a las soluciones de los subproblemas que son calculados. Además, también es conocido como un método ascendente donde se resuelven primero los problemas pequeños, guardando las soluciones en una tabla y después se combina para resolver los problemas más grandes.

Los elementos de la programación dinámica según Calameo (2019)son:

- Verificar si aplica el principio de optimalidad de Bellman: encontrar la estructura de la solución: dividir el problema en subproblemas y determinar si se puede aplicar el principio.

- Definición recursiva de la solución óptima: definir el valor de la solución óptima en función de valores de soluciones para sub-problemas de tamaño menor.
- Calcular el valor de solución óptima utilizando un enfoque ascendente:
 - Determinar el conjunto de subproblemas distintos a resolver (tamaño de la tabla).
 - Obtener los valores con enfoques ascendentes y almacenar los valores que se han calculado en la tabla.
 - -en etapas posteriores se utilizan los valores previamente calculados
- Determinar la solución óptima a partir de la información previamente calculada.

2.1.5 Programación no lineal

Los problemas de optimización no-lineal son en general difíciles de resolver, por lo tanto, no existen algoritmos generales para resolver cualquier problema de programación no lineal (Vidal Holguin, 2011).

Según Merino Maestre (2019) de acuerdo a la estructura del problema en particular, se ha desarrollado algunos algoritmos eficientes que se describirán a continuación:

- **Optimización no restringida:** problema sin restricciones, el problema se reduce a:

$$\max f(x)$$

- **Optimización restringida linealmente:** dado el caso que todas las restricciones sean lineales pero la función objetivo sea no lineal.

$$\begin{aligned} \max \quad & f(x) \\ \text{s.a.} \quad & X_j \geq 0 \end{aligned}$$

- **Programación cuadrática:** problema restringido linealmente con función objetivo cuadrática (contiene variables y/o productos de variables).

$$f(x_1, x_2) = a_1x_1^2 + a_2x_2^2 + a_3x_1x_2 + a_4x_1 + a_5x_2$$

Se han desarrollado muchos algoritmos para $f(x)$ cóncava, esta fórmula surge de manera natural en muchas aplicaciones

- **Programación convexa:** abarca una amplia clase de problemas, entre los cuales, se puede mencionar los tipos cuando $f(x)$ es una función cóncava que debe maximizarse. Los supuestos son: $f(x)$ es cóncava y cada $g(x)$ es convexa. Los supuestos aseguran un máximo global (Salazar & Diaz de Santos, 2011).
- **Programación geométrica:** cuando se aplica programación no lineal a problemas de diseño de ingeniería, muchas veces la función objetivo y las funciones de restricción toman la forma:

$$g(x) = \sum_{k=1}^N c_k P_k(x)$$

Donde:

$$P_k(x) = x_1^{a_{k1}} x_2^{a_{k2}} \dots x_3^{a_{k3}}, \quad k = 1, 2, \dots, N$$

Tales como c_k y a_{kj} con frecuencia representan constantes físicas, mientras que las variables x_j son de diseño. Estas funciones por lo general no son ni convexas ni cóncavas, por lo que las técnicas de programación convexa no se pueden aplicar a estos problemas de programación geométrica. Sin embargo, existe un caso donde el problema se puede transformar en un problema de programación convexa equivalente. En este caso todos los coeficientes c_k son positivos, y la función objetivo se tiene que minimizar.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS MÉTODOS DE SOLUCIÓN EXACTA DE ACUERDO AL ENFOQUE DEL PROBLEMA

Las características generales de los métodos de solución de acuerdo al enfoque del problema se identifican en la *tabla 1*:

Tabla 1. Características generales de los métodos de solución exacta

Enfoque del problema	Método de solución	Características
Tiempo - costo	Programación lineal	Incorpora información de secuencia, duraciones, costos y concepto de colisión para las actividades del proyecto; no tiene en cuenta la calidad de las actividades del proyecto.
	Programación Dinámica	Propone asignaciones óptimas para redes de actividades de proyectos con funciones arbitrarias costo - tiempo
	Branch and Bound	Propone procedimientos óptimos basados en el algoritmo de ramificación y acotamiento para resolver un problema discreto del problema compensación tiempo y costo.
	Programación Lineal entera mixta	Proporciona una curva optima de tiempo – costo del proyecto y un cronograma de costo mínimo con los parámetros (relaciones de precedencia generalizadas, restricciones de planificación de actividades, restricciones de actividad externa y penalización tardía y/o existencia de bonificación anticipada).
Tiempo – Costo - Calidad	Programación lineal	Interrelación de tres funciones (tiempo, costo y calidad) adoptando una escala continua para determinar la calidad de cada actividad.
	Programación lineal entera mixta	Modelo y procedimiento lineal entero mixto, tiene en cuenta el costo potencial de pérdida de calidad en el problema de compensación tiempo – costo.

Fuente: Adaptado de *A practical approach to project scheduling: considering the potential quality loss cost in the time – cost tradeoff problem.* Kim & Kang, 2012.

3 FORMULACIÓN DEL MODELO PARA LA ACELERACIÓN DE ACTIVIDADES

Los costos de un proyecto generalmente se clasifican en dos categorías: los costos directos y los costos indirectos. Los primeros son los costos asociados a la realización de la obra de construcción y se incluyen en estos los costos de mano de obra, alquiler y compra de equipos, adquisición de tierra, materiales e insumos, estos son necesarios para realizar la nivelación del sitio, pavimento de calles, bordillos, cunetas, aceras, entre otros. De acuerdo con Sahu y Sahu (2014) estos costos se aumentan al reducir el tiempo de duración de las actividades del proyecto. Por otra parte, los costos indirectos no están asociados directamente a la realización de la obra de construcción, pero sí son necesarios para la correcta ejecución del proyecto, allí se reúnen los gastos administrativos, comerciales y financieros. Sahu y Sahu (2014) plantean que éstos, al estar relacionados a la duración de las actividades, se disminuyen al realizar la aceleración del proyecto.

El presente capítulo se enfocará en desarrollar un modelo para la aceleración de un proyecto del sector de la construcción de manera que dicha aceleración incurra en el menor incremento de costos directos. Estos costos al acortar la duración del proyecto se ven reflejados en la asignación de más recursos como materiales, mano de obra y equipo para lograr que las actividades se completen de manera más rápida y a su vez se contemplan también los costos directos potenciales que se pueden generar por la pérdida de calidad (PQLC).

De acuerdo con Atkinson (1999), un proyecto es una tarea de una sola vez limitada por el tiempo, el costo y la calidad, y su éxito depende de qué tan bien se equilibren estas restricciones. Algunos estudios anteriores han tratado la calidad como un factor importante en los problemas de compensación, mencionando que la calidad general del proyecto lograda por la suma de la calidad de las actividades individuales del mismo debe maximizarse dentro de un plazo y presupuesto determinados, sin embargo Babu & Suresh (1996) mencionan que al realizar la aceleración de un proyecto la calidad de este puede verse afectada, generando esto que el cliente este insatisfecho, o en casos más extremos, al tratarse de proyectos de construcción, un trabajo de mala calidad puede poner en riesgo la vida de muchas personas.

Dadas estas situaciones se debe considerar la posibilidad de realizar modificaciones o reprocesos para corregir defectos de calidad originados por actividades de aceleración. Según Kim et al.,(2012) el considerar el PQLC también contribuye a desarrollar cronogramas de proyectos más prácticos y rentables. Es por esto que en el presente trabajo se buscará una solución que considere simultáneamente el costo y el riesgo de mala la calidad del proyecto bajo la restricción de tiempo.

Existen principalmente dos contextos en los que es posible la aplicación del modelo propuesto. El primer caso ocurre después de la preparación del informe del proyecto (incluida la lista de actividades, las relaciones entre las actividades y la duración de cada actividad), en ese momento el calendario inicial del proyecto está disponible para su

inspección. Al ser revisado, la duración del proyecto que ha sido programado por el contratista no es aceptable para el cliente y este le exige anticipar la fecha de terminación.

El segundo caso se genera cuando el proyecto presenta retrasos durante su ejecución y el cliente exige que se cumpla con la fecha de terminación pactada inicialmente. Estos retrasos pueden obedecer a inadecuadas condiciones climáticas, retraso en la llegada de materiales, mano de obra poco calificada, retraso en el otorgamiento de permisos y licencias, entre otros. En ese caso también se hace necesario utilizar una técnica para acortar la duración de algunas actividades que genere una reducción del tiempo total del proyecto.

El modelo propuesto para realizar la aceleración de las actividades de un proyecto de construcción teniendo en cuenta el PQLC consta de los siguientes pasos:

1. Recolectar información del proyecto

El primer paso del modelo propuesto consiste en la obtención de la información del proyecto que incluye estudios previos y la relacionada con la programación del proyecto. En esta programación están establecidos los tiempos para la realización de las diversas fases del proyecto que a su vez se dividen en actividades con su respectiva secuencia o relaciones de precedencia, duración, y estimación de costos unitarios. Estas además deben estar relacionadas en un cronograma

2. Validación de la programación del proyecto

Se debe validar si la programación del proyecto cuenta con información del diagrama de red y ruta crítica, de lo contrario se deberá elaborar teniendo en cuenta que para el establecimiento del diagrama de red del proyecto es necesario identificar el orden de las actividades y sus relaciones de precedencia. Para identificar la ruta crítica se emplea las técnicas de paso adelante/paso atrás en el diagrama de red con el fin de establecer las actividades que no tienen holgura ya que son estas las que determinan el tiempo mínimo requerido para la culminación del proyecto. La ruta crítica y diagrama de red también se pueden determinar y graficar mediante un software de administración de proyectos.

3. Conformar grupo de expertos

En proyectos privados, conformar un grupo consultor compuesto preferiblemente por miembros del grupo de ingeniería y de proyectos. En caso de los proyectos públicos, además de los miembros ya mencionados, se recomienda involucrar en el panel consultor a personal de interventoría. Con su ayuda se podrán determinar los costos y duración Crashing de las actividades, los riesgos de calidad que se pueden presentar a causa de la aceleración, el costo asociado a estos y su probabilidad e impacto.

4. Determinar la pendiente de costo

Con la ayuda de los expertos se establece la máxima reducción que se puede hacer sobre la duración de las actividades críticas y el costo adicional generado por la adición de

recursos en cada una de ellas. Con estos datos, aplicando la *ecuación 1* se procede a calcular la pendiente de costo de cada una de las actividades.

$$\text{Pendiente de costo act } i = \frac{(\text{costo crashing de } i - \text{costo normal de } i)}{(\text{tiempo normal de } i - \text{tiempo crashing de } i)}$$

Ecuación 1. Cálculo de la pendiente de costo

5. Identificación y codificación del riesgo de incumplimiento para las actividades críticas.

Un riesgo de incumplimiento hace referencia a cualquier incertidumbre que afecta negativamente el costo de la actividad cuando esta no cumple con las especificaciones planteadas por el cliente o con las normas de calidad requeridas. En este paso se deben identificar los posibles riesgos producto de la aceleración en cada actividad crítica y que, a su vez, en caso de materializarse, afectarían la calidad de la misma. Esto se hace por medio de una lluvia de ideas entre expertos y partes interesadas involucradas en el proyecto. Se especifica un código y una descripción para cada riesgo de incumplimiento identificado.

6. Priorización de los riesgos de incumplimiento.

En este paso se evalúan la probabilidad y el impacto de cada riesgo de incumplimiento identificado en el paso anterior. Se realiza a través de entrevistas con los miembros del equipo de expertos. De acuerdo con Scott Young & Samson (2008) las experiencias previas de los expertos son valiosas al momento de la evaluación de probabilidad e impacto.

Para el análisis cualitativo, la probabilidad y el impacto del riesgo de incumplimiento se evalúan con escalas numéricas: 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 y 0,9. Estas escalas se definen en las *tablas 2 y 3* respectivamente.

Tabla 2. Escala de probabilidad

Escala de probabilidad	Definición
0,1	Raro
0,3	Posible
0,5	Probable
0,7	Muy probable
0,9	Casi seguro

Fuente: Adaptado de *A practical approach to project scheduling: considering the potential quality loss cost in the time – cost tradeoff problem*. Kim et al.2012.

Tabla 3. Escala de impacto

Escala de impacto	Definición
0,1	<20% de incremento en el costo de la actividad
0,3	Incremento entre el 20 y 40% en el costo de la actividad
0,5	Incremento entre el 41 y 60% en el costo de la actividad
0,7	Incremento entre el 61 y 80% en el costo de la actividad
0,9	Incremento > 80% en el costo de la actividad

Fuente: Adaptado de A practical approach to project scheduling: considering the potential quality loss cost in the time – cost tradeoff problem. Kim at al. 2012.

Las escalas numéricas de las *tablas 3 y 4* se utilizan para hacer la evaluación de cada riesgo derivado de las actividades críticas.

$$\text{Puntaje de riesgo de incumplimiento} = \text{Probabilidad} \times \text{Impacto}$$

Ecuación 2. Cálculo del puntaje de riesgo de incumplimiento

En la *tabla 4* se desarrolla una matriz con las diferentes combinaciones posibles al aplicar la ecuación 2, que conduce a la calificación de cada riesgo de incumplimiento identificado en el paso 5. Esta calificación se utiliza para priorizar los riesgos de incumplimiento.

Tabla 4. Matriz probabilidad por impacto

Probabilidad	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
Impacto					
0,1	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09
0,3	0,03	0,09	0,15	0,21	0,27
0,5	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45
0,7	0,07	0,21	0,35	0,49	0,63
0,9	0,09	0,27	0,45	0,63	0,81

Fuente: Elaboración propia

La matriz de probabilidad por impacto es útil al comienzo del análisis de riesgo de incumplimiento cuando un evaluador tiene información limitada sobre los riesgos asociados con una actividad. Si hay más de un evaluador, la suma de los valores de los riesgos de incumplimiento de cada evaluador se divide por el número de evaluadores para obtener el puntaje promedio de un riesgo de incumplimiento individual.

Después de determinar el puntaje (P x I) para los riesgos de incumplimiento en cada actividad crítica, se selecciona aquel riesgo cuyo puntaje sea más alto. En caso de que haya más de un riesgo con el mismo puntaje, como un segundo criterio se selecciona aquel con un costo de aceleración más elevado. Este es el riesgo con el que trabajaremos en el paso 7 y que será información de ingreso al modelo matemático del paso 8.

7. Estimación de los PQLC

Cuando se realiza la aceleración de las actividades individuales del proyecto, el costo y el tiempo de finalización del proyecto sufren modificaciones respecto a lo programado en el cronograma inicial. En este sentido, la aceleración amplía la posibilidad de que se presenten fallas en el proyecto y por esto se hace necesario realizar controles de calidad inmediatamente después de la finalización de cada actividad individual. Con estos controles se pretende determinar si la actividad cumple con las especificaciones de calidad dadas por el cliente o requeridas por el contratista para la funcionalidad y operatividad del proyecto. En caso contrario, se deben emprender acciones correctivas, reprocesos o modificaciones encaminadas a corregir estos defectos y devolver la calidad a la actividad.

El PQLC hace referencia al costo directo estimado de estos reprocesos o modificaciones para conseguir que la actividad cumpla con los requerimientos de calidad. Estos costos directos pueden incluir materiales, alquiler de maquinaria extra, pago de mano de obra, costos de transporte de materiales, entre otros, según corresponda en cada actividad que es objeto de aceleración.

En el presente modelo se asume la materialización de los riesgos priorizados cuando se realiza la aceleración de la actividad crítica. Es por eso que en este paso con la ayuda de los expertos se estima el Costo potencial por pérdida de calidad (PQLC) para cada uno de estos riesgos priorizados en el paso anterior.

Para llevarlo a cabo, se realiza una reunión con el panel y se pide que discutan y lleguen a un consenso sobre el costo de realizar las modificaciones, trabajos o reprocesos para conseguir que la actividad cumpla con los requerimientos de calidad. Si hay más de un experto y no es posible realizar una reunión con todos ellos presentes, o en el caso en el que los expertos no logren ponerse de acuerdo, el PQLC de la actividad crítica se estima como el valor promedio de los valores sugeridos por cada uno de los integrantes del panel.

El número máximo aceptable de actividades que se pueden acelerar en el proyecto se define en la *ecuación. 7*.

8. Formulación del modelo matemático

Después de realizar la revisión bibliográfica de los métodos de solución exacta utilizados para la aceleración de proyectos de construcción, se destacan los propuestos de Karmaker & Halder (2017) y de Kim et al. (2012).

Con base en las metodologías planteadas por los autores mencionados se propone el siguiente modelo matemático, el cual da solución al problema TCTP incluyendo el PQLC dentro de los proyectos de construcción:

Definición de parámetros, conjuntos y variables de decisión

- **Definición de conjuntos.** El conjunto empleado para el modelo de minimización es el siguiente:
 - ACT : Representa al conjunto donde se agrupan las actividades del proyecto (siendo $ACT = 1, 2, 3, \dots, 55$)
- **Variables de decisión.** Las variables empleadas para el modelo de minimización son las siguientes:
 - x_i : Representa la cantidad de tiempo (días) que se reduce la actividad i ; $\forall i \in ACT$.
 - y_i : Representa el tiempo (días) en que inicia la actividad i ; $\forall i \in ACT$.
 - y_f : Representa la duración final del proyecto
 - w_i : $\begin{pmatrix} 1, & \text{Si se selecciona la actividad } i \text{ como riesgo de incumplimiento; } \forall i \in ACT. \\ 0, & \text{de lo contrario} \end{pmatrix}$
- **Definición de parámetros.** Se identificaron los siguientes valores fijos, los cuales dan la característica al proyecto dentro del modelo:
 - d_i : Duración (días) normal de la actividad i ; $\forall i \in ACT$. Se obtendrá de las especificaciones del proyecto
 - r_i : Reducción de tiempo (días) máxima de la actividad i ; $\forall i \in ACT$.
 - dp : Duración ideal del proyecto, es un valor subjetivo que varía de proyecto a proyecto. Este dato será dado por los expertos del proyecto, quienes evaluarán las condiciones y sugerirán una fecha realista.
 - c_i : Pendiente de costo de la actividad i ; $\forall i \in ACT$.
Este parámetro se calcula con la **ecuación 1**.
 - cq_i : Costo directo potencial por pérdida de la calidad de la actividad i ; $\forall i \in ACT$.
 - n : Representa la cantidad total de actividades realizadas en el proyecto.
 - α : Tasa de actividades consideradas para la aceleración, valor determinado junto con el experto del proyecto estando entre los límites de (0,1).

Modelo de programación Lineal entera mixta

- **Función objetivo.** El objetivo del modelo es minimizar los costos generados por la reducción del tiempo de las actividades del proyecto y el costo directo potencial por pérdida de la calidad de la actividad i .

$$\text{Min costos : } \sum_{i \in ACT} c_i \times x_i + \sum_{i \in ACT} cq_i \times w_i$$

Ecuación 3. Función objetivo del modelo matemático de minimización de costos generados por la reducción de tiempo.

- **Restricciones.** Estas limitan los posibles valores que las variables pueden tomar. Relacionando los parámetros con las variables a través de un conjunto de ecuaciones lógicas.

- **Reducción máxima de tiempo en las actividades:** De acuerdo a la información específica del proyecto se determina con el experto del proyecto el tiempo máximo de duración de las actividades (r_i). El valor hallado de (r_i) será el valor máximo que tomará la variable (x_i) para cada actividad i y se muestra en la ecuación 4:

$$x_i \leq r_i \times w_i, \forall i = 1, \dots, ACT;$$

Ecuación 4. Reducción máxima de tiempo en las actividades

- **Tiempo de inicio de las actividades:** El momento de inicio de cada actividad depende de la hora de inicio y la duración de cada una de sus predecesoras inmediatas, como se muestra en la ecuación 5:

$$y_i - y_{\text{predecesora de } i} + x_{\text{predecesora de } j} \geq d_{\text{predecesora de } i}, \forall j = 2, \dots, ACT;$$

Ecuación 5. Tiempo de inicio de las actividades

- **Duración del proyecto:** La duración final del proyecto se representa con la letra yf y debe ser menor o igual a la duración ideal del proyecto.

$$yf \leq dp$$

Ecuación 6. Duración del proyecto

- **Cantidad máxima de actividades a acelerar:** En esta restricción se determina la cantidad máxima de actividades en el proyecto que pueden ser objeto de aceleración.

$$\sum_{i \in ACT} w_i \leq n \times \alpha$$

Ecuación 7. Cantidad máxima de actividades a acelerar.

- **Restricción de no negatividad:** Todas las variables del proyecto deben ser mayores o iguales a cero, por lo cual se plantea la siguiente ecuación:

$$x_i, y_i, yf, w_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, ACT;$$

Ecuación 8. Restricción de no negatividad.

4 APLICACIÓN DEL MODELO A UN CASO DE ESTUDIO DEL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

Para realizar una prueba de validez al modelo de aceleración aplicando PQLC que se propuso en el capítulo dos, se seleccionó como caso de estudio el proyecto de construcción del puente vehicular ubicado en la ciudad de Tuluá Valle, exactamente en la calle 28 entre carreras 28 y 30.

4.1 INTRODUCCIÓN AL CASO DE ESTUDIO

El municipio de Tuluá, en el plan de desarrollo 2016 – 2019 “Plan Bicentenario” fijó como una de sus metas optimizar la movilidad y la conectividad vial en la zona urbana y rural. En busca del cumplimiento de este objetivo elaboró proyectos tales como la construcción de obras de infraestructura que optimicen la conectividad vial entre el sector occidental y oriental de la ciudad, debido a la segmentación del casco urbano por la presencia del río Tuluá. Uno de estos proyectos es el puente de la calle 28 entre carreras 28 y 30.

Para el desarrollo de dicho proyecto el municipio delegó al INSTITUTO DE FINANCIAMIENTO, PROMOCIÓN Y DESARROLLO DE TULUÁ – INFITULUÁ la contratación, ejecución y seguimiento del proyecto de diseño y construcción del puente.

El alcance del proyecto, detallado en los estudios previos indica que para las intersecciones y conexión val del puente vehicular calle 28, entre carreras 28 y 30 del municipio de Tuluá la obra debe contar con:

- Rampa de acceso en los sentidos de acceso y descenso
- Construcción de intersecciones de acuerdo al perfil dado por planeación municipal
- Adecuación urbanística del entorno en ambos lados
- Puente de luz aproximada 31 Ml
- Ancho del puente 10,00 m.
- Calzadas de 7,00 m de ancho
- Anden peatonal de 1,5 m de ancho
- Barandas de protección
- Losas de aproximación en cada sentido
- Construcción cimentación de ambos estribos
- Construcción de la cimentación.

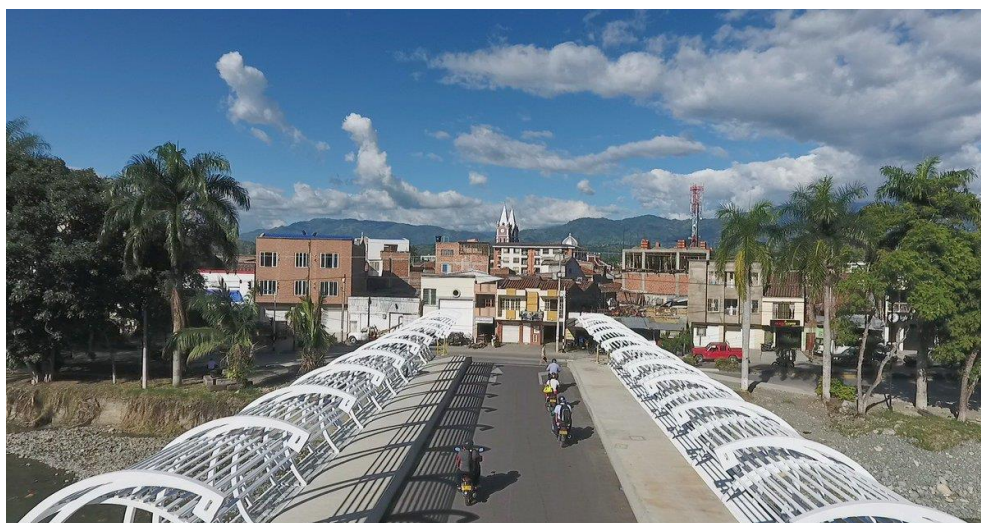
De acuerdo a la programación inicial la obra tendría un costo total de \$1.433.174.739 y su ejecución se llevaría a cabo entre el 3 de octubre de 2016 y el 27 de diciembre de 2017, para una duración total de 352 días laborales. Las ilustraciones 4 y 5 muestran el puente después de ser inaugurado.

Ilustración 4. Puente en Tuluá ubicado en la calle 28 entre Cra. 28 y Cra. 30



Fuente: Tomado de la Alcaldía de Tuluá

Ilustración 5. Puente en Tuluá ubicado en la calle 28 entre Cra. 28 y Cra. 30 – vista superior



Fuente: Tomado de la Alcaldía de Tuluá

4.2 DESARROLLO DEL MODELO PROPUESTO.

1. Recolectar información del proyecto

Como punto de partida, la información de proyecto es solicitada al instituto de financiamiento, promoción y desarrollo de Tuluá – INFITULUÁ. E.I.C.E. Esta entidad

es quien suministra los estudios previos, el cronograma de actividades, y el análisis de precios unitarios (APU). Estos archivos y documentos permiten identificar la descripción general del proyecto, la duración de cada una de las actividades y sus costos asociados (mano de obra, materiales y equipos) observados en la *tabla 5*. A su vez se puede identificar el desglose de los costos de mano de obra y equipo por actividad, esta información se muestra en los **Anexos 1 y 2**.

Cabe resaltar que no fue posible obtener información sobre las relaciones de precedencia de las actividades debido a la inexistencia física de tales archivos. En este sentido, mediante entrevistas con el arquitecto encargado de la obra se establece las relaciones de precedencia entre las 55 actividades que conforman el proyecto, como se observa en la *tabla 6*.

Tabla 5. Costo de las actividades del proyecto.

# Act	Descripción actividad	Duración (Días)	Costo (\$)
ACTIVIDADES PREVIAS			
1	Permiso ocupación de cauce	44	\$ 5.184.000
2	Permiso de aprovechamiento forestal	132	\$ 804.600
3	Campamento tabla 18 m2	11	\$ 1.981.226
4	Localización-replanteo proyecto vías y puente en las diferentes etapas	16,5	\$ 6.509.140
5	Cerramiento tela fib.tejida h=2.10m-sinb	11	\$ 3.775.684
6	Cinta seguridad preventiva a=8cm-250mts.	5,5	\$ 1.050.440
7	Instalación provisional acueducto	5,5	\$ 810.000
8	Instalación provisional energía	5,5	\$ 1.080.000
9	Desviación temporal cauce anchos 1 a 3 m	132	\$ 29.566.080
DEMOLICIONES Y EXCAVACIONES			
10	Demol.anden e=0.10 +retiro cra 28	5,5	\$ 599.640
11	Demol.concreto ciclópeo	11	\$ 7.165.152
12	Corte árbol más retiro	11	\$ 7.674.375
13	Restablecimiento arborización	5,5	\$ 2.334.300
14	Demol.anden e=0.10 +retiro cra 30	11	\$ 1.199.280
15	Demol.pavimento concreto e=20cm +ret	5,5	\$ 3.270.450
16	Demol.pavimento flexible + retiro 10kms	11	\$ 3.119.302
17	Excavación a máquina sin retiro	5,5	\$ 347.750
18	Conform.compact.subrasante cbr=95 urbana	5,5	\$ 3.361.241
CONSTRUCCIÓN PUENTE SOBRE RIO TULUÁ			
19	Excavación para pilotes d= 2m incluido manejo de agua	33	\$ 93.895.671
20	Retiro escombros manual-volqueta <=10km.	16,5	\$ 9.539.132
21	Solado espesor e=0.07m 2000 psi 14 mpa	5,5	\$ 1.056.572
22	Tub concreto reforzado d=80"	33	\$ 35.947.635
23	Anillo en concreto	33	\$ 10.603.716
24	Caisson d=2m en concreto 28 mpa	33	\$ 95.271.888
25	Viga cabezal	38,5	\$ 65.544.931
26	Viga I concreto premezclado 6000 psi acelerado	38,5	\$ 151.644.407
27	Concreto diafragmas premezclado 4000 PSI	11	\$ 11.390.573
28	Tablero en concreto premezclado 4000 PSI	11	\$ 78.323.537
29	Formaleta vigas	38,5	\$ 23.481.868
30	Formaleta tablero	11	\$ 5.521.411
31	Bombeo concreto a máquina	82,5	\$ 20.119.895
32	Losa anden puente con casetón	11	\$ 25.093.375
33	Cimbra metálica	49,5	\$ 56.333.880
34	Montaje vigas cimbra	5,5	\$ 43.200.000
35	Cable acero alta resistencia incluye tensionamiento	38,5	\$ 97.583.195
36	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa (caisson)	38,5	\$ 76.887.720
37	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa	27,5	\$ 23.225.099
38	Acero estructural para arquitectura	38,5	\$ 76.491.296
39	Imprimación mc-70	5,5	\$ 457.773
40	Carpeta asfáltica [st]	5,5	\$ 8.166.797
41	Acarreo asfalto volumen compactado	5,5	\$ 2.218.759
42	Transporte de equipo > 50 km	5,5	\$ 6.174.000
43	Apoyo de neopreno\ dureza 60	5,5	\$ 3.417.872
44	Tub.pvc 4 dren.novaf	5,5	\$ 139.096
45	Retiro de derrumbe	27,5	\$ 24.743.706
46	Estabilización y conformación de talud	27,5	\$ 13.558.023
BASES Y PAVIMENTOS			
47	Sub-base compac.mat.selecc.10k-invias	5,5	\$ 27.905.149
48	Pav.concret premezclado mr=42	11	\$ 159.640.064
49	Muro concreto contención 0<h<=1.00mts	44	\$ 47.885.684
50	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa	82,5	\$ 23.225.099
51	Realce cámara de inspección	11	\$ 1.660.120
OBRAS VARIAS			
52	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa	5,5	\$ 23.225.099
53	Anclaje hierro, 3/4-perf.7/8 16-20c	5,5	\$ 2.604.334
54	Anclaje hierro, 1/2-perf. 5/8 10-15c	5,5	\$ 906.150
55	Ménsula concreto 4000 psi	5,5	\$ 6.258.553
	Fin		
TOTAL			\$ 1.433.174.739

Fuente: Elaboración propia con base en la información suministrada por INFITULUÁ E.I.C.E.

Tabla 6. Actividades predecesoras

# Act	Descripción actividad	Actividades predecesoras	# Act	Descripción actividad	Actividades predecesoras
1	Permiso ocupación de cauce	-	29	Formaleta vigas	24, 21, 22
2	Permiso de aprovechamiento forestal	-	30	Formaleta tablero	24, 21, 22
3	Campamento tabla 18 m2	-	31	Bombeo concreto a máquina	21
4	Localización-replanteo proyecto vías y puente en las diferentes etapas	-	32	Losa anden puente con casetón	31, 43, 50
5	Cerramiento tela fib.tejida h=2.10m-sinb	-	33	Cimbra metálica	25, 26
6	Cinta seguridad preventiva a=8cm-250mts.	5	34	Montaje vigas cimbra	25, 26, 33
7	Instalación provisional acueducto	-	35	Cable acero alta resistencia incluye tensionamiento	25, 26, 34
8	Instalación provisional energia	-	36	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa (caisson)	21, 22, 24, 35
9	Desviación temporal cauce anchos 1 a 3 m	-	37	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa	21, 22, 24
10	Demol.anden e=0.10 +retiro cra 28	3,4	38	Acero estructural para arquitectura	27, 28, 32, 36, 37
11	Demol.concreto ciclópeo	3	39	Imprimación mc-70	48
12	Corte árbol más retiro	2	40	Carpeta asfáltica [st]	48, 39
13	Restablecimiento arborización	11,12	41	Acarreo asfalto volumen compactado	48
14	Demol.anden e=0.10 +retiro cra 30	3	42	Transporte de equipo > 50 km	48
15	Demol.pavimento concreto e=20cm +ret	3,14,10	43	Apoyo de neopreno\ dureza 60	25, 26
16	Demol.pavimento flexible + retiro 10kms	3,15	44	Tub.pvc 4 dren.novaf	18
17	Excavación a máquina sin retiro	10, 11, 16	45	Retiro de derrumbe	17
18	Conform.compact.subrasante cbr=95 urbana	17, 19	46	Estabilización y conformación de talud	45
19	Excavación para pilotes d= 2m incluido manejo de agua	10,11	47	Sub-base compac.mat.selecc.10k-invias	18
20	Retiro escombros manual-volqueta <=10km.	10,11,17,19	48	Pav.concret premezclado mr=42	47, 51, 53, 54, 55
21	Solado espesor e=0.07m 2000 psi 14 mpa	17,19	49	Muro concreto contención 0<h<=1.00mts	18
22	Tub concreto reforzado d=80"	17, 19, 20	50	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa	18
23	Anillo en concreto	21, 22, 24	51	Realce cámara de inspección	44
24	Caisson d=2m en concreto 28 mpa	17, 19	52	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa	29, 30, 31, 37
25	Viga cabezal	29, 30, 31, 37, 23	53	Anclaje hierro, 3/4-perf.7/8 16-20c	29, 30, 31, 37
26	Viga I concreto premezclado 6000 psi acelerado	29, 30, 31, 37, 23	54	Anclaje hierro, 1/2-perf. 5/8 10-15c	29, 30, 31, 37
27	Concreto diafragmas premezclado 4000 PSI	28	55	Ménsula concreto 4000 psi	29, 30, 31, 37, 24
28	Tablero en concreto premezclado 4000 PSI	29, 30		Fin	1, 6, 7, 8, 9, 13, 38, 40, 41, 42, 46, 49, 52

Fuente Elaboración propia con base en la información suministrada por los expertos

2. Establecer el diagrama de red y la ruta crítica

Por medio del Software Microsoft Project se establece la ruta crítica del proyecto, componiéndose esta de las actividades 3, 4, 10, 11, 19, 20, 21, 22, 25, 26, 29, 31, 33, 34, 35, 36 y 38.

Esta ruta establece que el tiempo mínimo para la culminación del proyecto es de 352 días. Los resultados obtenidos en el software Microsoft Project se pueden observar en los **Anexos 3 y 4**.

3. Conformar grupo de expertos

En la realización del presente trabajo el grupo de expertos estuvo compuesto por el arquitecto encargado de liderar y controlar el proyecto y una ingeniería civil participe de la obra, ambos pertenecientes a INFITULUÁ. También se contó con la ayuda y experticia de una ingeniería civil, líder de varios proyectos realizados por la entidad CENTROAGUAS. S.A.

Se realizaron varias sesiones de entrevistas con estos 3 expertos, en este caso, por su disponibilidad, estas reuniones son realizadas por separado. Con ayuda de los expertos se determina la información presentada en los pasos 4 al 7. A su vez esta información constituye los parámetros de entrada del modelo matemático presentado en el paso 8.

4. Determinar la pendiente de costo

La información relacionada con la aceleración de las actividades críticas del proyecto se puede apreciar en la *tabla 7*.

Es importante destacar que los valores correspondientes a la duración y costo normales fueron determinados por INFITULUÁ en la fase de programación del proyecto y son mostrados en la *Tabla 5*.

La primera columna de la tabla hace referencia al número de la actividad y la segunda columna indica la descripción de la misma. En la tercera y cuarta columna se indican la duración normal de la actividad y su costo asociado respectivamente, de acuerdo con el cronograma inicial del proyecto. La quinta columna indica la duración máxima en unidades de tiempo (días) a los cuales la actividad puede reducirse al aplicar el Crashing.

El costo de la actividad crítica al acortar su duración se muestra en la sexta columna, en este, al valor inicial de la actividad se suman los costos generados por la mano de obra adicional que se deba contratar, por pago de horas extras a trabajadores o por los equipos extras que se deban comprar o alquilar con el fin de acortar la duración de la actividad.

La diferencia entre el costo Crash y el costo normal o ΔC se muestra en la columna 7, allí se evidencia el aumento en el costo de la actividad generado por la aceleración.

En la octava columna se muestra la diferencia entre la duración normal y la duración Crash o Δt , este dato indica los días que se logró reducir la duración de la actividad. Finalmente, en la última columna se observa la pendiente de costo ($\Delta C/\Delta t$) que indica el aumento en el costo de la actividad por unidad de tiempo, en este caso días.

Con la ayuda de los expertos es posible establecer el costo Crash y duración Crash para cada actividad crítica, quedando de la siguiente manera:

- La actividad 3 puede ser reducida 3 días mediante la contratación adicional de un ayudante durante la ejecución de toda la actividad, generando un costo extra de \$502.208 pesos, por concepto de salario de ocho días de dicho trabajador.
- La actividad 4 puede ser reducida 6,5 días a través del aumento de un ayudante albañil y un cadenero topográfico durante diez días, generando un costo adicional por salarios de \$2.201.360 pesos
- La actividad 10 no puede ser reducida.
- La actividad 11 puede ser reducida 3 días a través de la adición de 2 ayudantes albañiles durante la ejecución de toda la actividad. Esto generaría un costo adicional de \$815.688 pesos, equivalentes al salario de 8 días de estos trabajadores.
- La actividad 19 puede ser reducida 7 días a través de la contratación de una retroexcavadora durante 26 días, por lo tanto, esta actividad contará con dos retroexcavadoras. El costo estimado a esta contratación es de \$423.610 pesos.
- La actividad 20 puede ser reducida 8,5 días mediante la contratación de dos volquetas adicionales, contando con un total de 3 volquetas. Además, se debe asignar 3 ayudantes adicionales durante toda la actividad. Estos recursos, tendrán un costo estimado de \$3.321.463 pesos.
- La actividad 21 puede ser reducida 2,5 días por medio de la adicción de 4 obreros ayudantes durante la ejecución de la actividad. El costo adicional estimado es de \$270.629 pesos, que equivalen al pago de 3 días laborados de los cuatro ayudantes.
- La actividad 22 puede ser reducida 13 días a través del aumento de dos cuadrillas durante cuatro días, una de albañilería y otra topográfica. La primera cuadrilla está compuesta por 2 ayudantes y un oficial y la segunda cuadrilla conformada por un topógrafo y un cadenero. Estas acciones generarían un costo adicional \$1.138.709 pesos.

- La actividad 25 puede ser reducida 14,5 días a través de la adicción de 3 ayudantes albañiles durante la ejecución de toda la actividad, generando un costo adicional de \$3.907.431 pesos, que equivalen a 24 días de trabajo de los albañiles.
- La actividad 26 puede ser reducida 14,5 días mediante la adicción de 3 ayudantes albañiles durante la ejecución de toda la actividad, generando un costo adicional de \$3.907.431 que equivale a 24 días de trabajo de los albañiles.
- La actividad 29 puede ser reducida 18,5 días mediante la contratación de 2000 cerchas metálicas de 3 metros durante los 20 días de la ejecución de la actividad, generando un costo adicional de \$313.200
- La actividad 31 puede ser reducida 42,5 días a través de la contratación de dos máquinas mezcladoras de concreto durante la ejecución de toda la actividad, por un costo adicional estimado en \$2.872.000 pesos
- La actividad 33 puede ser reducida 24,5 días a través de la contratación de 3 cimbras metálicas durante 25 días, por un costo adicional estimado de \$24.750.000 pesos.
- La actividad 34 no puede ser reducida
- La actividad 35 no puede ser reducida.
- La actividad 36 puede ser reducida 23,5 días mediante la adición de 5 obreros ayudantes a lo largo de toda su ejecución, generando un costo adicional de \$4.708.200 pesos que equivale al salario de estos trabajadores durante los 15 días de duración de la actividad.
- La actividad 38 puede ser reducida 13,5 días mediante la adicción de 3 obreros, generando un costo adicional de \$4.708.200 pesos que equivale al salario de los ayudantes durante los 25 días de ejecución de la actividad.

Tabla 7. Cálculo de la pendiente de costo para las actividades críticas

Actividad Crítica	Normal		Crash		Costos Crash - Costo Normal (ΔC)	Duración Normal - Duración Crash (Δt)	Pendiente de costo ($\Delta C/\Delta t$)
	Duración (días)	Costos (\$)	Duración (días)	Costos (\$)			
Campamento tabla 18 m2	11	\$ 1.981.226	8	\$ 2.483.434	\$ 502.208	3	\$ 167.403
Localización-replanteo proyecto vías y puente en las diferentes etapas	16,5	\$ 6.509.140	10	\$ 8.710.500	\$ 2.201.360	6,5	\$ 338.671
Demol.anden e=0.10 +retiro cra 28	5,5	\$ 599.640	-	-	-	-	-
Demol.concreto ciclópeo	11	\$ 7.165.152	8	\$ 7.980.840	\$ 815.688	3	\$ 271.896
Excavación para pilotes d= 2m incluido manejo de agua	33	\$ 93.895.671	26	\$ 94.319.281	\$ 423.610	7	\$ 60.516
Retiro escombros manual-volqueta <=10km.	16,5	\$ 9.539.132	8	\$ 12.860.595	\$ 3.321.463	8,5	\$ 390.760
Soldado espesor e=0.07m 2000 psi 14 mpa	5,5	\$ 1.056.572	3	\$ 1.327.201	\$ 270.629	2,5	\$ 108.252
Tub concreto reforzado d=80"	33	\$ 35.947.635	20	\$ 37.086.344	\$ 1.138.709	13	\$ 87.593
Viga cabezal	38,5	\$ 65.544.931	24	\$ 69.452.362	\$ 3.907.431	14,5	\$ 269.478
Viga I concreto premezclado 6000 psi acelerado	38,5	\$ 151.644.407	24	\$ 155.551.846	\$ 3.907.439	14,5	\$ 269.479
Formaleta vigas	38,5	\$ 23.481.868	20	\$ 23.795.068	\$ 313.200	18,5	\$ 16.930
Bombeo concreto a máquina	82,5	\$ 20.119.895	40	\$ 22.991.895	\$ 2.872.000	42,5	\$ 67.576
Cimbra metálica	49,5	\$ 56.333.880	25	\$ 81.083.880	\$ 24.750.000	24,5	\$ 1.010.204
Montaje vigas cimbra	5,5	\$ 43.200.000	-	-	-	-	-
Cable acero alta resistencia incluye tensionamiento	38,5	\$ 97.583.195	-	-	-	-	-
Acero refuerzo flejado 60000 PSI 420 MPA (Caisson)	38,5	\$ 76.887.720	15	\$ 81.595.920	\$ 4.708.200	23,5	\$ 200.349
Acero estructural para arquitectura	38,5	\$ 76.491.296	25	\$ 81.199.496	\$ 4.708.200	13,5	\$ 348.756

Fuente: Elaboración propia con base en la información suministrada por los expertos.

5. Identificación y codificación del riesgo de incumplimiento para las actividades críticas.

Por medio de una lluvia de ideas con los expertos se identifican los riesgos de calidad que podrían presentarse al realizar la aceleración de cada una de las actividades críticas. Estos riesgos se pueden observar en la *tabla 8*. Es importante aclarar que, de acuerdo a los expertos, en las actividades 3, 4 y 20 no se presentan riesgos de calidad cuando se inyectan más recursos para acortar su duración.

6. Priorización de los riesgos de incumplimiento

Los valores de probabilidad e impacto para cada uno de los riesgos identificados son determinados con la ayuda de los expertos. Adicionalmente, al aplicar la *ecuación 2* se genera el puntaje de riesgo de incumplimiento ($P \times I$), estos valores son mostrados en la *tabla 9*.

Posteriormente se realiza la priorización de un riesgo por actividad crítica de acuerdo al mayor puntaje de riesgo de incumplimiento obtenido entre los riesgos asociados a dicha actividad. De esta manera los riesgos a tener en cuenta para introducir al modelo matemático se observan en la *tabla 10*.

Tabla 8. Riesgos de calidad al acelerar las actividades críticas.

# Act.	Actividad crítica	Código del Riesgo	Descripción del riesgo
3	Campamento tabla 18 m2	-	N/A
4	Localización-replanteo proyecto vías y puente en las diferentes etapas	-	N/A
10	Demol.anden e=0.10 +retiro cra 28	10-A	Fisuramientos y/o fracturamientos del andén existente
		10-B	cortes defectuosos y/o por fuera de los Linderos o alineamientos autorizados
11	Demol.concreto ciclópeo	11-A	Fisuramientos y/o fracturamientos de la estructura existente
		11-B	cortes defectuosos y/o por fuera de los Linderos o alineamientos autorizados
19	Excavación para pilotes d=2m incluido manejo de agua	19-A	Derrumbe del terreno
20	Retiro escombros manual-volqueta <=10km.	-	N/A
21	Solado espesor e=0.07m 2000 psi 14 mpa	21 - A	Subida del nivel del puente
22	Tub concreto reforzado d=80"	22 - A	Fraccionamiento del tubo
		22 - B	Mala localización de la tubería
		22 - C	Niveles de instalación de inicio y fin de la tubería inadecuados
25	Viga cabezal	25 - A	Viga torcida u hormigueada
		25 - B	Amare inadecuado del acero
		25 - C	Grietas verticales en la unión entre estribos
		25 - D	Deflexión excesiva
		25 - E	Fisuras y deterioro en el concreto
		25 - F	movimiento o asentamiento de estribos
26	Viga I concreto premezclado 6000 psi acelerado	26-A	Viga torcida u hormigueada
		26-B	Amare inadecuado del acero
		26-C	Grietas verticales en la unión entre estribos
		26-D	Deflexión excesiva
		26-E	Fisuras y deterioro en el concreto
		26-F	movimiento o asentamiento de estribos
29	Formaleta vigas	29-A	Deformaciones en formaleta
		29-B	falta de plomo en la formaleta
31	Bombeo concreto a máquina	31-A	Perdida de fluidez o perdida de humedad del concreto
		31-B	Secado del concreto
33	Cimbra metálica	33-A	Deflexión de la cimbra
34	Montaje vigas cimbra	34-A	Deflexión de la cimbra
35	Cable acero alta resistencia incluye tensionamiento	35-A	Rompimiento del cable de acero por sobre tensionamiento
36	Acero refuerzo flejado 60000 PSI 420mpa (Caisson)	36-A	Defectos en las uniones de los elementos de la estructura
		36-B	Desplazamiento del acero de refuerzo durante el vaciado
38	Acero estructural para arquitectura	38-A	Pérdida de adherencia entre el concreto y el acero
		38-B	Derrumbamiento de la estructura

Fuente: Elaboración propia con base en la información suministrada por los expertos

Tabla 9. Cálculo del puntaje de riesgo de incumplimiento ($P \times I$)

Código Riesgo	Probabilidad	Impacto	$P \times I$	Código Riesgo	Probabilidad	Impacto	$P \times I$
10-A	0,7	0,3	21,0%	26-B	0,3	0,1	3,0%
10-B	0,5	0,3	15,0%	26-C	0,3	0,1	3,0%
11-A	0,7	0,3	21,0%	26-D	0,5	0,1	5,0%
11-B	0,7	0,1	7,0%	26-E	0,5	0,1	5,0%
19-A	0,5	0,3	15,0%	26-F	0,5	0,1	5,0%
21 - A	0,1	0,3	3,0%	29-A	0,1	0,3	3,0%
22 - A	0,7	0,5	35,0%	29-B	0,5	0,1	5,0%
22 - B	0,3	0,1	3,0%	31-A	0,5	0,1	5,0%
22 - C	0,3	0,1	3,0%	31-B	0,7	0,3	21,0%
25 - A	0,3	0,5	15,0%	33-A	0,3	0,1	3,0%
25 - B	0,3	0,1	3,0%	34-A	0,3	0,1	3,0%
25 - C	0,3	0,1	3,0%	35-A	0,1	0,3	3,0%
25 - D	0,3	0,1	3,0%	36-A	0,3	0,1	3,0%
25 - E	0,5	0,1	5,0%	36-B	0,5	0,1	5,0%
25 - F	0,5	0,1	5,0%	38-A	0,3	0,1	3,0%
26-A	0,3	0,3	9,0%	38-B	0,1	0,5	5,0%

Fuente: Elaboración propia con base en la información suministrada por los expertos

Tabla 10. Priorización de los riesgos

Código Riesgo	Probabilidad	Impacto	$P \times I$
10-A	0,7	0,3	21,0%
11-A	0,7	0,3	21,0%
19-A	0,5	0,3	15,0%
21-A	0,1	0,3	3,0%
22-A	0,7	0,5	35,0%
25-A	0,3	0,5	15,0%
26-A	0,3	0,3	9,0%
29-B	0,5	0,1	5,0%
31-B	0,7	0,3	21,0%
33-A	0,3	0,1	3,0%
34-A	0,3	0,1	3,0%
35-A	0,1	0,3	3,0%
36-B	0,5	0,1	5,0%
38-B	0,1	0,5	5,0%

Fuente: Elaboración propia con base en la información suministrada por los expertos

7. Estimación de los PQLC

Con la ayuda de los expertos también se determinan los costos potenciales por pérdida de calidad para cada uno de los riesgos priorizados en el paso anterior. Estos se muestran en la *tabla 11*.

Tabla 11. Costo potencial de pérdida de calidad (PQLC)

Código Riesgo	Probabilidad	Impacto	P x I	PQLC
10-A	0,7	0,3	21,0%	\$ 149.910
11-A	0,7	0,3	21,0%	\$ 1.433.030
19-A	0,5	0,3	15,0%	\$ 2.355.000
21-A	0,1	0,3	3,0%	\$ 327.544
22-A	0,7	0,5	35,0%	\$ 17.973.818
25-A	0,3	0,5	15,0%	\$ 32.772.466
26-A	0,3	0,3	9,0%	\$ 37.911.102
29-B	0,1	0,5	5,0%	\$ 4.586.583
31-B	0,7	0,3	21,0%	\$ 8.047.958
33-A	0,3	0,1	3,0%	\$ 7.041.735
34-A	0,3	0,1	3,0%	\$ 5.400.000
35-A	0,1	0,3	3,0%	\$ 39.033.278
36-B	0,5	0,1	5,0%	\$ 10.983.960
38-B	0,1	0,5	5,0%	\$ 45.894.778

Fuente: Elaboración propia con base en la información suministrada por los expertos

8. Formulación modelo matemático

Luego de obtener la información requerida, se procedió a integrar la información del caso de estudio al modelo matemático, siguiendo la estructura presentada en el capítulo 2 paso 8. Se obtuvo en total 409 restricciones distribuidas de la siguiente manera:

- 55 restricciones de reducción máxima de tiempo en las actividades.
- 132 restricciones de tiempo de inicio de las actividades.
- 1 restricción de la duración del proyecto.
- 55 restricciones de la cantidad máxima de actividades a acelerar.
- 166 restricciones de no negatividad.

También, 166 variables de decisión, distribuidas de la siguiente manera:

- 55 variables x_i que representan la cantidad de tiempo (días) que se reduce la actividad i .
- 55 variables y_i que representa el tiempo (días) en que inicia la actividad i .
- 1 variable y_f que representa la duración final del proyecto.
- 55 variables binarias w_i que representa el número 1 si la actividad i se selecciona para ser acelerada y el número 0 de lo contrario.

Quedando la función objetivo de la siguiente manera:

Minizar costos

$$\begin{aligned}
 = & \{[(167403 \times X_3) + (338671 \times X_4) + (271896 \times X_{11}) \\
 & + (60516 \times X_{19}) + (390760 \times X_{20}) + (108252 \times X_{21}) \\
 & + (87593 \times X_{22}) + (269478 \times X_{25}) + (269479 \times X_{26}) \\
 & + (16930 \times X_{29}) + (67576 \times X_{31}) + (1010204 \times X_{33}) \\
 & + (200349 \times X_{36}) + (348756 \times X_{38})] \\
 & \times [(255000 \times W_{10}) + (255000 \times W_{11}) + (133875 \times W_{19}) \\
 & + (327544 \times W_{21}) + (17973818 \times W_{22}) + (32772466 \times W_{25}) \\
 & + (37911102 \times W_{26}) + (4586583 \times W_{29}) + (8047958 \times W_{31}) \\
 & + (7041735 \times W_{33}) + (5400000 \times W_{34}) + (39033278 \times W_{32}) \\
 & + (10983960 \times W_{36}) + (45894778 \times W_{38})]\}
 \end{aligned}$$

Para observar la formulación del modelo de una manera más detallada se recomienda ver el **Anexo 5**.

Este modelo de optimización elige de manera conveniente que actividades críticas reducir de manera que se pueda anticipar el tiempo de finalización del proyecto generando el menor incremento posible en los costos.

Para la formulación del modelo se agregan como parámetros la información dada en los pasos 1 al 8.

Es importante resaltar que el proyecto estaba programado inicialmente para tener una duración de 352 días comprendidos entre el 3 de Octubre del 2016 y el 27 de Diciembre del 2017.

El motivo de aplicar una aceleración de este proyecto se fundamenta en que el cliente requiere que la obra finalice antes del mes de diciembre del año 2017. A final de año, por motivo de las compras decembrinas el flujo vehicular y peatonal en las calles del centro de la ciudad tiene un aumento significativo. Esto, sumado al cierre de algunas vías por motivo de la obra aumenta este flujo y contribuye a la creación de embotellamiento en calles y andenes de la zona.

Adicional a ello, en esta época las actividades turísticas y comerciales son una fuente significativa de ingresos para la población tuluëña, y el hecho de tener estas vías cerradas ocasiona disminución significativa en las ventas de aquellas microempresas y locales comerciales ubicados cerca de la obra, generando malestar entre los comerciantes y la población en general.

Al anticipar la fecha de culminación del puente se evita la afectación económica a estos microempresarios, a su vez habrá más calles habilitadas lo que contribuirá a la descongestión las calles y andenes del centro de Tuluá.

Dicho lo anterior, se estableció que la nueva duración del proyecto debía ser de 270 días hábiles, para que este pudiera ser llevado a cabo entre las fechas del 15 octubre del 2016 y 15 de Septiembre del 2017.

Para la solución del modelo se empleó el programa de optimización AMPL el cual permite solucionar diferentes problemas de programación lineal entera mixta. Posteriormente, se corrió el modelo y se procedió a identificar y analizar los resultados obtenidos. En los **Anexos 6 y 7** se presenta los resultados arrojados por el programa y en la *tabla 12* se resume la información obtenida del modelo

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de la duración y costo iniciales y respondiendo al requerimiento de acelerar hasta la nueva duración, el costo del proyecto se incrementó \$88.729.770 pesos, requiriendo un presupuesto total de \$1.521.904.508 pesos. La duración del proyecto pasó de 352 a 270 días, reduciéndose en 82 días. En efecto, se logró una reducción que equivale al 23,25% del tiempo total programado inicialmente. Este resultado es muy satisfactorio teniendo en cuenta que por dicha aceleración solo se genera un incremento del 6,19% del costo neto inicial presupuestado.

La reducción en días de cada actividad, el costo Crashing y el costo potencial por la pérdida de calidad (PQLC) asociado a la actividad crítica acelerada se pueden observar en la *tabla 12*.

Para obtener esta nueva duración del proyecto se debe acelerar las siguientes actividades:

- Actividad 3. “Campamento tabla 18 m2” reducir en 3 días.
- Actividad 4. “Localización-replanteo proyecto vías y puente en las diferentes etapas” reducir en 6 días.
- Actividad 11. “Demol.concreto ciclópeo” reducir en 3 días.
- Actividad 19. “Excavación para pilotes d= 2m incluido manejo de agua” reducir en 7 días
- Actividad 20. “Retiro escombros manual-volqueta <=10km” reducir 3,5 días.
- Actividad 22. “Tub concreto reforzado d=80” reducir 13 días.
- Actividad 29. “Formaleta vigas” reducir 5,5 días.
- Actividad 31. “Bombeo concreto a máquina” reducir 22 días.
- Actividad 33. “Cimbra metálica” reducir 23,5 días.
- Actividad 36. “Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa (Caisson)” reducir 23,5 días.

Al acelerar estas actividades se incurre en los siguientes riesgos:

- 11-A. “Fisuramientos y/o fracturamientos del andén existente”.
- 19-A. “Derrumbe del terreno”

- 22-A. “fraccionamiento del tubo”
- 29-B. “falta de plomo en la formaleta”.
- 31-B. “secado del concreto”.
- 33-A. “deflexión de la cimbra”.
- 36-B. “Desplazamiento del acero de refuerzo durante el vaciado”.

Teniendo en cuenta la nueva duración de las actividades presentada en la *tabla 12*, se elaboró un nuevo cronograma de actividades que se presenta en el **Anexo 8**. En este se observó que, de acuerdo a los resultados obtenidos en el modelo matemático, al acelerar el proyecto, este se podría haber ejecutado entre el 3 de octubre del 2016 y el 17 de septiembre del 2017.

Tabla 12. Resultados obtenidos de la aplicación del modelo propuesto

# Act	Descripción actividad	Duración Normal (Días)	Reducción	Duración Final	Costo Normal(\$)	Costo Crashing	Costo Potencial por la Pérdida de la Calidad (PQLC)	Costo Crashing + PQLC	Costo Neto Final
ACTIVIDADES PREVIAS									
1	Permiso ocupación de cauce	44	0	44	\$ 5.184.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 5.184.000
2	Permiso de aprovechamiento forestal	132	0	132	\$ 804.600	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 804.600
3	Campamento tabla 18 m2	11	3	8	\$ 1.981.226	\$ 502.208	\$ -	\$ 502.208	\$ 2.483.434
4	Localización-replanteo proyecto vías y puente en las diferentes etapas	16,5	6	10,5	\$ 6.509.140	\$ 2.032.026	\$ -	\$ 2.032.026	\$ 8.541.166
5	Cerramiento tela fib.tejida h=2.10m-sinb	11	0	11	\$ 3.775.684	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 3.775.684
6	Cinta seguridad preventiva a=8cm-250mts.	5,5	0	5,5	\$ 1.050.440	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1.050.440
7	Instalación provisional acueducto	5,5	0	5,5	\$ 810.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 810.000
8	Instalación provisional energía	5,5	0	5,5	\$ 1.080.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1.080.000
9	Desviación temporal cauce anchos 1 a 3 m	132	0	132	\$ 29.566.080	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 29.566.080
DEMOLICIONES Y EXCAVACIONES									
10	Demol.anden e=0.10 +retiro cra 28	5,5	0	5,5	\$ 599.640	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 599.640
11	Demol.concreto ciclópeo	11	3	8	\$ 7.165.152	\$ 815.688	\$ 1.433.030	\$ 2.248.718	\$ 9.413.870
12	Corte árbol más retiro	11	0	11	\$ 7.674.375	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 7.674.375
13	Restablecimiento arborización	5,5	0	5,5	\$ 2.334.300	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 2.334.300
14	Demol.anden e=0.10 +retiro cra 30	11	0	11	\$ 1.199.280	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1.199.280
15	Demol.pavimento concreto e=20cm +ret	5,5	0	5,5	\$ 3.270.450	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 3.270.450
16	Demol.pavimento flexible + retiro 10kms	11	0	11	\$ 3.119.302	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 3.119.302
17	Excavación a máquina sin retiro	5,5	0	5,5	\$ 347.750	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 347.750
18	Conform.compact.subrasante cbr=95 urbana	5,5	0	5,5	\$ 3.361.241	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 3.361.241
CONSTRUCCIÓN PUENTE SOBRE RIO TULUÁ									
19	Excavación para pilotes d= 2m incluido manejo de agua	33	7	26	\$ 93.895.671	\$ 423.612	\$ 2.355.000	\$ 2.778.612	\$ 96.674.283
20	Retiro escombros manual-volqueta <=10km.	16,5	3,5	13	\$ 9.539.132	\$ 1.367.660	\$ -	\$ 1.367.660	\$ 10.906.792
21	Solado espesor e=0.07m 2000 psi 14 mpa	5,5	0	5,5	\$ 1.056.572	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1.056.572
22	Tub concreto reforzado d=80"	33	13	20	\$ 35.947.635	\$ 1.138.709	\$ 17.973.818	\$ 19.112.527	\$ 55.060.162
23	Anillo en concreto	33	0	33	\$ 10.603.716	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 10.603.716
24	Caisson d=2m en concreto 28 mpa	33	0	33	\$ 95.271.888	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 95.271.888
25	Viga cabezal	38,5	0	38,5	\$ 65.544.931	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 65.544.931
26	Viga I concreto premezclado 6000 psi acelerado	38,5	0	38,5	\$ 151.644.407	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 151.644.407
27	Concreto diafragmas premezclado 4000 PSI	11	0	11	\$ 11.390.573	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 11.390.573
28	Tablero en concreto premezclado 4000 PSI	11	0	11	\$ 78.323.537	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 78.323.537
29	Formaleta vigas	38,5	5,5	33	\$ 23.481.868	\$ 93.115	\$ 4.586.583	\$ 4.679.698	\$ 28.161.566
30	Formaleta tablero	11	0	11	\$ 5.521.411	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 5.521.411
31	Bombeo concreto a máquina	82,5	22	60,5	\$ 20.119.895	\$ 1.486.672	\$ 8.047.958	\$ 9.534.630	\$ 29.654.525
32	Losa andén puente con casetón	11	0	11	\$ 25.093.375	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 25.093.375
33	Cimbra metálica	49,5	23,5	26	\$ 56.333.880	\$ 23.739.794	\$ 7.041.735	\$ 30.781.529	\$ 87.115.409
34	Montaje vigas cimbra	5,5	0	5,5	\$ 43.200.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 43.200.000
35	Cable acero alta resistencia incluye tensionamiento	38,5	0	38,5	\$ 97.583.195	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 97.583.195
36	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa (caisson)	38,5	23,5	15	\$ 76.887.720	\$ 4.708.202	\$ 10.983.960	\$ 15.692.162	\$ 92.579.882
37	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa	27,5	0	27,5	\$ 23.225.099	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 23.225.099
38	Acero estructural para arquitectura	38,5	0	38,5	\$ 76.491.296	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 76.491.296
39	Imprimación mc-70	5,5	0	5,5	\$ 457.773	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 457.773
40	Carpeta asfáltica [st]	5,5	0	5,5	\$ 8.166.797	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 8.166.797
41	Acarreo asfalto volumen compactado	5,5	0	5,5	\$ 2.218.759	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 2.218.759
42	Transporte de equipo > 50 km	5,5	0	5,5	\$ 6.174.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 6.174.000
43	Apoyo de neopreno/ dureza 60	5,5	0	5,5	\$ 3.417.872	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 3.417.872
44	Tub.pvc 4 dren.novaf	5,5	0	5,5	\$ 139.096	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 139.096
45	Retiro de demumbe	27,5	0	27,5	\$ 24.743.706	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 24.743.706
46	Estabilización y conformación de talud	27,5	0	27,5	\$ 13.558.023	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 13.558.023
BASES Y PAVIMENTOS									
47	Sub-base compac.mat.selecc.10k-invias	5,5	0	5,5	\$ 27.905.149	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 27.905.149
48	Pav.concret premezclado m=42	11	0	11	\$ 159.640.064	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 159.640.064
49	Muro concreto contención 0<h<=1.00mts	44	0	44	\$ 47.885.684	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 47.885.684
50	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa	82,5	0	82,5	\$ 23.225.099	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 23.225.099
51	Realce cámara de inspección	11	0	11	\$ 1.660.120	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1.660.120
OBRAS VARIAS									
52	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa	5,5	0	5,5	\$ 23.225.099	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 23.225.099
53	Anclaje hierro, 3/4-perf. 7/8 16-20c	5,5	0	5,5	\$ 2.604.334	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 2.604.334
54	Anclaje hierro, 1/2-perf. 5/8 10-15c	5,5	0	5,5	\$ 906.150	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 906.150
55	Ménsula concreto 4000 psi	5,5	0	5,5	\$ 6.258.553	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 6.258.553
TOTAL					\$ 1.433.174.739	\$ 36.307.686	\$ 52.422.084	\$ 88.729.770	\$ 1.521.904.508

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados arrojado por el modelo propuesto.

4.3.1 Análisis de sensibilidad

En esta sección se desea identificar los resultados arrojados por el modelo de programación cuando se establecen diferentes duraciones. Para ello se modificó el parámetro dp , que hace referencia a la duración del proyecto expresada en días. Para ello

se llevó a cabo diferentes pruebas y se recolectó en la *Tabla 13* la información del costo adicional generado por acelerar el proyecto.

Tabla 13. Recopilación de datos después de variar el parametro *dp*

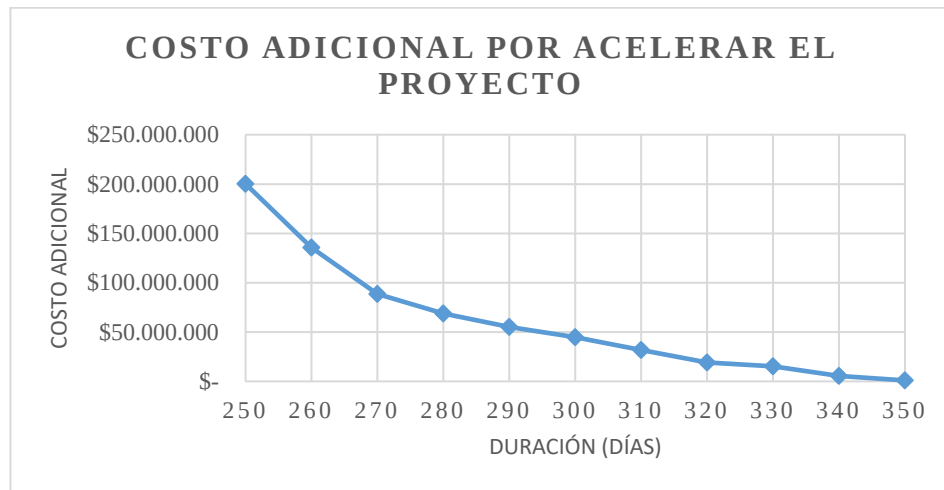
Duración del proyecto	Suma de días reducidos	Costo Adicional por Acelerar el proyecto	Costo Neto
250	136,5	\$ 200.131.864	\$ 1.633.306.603
260	120	\$ 135.562.922	\$ 1.568.737.661
270	110	\$ 88.729.771	\$ 1.521.904.510
280	92	\$ 68.775.908	\$ 1.501.950.647
290	70,5	\$ 55.105.227	\$ 1.488.279.966
300	60,5	\$ 44.769.069	\$ 1.477.943.808
310	53,5	\$ 31.932.809	\$ 1.465.107.548
320	33,5	\$ 19.229.884	\$ 1.452.404.623
330	22	\$ 15.391.638	\$ 1.448.566.377
340	17	\$ 5.618.871	\$ 1.438.793.610
350	4	\$ 1.012.148	\$ 1.434.186.887
352		\$ -	\$ 1.433.174.739

Fuente: Elaboración propia

En la primera columna de la tabla se indica la nueva duración que define para el proyecto. Al ejecutar el modelo de optimización este indica que actividades se reducen y en cuantos días. La suma de estas reducciones se muestra en la segunda columna. Nótese que, partiendo de una duración normal de 352 días, la suma de las reducciones en la duración de las actividades es superior a la reducción de la duración general del proyecto. Esto ocurre porque el proyecto caso de estudio es una obra grande y compleja que cuenta con varias rutas críticas. Algunas actividades críticas tienen como predecesoras actividades críticas y no críticas, Por esta razón, al realizar la aceleración, la simultaneidad hace que las reducciones en algunas actividades se traslapen.

La tercera columna se refiere al costo adicional que se genera al acelerar el proyecto, causado por el Crashing y el PQLC, y finalmente, en la última columna indica el costo neto del mismo.

Ilustración 6. Costo adicional por acelerar el proyecto



Fuente: Elaboración propia.

Al acelerar este proyecto, la relación entre la duración del mismo y el costo adicional generado es inversamente proporcional. El comportamiento de ambas variables en el proyecto caso de estudio se muestra en la *ilustración 6*.

La mayor reducción que soporta el proyecto al aplicar el modelo propuesto permite alcanzar una duración de 250 días. Esto se debe a las máximas reducciones que es posible aplicar en las actividades críticas, previamente definidas por el panel de expertos y por la restricción de tiempo de inicio de actividades mostradas en la *ecuación 5*. Esta ecuación hace alusión a que ninguna actividad puede iniciarse hasta que no se hayan finalizado todas sus actividades predecesoras.

Por ende, si se hubiera deseado reducir el proyecto a su extensión mínima de 250 días, es decir, el 28,9% respecto a su duración inicial, el modelo indica que se hubiese generado un costo adicional de \$200.131.864 pesos, que se traducen a un incremento del 13,96% del presupuesto planeado inicialmente.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Uno de los factores más importantes en el desarrollo de un territorio viene dado por la construcción de nuevas infraestructuras que contribuyan a mejorar la calidad de vida de sus habitantes. A pesar de ello se observa que en el Valle del Cauca los incumplimientos con los tiempos de entrega afectan en gran magnitud a los proyectos de construcción. Esta industria suele estar sujeta a mayores riesgos e imprevistos que cualquier otra industria y aunque los proyectos de construcción requieren un planeamiento exhaustivo, la construcción se caracteriza por desarrollarse en circunstancias poco predecibles que hacen difícil la correcta planificación. Estos aspectos abren grandes oportunidades para la aplicación de metodologías de aceleración de proyectos como lo es el Crashing.

El modelo propuesto es aplicable a cualquier proyecto del sector de la construcción, sea este público o privado, perteneciente al subsector de edificaciones o al de obras civiles como lo es el caso de estudio presentado, inclusive es aplicable a proyectos de otros sectores, como por ejemplo el industrial o manufacturero.

Respecto al primero objetivo es posible concluir que desde mediados del siglo XX con la aparición del método de la ruta crítica, varios autores se preocuparon por estudiar ampliamente los problemas de compensación de tiempo costo (TCTP) al tratar de acortar la duración de un proyecto. En efecto, procedimientos que usan métodos exactos como la programación lineal, no lineal, programación de enteros, programación de enteros mixtos, Branch and Bound, entre otros, se han propuesto desde ese entonces para resolver este problema de la gestión de proyectos.

Cabe resaltar la importancia de delimitar el tipo de problema a abordar con sus variables, número de recursos y objetivo con el fin de establecer el método de solución más apropiado.

Al caracterizar los métodos de solución exacta se observa que su uso se ha delimitado para problemas simples, que solo involucran dos variables, generalmente tiempo y costo (TCTP). Estos modelos donde no se tiene en cuenta la degradación de la calidad que se puede generar por la aceleración de las actividades son demasiado optimistas y alejados de la realidad. Sin embargo, es posible aumentar el campo de aplicación de los métodos exactos a problemas más complejos cuando estos se combinan con técnicas multicriterio u otras metodologías como el PQLC propuesto en el presente trabajo. De esta manera es posible tratar el problema de compensación tiempo – costo - calidad (TCQTP) que comúnmente es abordado mediante técnicas heurísticas.

Del modelo propuesto en el segundo objetivo, que es la combinación entre la metodología Crashing, un método de solución exacta como lo es la programación lineal entera mixta y un enfoque como el PQLC, es importante destacar su facilidad de aplicación a otros proyectos, su menor complejidad y su rápida ejecución computacional, comparado con otros métodos heurísticos que también son usados para resolver problemas de aceleración teniendo en cuenta la calidad.

Es importante aclarar que para ser posible la aplicación de este modelo en otros proyectos, se debe contar con mano de obra calificada y disponible para ser contratada, de igual manera los trabajadores vinculados a la obra deben estar dispuestos a trabajar horas extras y debe haber disponibilidad de maquinaria y equipo adicional al presupuestado inicialmente para ser alquilado o comprado en caso de ser requerido. En caso contrario, el modelo debe ser modificado de acuerdo a las condiciones particulares del proyecto en el cual vaya a ser aplicado.

Los resultados obtenidos en el caso de estudio demuestran que, si se hubiese implementado este modelo, el proyecto hubiese finalizado en el mes de septiembre del año 2017, lo que se traduce a una reducción del 23,25% del tiempo de ejecución estipulado en el cronograma inicial. Para ello, el modelo indica que se incurre en un aumento del 6,19% respecto a los costos iniciales. A su vez, con la disminución del tiempo de construcción del puente, se logra la mejora del tráfico vehicular en el centro del municipio de Tuluá, evitando también la afectación que se produjo a los ingresos de los comerciantes ubicados en este sector durante la temporada decembrina.

Gracias a las reuniones con los expertos se conoció que el proyecto sufrió retrasos por factores climáticos a finales del año 2016 y de acuerdo a su opinión, en ese momento, el modelo hubiese representado una gran ayuda a los ingenieros de la obra como herramienta para determinar las acciones encaminadas a generar las reducciones adecuadas por actividad que generarían un menor incremento en el costo adicional a la obra.

Por otro lado, se recomienda al momento de elegir el panel de expertos que todos estos sean partícipes del proyecto a acelerar, de esta manera se podrá obtener información más precisa sobre las formas de Crashing, su tiempo y costo asociado, al igual que los riesgos a los que están expuestas las actividades cuando son aceleradas y los PQLC. También se sugiere que las secciones de entrevistas sean grupales y no individuales con el fin de que estos trabajen en conjunto, expongan sus ideas y lleguen a acuerdos en cuanto a la información a estimar.

Además, para futuros trabajos se recomienda ampliar el alcance del modelo al incluir todos los riesgos derivados de la aceleración de las actividades, es decir, además de los riesgos de calidad que pueden derivarse de los reprocesos en las actividades se pueden incluir los riesgos de seguridad y salud en el trabajo, riesgos logísticos, mecánicos, psicosociales, entre otros aplicables de acuerdo al contexto del proyecto.

También se plantea la posibilidad para futuros trabajos de tomar en cuenta los diversos riesgos y su PQLC asociado de acuerdo a las diferentes posibles magnitudes de reducción en los tiempos de la actividad crítica. Esto implica mayor tiempo de reuniones y mayor detalle en la información solicitada al panel de expertos y una ampliación del alcance del modelo de optimización.

6 ANEXOS

Anexo 1. Relación de los costos de mano de obra utilizada en las actividades del proyecto

ITEM	ACTIVIDAD	CANT. DE CUADRILLAS	TIPO DE CUADRILLA	HOMBRES/ CUADRILLA	PRECIO HORA CUADRILLA/ UNIDAD	CANTIDAD TRABAJADA		HORAS CUADRILLA TOTAL	COSTO CUADRILLA TOTAL	DIAS LABORADOS	COSTO DÍA / CUADRILLA
						CANTIDAD	UNIDAD				
Actividades Previas											
1	Permiso ocupación de cauce	0	N/A	N/A	\$ -	3	UND	N/A	\$ -	44	\$ -
2	Permiso de aprovechamiento forestal	0	N/A	N/A	\$ -	1	UND	N/A	\$ -	132	\$ -
3	Campamento tabla 18 m2	1	M.O. Albañileria 2 Ayudante-1 OFI	3	\$ 24.810	1	UND	17	\$ 421.766	11	\$ 38.342
4	Localización-replanteo proyecto vias y puente en las diferentes etapas	2	M.O. Albañileria 2 Ayudante-1 OFI	3	\$ 24.810	10	UND	120	\$ 2.977.171	16,5	\$ 180.435
			M.O. TOPOGRAFIA 1 CADENERO-1 TOP	2	\$ 49.178			60	\$ 2.950.668		\$ 178.828
5	Cerramiento tela fib.tejida h=2.10m-sinb	1	M.O. Albañileria 1 Ayudante-1 OFI	2	\$ 20.112	484	ML	48,4	\$ 973.409	11	\$ 88.492
6	Cinta seguridad preventiva a=8cm-250mts.	2	M.O. Albañileria 1Ayudante	1	\$ 7.847	10	UND	4	\$ 31.389	5,5	\$ 5.707
			M.O. Albañileria 1 Ayudante-1 OFI	2	\$ 20.112			1,8	\$ 36.201		\$ 6.582
7	Instalación provisional acueducto	0	N/A	N/A	\$ -	5	MES	N/A	\$ -	5,5	\$ -
8	Instalación provisional energia	0	N/A	N/A	\$ -	5	MES	N/A	\$ -	5,5	\$ -
9	Desviación temporal cauce anchos 1 a 3 m	1	M.O. HIDROSANIT. 1 Ayudante-1 OFI	2	\$ 21.371	145	ML	797,5	\$ 17.043.404	132	\$ 129.117
Demoliciones y excavaciones											
10	Demol.anden e=0.10 +retiro cra 28	1	M.O. Albañileria 1 Ayudante	1	\$ 7.847	380	M2	152	\$ 1.192.787	5,5	\$ 216.870
11	Demol.concreto ciclópeo	1	M.O. Albañileria 1 Ayudante	1	\$ 7.847	32	M3	89,6	\$ 703.116	11	\$ 63.920
12	Corte arbol más retiro	1	M.O. Albañileria 1 Ayudante	1	\$ 7.847	15	UND	90	\$ 706.255	11	\$ 64.205
13	Restablecimiento arborización	1	M.O. Albañileria 1 Ayudante - 1 OFI	2	\$ 20.112	75	UND	37,5	\$ 754.191	5,5	\$ 137.126
14	Demol.anden e=0.10 +retiro cra 30	1	M.O. Albañileria 1 Ayudante	1	\$ 7.847	380	M2	152	\$ 1.192.787	11	\$ 108.435
15	Demol.pavimento concreto e=20cm +ret	1	M.O. Albañileria 1 Ayudante	1	\$ 7.847	150	M2	30	\$ 235.418	5,5	\$ 42.803
16	Demol.pavimento flexible + retiro 10kms	1	M.O. Albañileria 1 Ayudante	1	\$ 7.847	59,43	M3	59,43	\$ 466.364	11	\$ 42.397
17	Excavación a máquina sin retiro	0	N/A	N/A	\$ -	113,98	M3	N/A	\$ -	5,5	\$ -
18	Conform.compact.subrasante cbr=95 urbana	1	M.O. Albañileria 3 Ayudante	3	\$ 20.924	1139,79	M2	15,38	\$ 321.810	5,5	\$ 58.511

19	Excavación para pilotes d= 2m	1	M.O. Albanileria 2 Ayudante-1 OFI	3	24.809,76	186,72	M2	2987,53	\$ 74.119.902	33	\$ 2.246.058
20	Retiro escombros manual-volqueta	1	M.O. Albanileria 1 Ayudante	1	7.847,28	400,08	M3	508,1	\$ 3.987.203	16,5	\$ 241.649
21	Solado espesor e=0.07m 2000 psi 14 mpa	1	M.O. Albanileria 1 Ayudante-1 OFI	2	20.111,76	44	M2	13,2	\$ 265.475	5,5	\$ 48.268
22	Tub concreto reforzado d=80"	1	M.O. Alb. ACABADOS 1 Ayudante-1 OFI	2	22.629,24	15,4	ML	30,8	\$ 696.981	33	\$ 21.121
23	Anillo en concreto	1	M.O. Albanileria 2 Ayudante-1 OFI	3	24.809,76	17	UND	127,5	\$ 3.163.244	33	\$ 95.856
24	Caisson d=2m en concreto 28 mpa	2	M.O. Albanileria 2 Ayudante	2	15.694,56	117,35	M3	469,4	\$ 7.367.026	33	\$ 223.243
			M.O. Albanileria 1 Ayudante-1 OFI	2	20.111,76			469,4	\$ 9.440.460		\$ 286.075
25	Viga cabezal	1	M.O. Albanileria 2 Ayudante-1 OFI	3	24.809,76	73,31	M3	733,1	\$ 18.188.035	38,5	\$ 472.416
26	Viga I concreto premezclado 6000	1	M.O. Albanileria 2 Ayudante-1 OFI	3	24.809,76	118,78	M3	1532,26	\$ 38.015.003	38,5	\$ 987.403
27	Concreto diafragmas premezclado	1	M.O. Albanileria 2 Ayudante-1 OFI	3	24.809,76	10,88	M3	119,625	\$ 2.967.868	11	\$ 269.806
28	Tablero en concreto premezclado	1	M.O. Albanileria 3 Ayudante-1 OFI	4	35.806,32	331	M2	695,1	\$ 24.888.973	11	\$ 2.262.634
29	Formaleta vigas	1	M.O. Albanileria 2 Ayudante-1 OFI	3	24.809,76	139,02	M2	93,83	\$ 2.327.900	38,5	\$ 60.465
30	Formaleta tablero	0	N/A	N/A		331	M2		\$ -	11	\$ -
31	Bombeo concreto a máquina	0	N/A	N/A		365	M3		\$ -	82,5	\$ -
32	Losa anden puente con casetón	1	M.O. Albanileria 3 Ayudante-1 OFI	4	35.806,32	132,4	M2	264,8	\$ 9.481.514	11	\$ 861.956
33	Cimbra metálica	0	N/A	N/A		1	MES		\$ -	49,5	\$ -
34	Montaje vigas cimbra	0	N/A	N/A		4	UND		\$ -	5,5	\$ -
35	Cable acero alta resistencia incluye tensionamiento	0	Subcontrato			129078,3	M/TON	N/A	\$ -	38,5	\$ -
36	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa (caisson)	1	M.O. Albanileria 1 Ayudante	1	7.847,28	17602,5	KLS	1936,27	\$ 15.194.453	38,5	\$ 394.661
37	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa	1	M.O. Albanileria 1 Ayudante	1	7.847,28	51430,25	KLS	5657,32	\$ 44.394.574	27,5	\$ 1.614.348
38	Acero estructural para arquitectura	3	M.O. Albanileria 2 Ayudante	2	15.694,56	6307	KLS	126,14	\$ 1.979.712	38,5	\$ 51.421
			M.O. METALISTERIA 1 Ayudante-1 OFI	2	21.401,28			283,81	\$ 6.073.897		\$ 157.764
			M.O. PINTURA 1 Ayudante-1 OFI	2	18.948,60			126,14	\$ 2.390.176		\$ 62.083
39	Imprimación mc-70	1	M.O. Albanileria 1 Ayudante	1	7.847,28	198,6	M2	11,38	\$ 89.302	5,5	\$ 16.237
40	Carpeta asfáltica [st]	1	M.O. Albanileria 5 Ayudante-1 OFI	6	45.733,68	15,89	M3	3,18	\$ 145.433	5,5	\$ 26.442
41	Acarreo asfalto volumen compactado	0	N/A	N/A		1557,02	M3K	N/A	\$ -	5,5	\$ -
42	Transporte de equipo > 50 km	0	N/A	N/A		5880	T/K	N/A	\$ -	5,5	\$ -
43	Apoyo de neopreno dureza 60	1	M.O. Albanileria 1 Ayudante-1 OFI	2	20.111,76	8	UND	2,4	\$ 48.268	5,5	\$ 8.776
44	Tub.pvc 4 dren.novaf	1	M.O. HIDROSANIT. 1 Ayudante-1 OFI	2	21.371,04	4	ML	1,6	\$ 34.194	5,5	\$ 6.217
45	Retiro de derrumbe	1	M.O. Albanileria 2 Ayudante-1 OFI	3	24.809,76	108,17	M3	757,19	\$ 18.785.702	27,5	\$ 683.116
46	Estabilizacion y conformacion de	1	M.O. Albanileria 3 Ayudante-1 OFI	4	34.209,00	78,17	M3	156,34	\$ 5.348.235	27,5	\$ 194.481

ITEM	ACTIVIDAD	CANT. DE CUADRILLAS	TIPO DE CUADRILLA	HOMBRES/ CUADRILLA	PRECIO HORA CUADRILLA/ UNIDAD	CANTIDAD TRABAJADA		HORAS CUADRILLA TOTAL	COSTO CUADRILLA TOTAL	DIAS LABORADOS	COSTO DÍA / CUADRILLA
						CANTIDAD	UNIDAD				
47	Sub-base compac.mat.selecc.10k-invias no	1	M.O. Albanileria 3 Ayudante	3	\$ 20.924	325,25	M3	14,96	\$ 313.022	5,5	\$ 56.913
48	Pav.concret premezclado mr=42	1	M.O. Albanileria 5 Ayudante-1 OFI	6	\$ 45.734	286,22	M3	80,14	\$ 3.663.097	11	\$ 333.191
49	Muro concreto contencion 0<h<=1.00mts	1	M.O. Albanileria 3 Ayudante-1 OFI	4	\$ 35.806	84,7	M3	423,5	\$ 15.163.977	44	\$ 344.636
50	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa	1	M.O. Albanileria1 Ayudante	1	\$ 7.847	5929,31	KLS	652,22	\$ 5.118.153	82,5	\$ 62.038
51	Realce camara de inspeccion	1	M.O. Albanileria 2 Ayudante-1 OFI	3	\$ 24.810	4	UND	24	\$ 595.434	11	\$ 54.130
Obras varias											
52	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa	1	M.O. Albanileria 1 Ayudante	1	\$ 7.847	583,32	KLS	64,16	\$ 503.481	5,5	\$ 91.542
53	Anclaje hierro ,3/4"-perf. ,7/8" 16-20c	2	M.O. Albanileria 1 Ayudante-1 OFI	2	\$ 20.112	122	PTO	18,3	\$ 368.045	5,5	\$ 66.917
			M.O. CARP.TALLER 1 Ayudante-1 OFI	2	\$ 21.371			19,52	\$ 417.163		\$ 75.848
54	Anclaje hierro ,1/2"-perf. ,5/8" 10-15c	2	M.O. Albanileria 1 Ayudante-1 OFI	2	\$ 20.112	50	PTO	7,5	\$ 150.838	5,5	\$ 27.425
			M.O. CARP.TALLER 1 Ayudante-1 OFI	2	\$ 21.371			8	\$ 170.968		\$ 31.085
55	Mensula concreto 4000 psi	1	M.O. Albanileria 2 Ayudante-1 OFI	3	\$ 24.810	7	M3	70	\$ 1.736.683	5,5	\$ 315.761

Fuente: Elaboración propia con base en el análisis de precios unitarios (APU) del proyecto

Anexo 2. Relación de los costos de maquinaria y equipos utilizados en las actividades del proyecto

ITEM	DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	CANT. REQUERIDA	DESCRIPCION DEL EQUIPO	UND DEL EQUIPO	PRECIO UNIT	CANT POR UND DE MEDIDA	PRECIO POR UND DE MEDIDA	CANT TOTAL	VALOR TOTAL
Actividades previas										
1	Permiso ocupación de cauce	UND	3,00	N/A						
2	Permiso de aprovechamiento forestal	UND	1,00	N/A						
3	Campamento tabla 18 m2	UND	1,00	Volqueta transporte mat.petreos 1-10km	M3	\$ 7.560	2	\$ 15.120	2	\$ 15.120
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	3	\$ 5.375	3	\$ 5.375
4	Localización-replanteo proyecto vías y puente en las diferentes etapas	UND	10,00	Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	2	\$ 3.583	20	\$ 35.834
5	Cerramiento tela fib.tejida h=2.10m-sinb	ML	484,00	Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,15	\$ 262	70,66	\$ 126.610
6	Cinta seguridad preventiva a=8cm-250mts.	UND	10,00	Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,23	\$ 419	2,34	\$ 4.191
7	Instalación provisional acueducto	MES	5,00	N/A						
8	Instalación provisional energia	MES	5,00	N/A						
9	Desviación temporal cauce anchos 1 a 3 m	ML	145,00	Retroexcavadora de oruga	HRS	\$ 142.139	0,6	\$ 85.283	87	\$ 12.366.076
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,6	\$ 1.080	87,44	\$ 156.658
Demoliciones y excavaciones										
10	Demol.anden e=0.10 +retiro cra 28	M2	190,00	Volqueta 5 m3	VJE	\$ 46.980	0,03	\$ 1.409	5,7	\$ 267.786
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,1	\$ 186	19,72	\$ 35.333
11	Demol.concreto ciclópeo	M3	32,00	Compresor de dos martillos	HRS	\$ 99.360	1,9	\$ 188.784	60,8	\$ 6.041.088
				Volqueta 5 m3	VJE	\$ 46.980	0,28	\$ 13.154	8,96	\$ 420.941
12	Corte arbol más retiro	UND	15,00	Subcontrato corte de arboles	UND	\$ 410.400	1	\$ 410.400	15	\$ 6.156.000
				Volqueta 5 m3	VJE	\$ 46.980	1	\$ 46.980	15	\$ 704.700
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	4	\$ 7.162	59,96	\$ 107.425
13	Restablecimiento arborización	UND	75,00	Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,2	\$ 355	14,85	\$ 26.607
14	Demol.anden e=0.10 +retiro cra 30	M3	190,00	Volqueta 5 m3	VJE	\$ 46.980	0,03	\$ 1.409	5,7	\$ 267.786
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,1	\$ 186	19,72	\$ 35.333
15	Demol.pavimento concreto e=20cm +ret	M2	150,00	Compresor de dos martillos	HRS	\$ 99.360	0,2	\$ 19.872	30	\$ 2.980.800
				Volqueta(acarreo)	M3K	\$ 1.134	0,24	\$ 272	36	\$ 40.824
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,05	\$ 90	7,5	\$ 13.437

ITEM	DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	CANT. REQUERIDA	DESCRIPCION DEL EQUIPO	UND DEL EQUIPO	PRECIO UNIT	CANT POR UND DE MEDIDA	PRECIO POR UND DE MEDIDA	CANT TOTAL	VALOR TOTAL
16	Demol.pavimento flexible + retiro 10kms	M3	59,43	Compresor de dos martillos	HRS	\$ 99.360	0,3	\$ 29.808	17,83	\$ 1.771.489
				Retroexcavadora jd-510	HRS	\$ 101.693	0,03	\$ 3.051	1,78	\$ 181.308
				Volqueta 5 m3	VJE	\$ 46.980	0,25	\$ 11.745	14,86	\$ 698.005
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,02	\$ 36	1,19	\$ 2.129
17	Excavación a máquina sin retiro	M3	113,98	Retroexcavadora jd-510	HRS	\$ 101.693	0,03	\$ 3.051	3,42	\$ 347.725
18	Conform.compact.subrasante cbr=95 urbana	M2	1139,79	Motoniveladora cat-12-f	HRS	\$ 112.320	0,01	\$ 1.123	11,4	\$ 1.280.212
				Vibrocompactador ca-15	HRS	\$ 97.092	0,01	\$ 971	11,4	\$ 1.106.645
				Carro tanque agua	DIA	\$ 286.200	0	\$ 572	2,28	\$ 652.416
Construcción puente sobre el rio Tulúa										
19	Excavación para pilotes d= 2m incluido manejo de agua	M3	186,72	Andamio certificado	U/D	\$ 16.200	3	\$ 48.600	560,16	\$ 9.074.625
				Retroexcavadora jd-510	HRS	\$ 101.693	0,04	\$ 3.559	6,54	\$ 664.584
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	30	\$ 53.752	5601,62	\$ 10.036.536
20	Retiro escombros manual-volqueta <=10km.	M3	400,08	Volqueta 5 m3	VJE	\$ 46.980	0,28	\$ 13.154	112,02	\$ 5.262.826
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,4	\$ 722	161,23	\$ 288.883
21	Solado espesor e=0.07m 2000 psi 14 mpa	M2	44,00	Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,04	\$ 73	1,8	\$ 3.232
22	Tub concreto reforzado d=80"	ML	15,40	Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	1	\$ 1.792	15,4	\$ 27.592
				Grúa telescópica hidráulica 20 ton.	HRS	\$ 75.114	1,5	\$ 112.671	23,1	\$ 1.735.133
				Retroexcavadora jd-510	HRS	\$ 101.693	0,83	\$ 84.741	12,83	\$ 1.305.005
23	Anillo en concreto	UND	17,00	Formaleta	UND	\$ 17.242	1	\$ 17.242	17	\$ 293.117
24	Caisson d=2m en concreto 28 mpa	M3	117,35	Manejo de agua	HRS	\$ 77.760	1	\$ 77.760	117,35	\$ 9.125.136
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	1	\$ 1.792	117,35	\$ 210.258
25	Viga cabezal	M3	73,31	Vibrador eléctrico	DIA	\$ 37.584	0,3	\$ 11.275	21,99	\$ 826.585
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,5	\$ 902	36,9	\$ 66.109

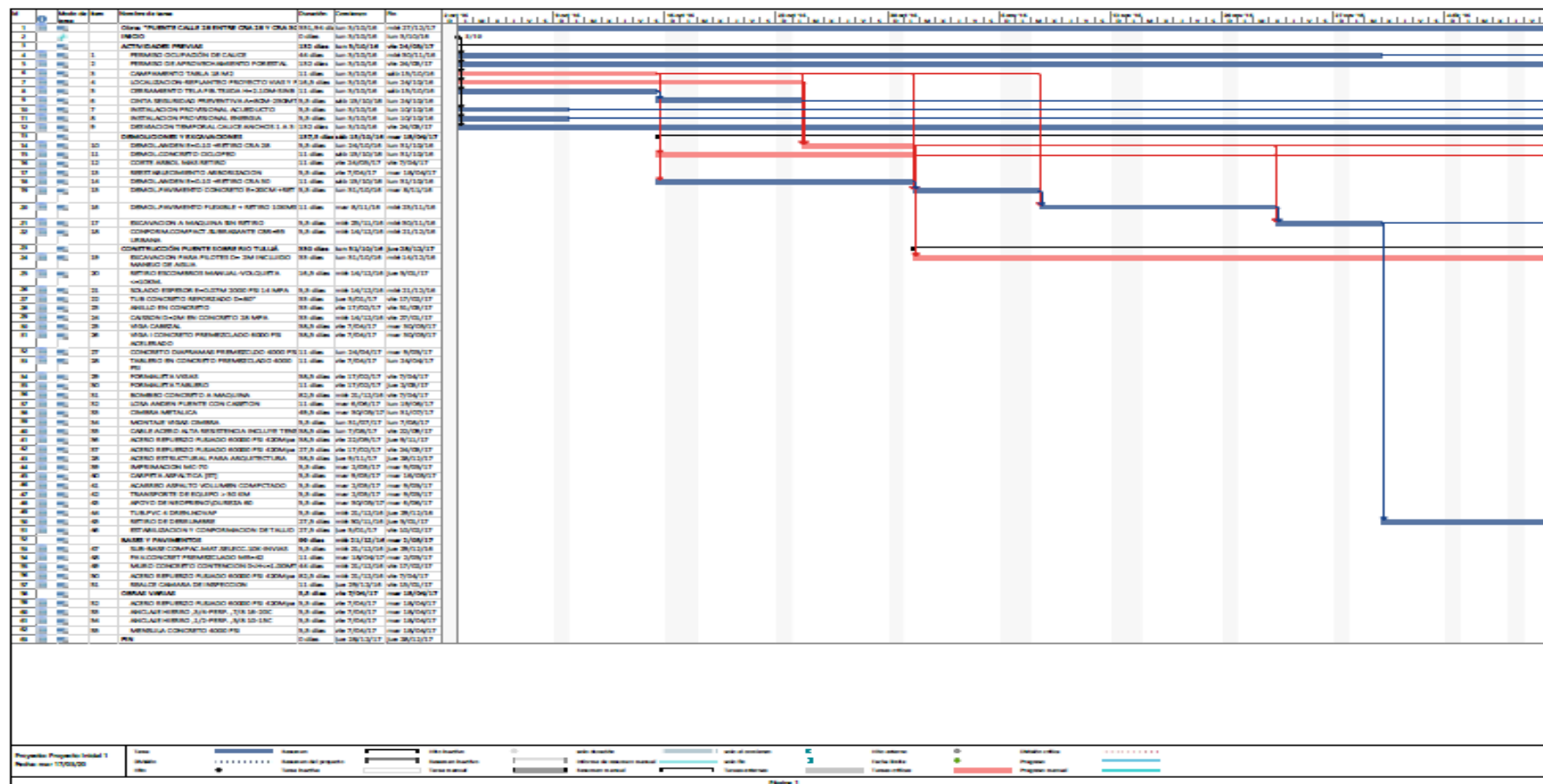
26	Viga I concreto premezclado 6000 psi acelerado	M3	118,78	Vibrador eléctrico	DIA	\$	37.584	0,5	\$	18.792	59,39	\$	2.232.114
				Herramienta menor	GLB	\$	1.792	1	\$	1.792	118,78	\$	212.821
				Andamio certificado	U/D	\$	16.200	4	\$	64.800	475,12	\$	7.696.944
27	Concreto diafragmas premezclado 4000 PSI	M3	10,88	Vibrador eléctrico	DIA	\$	37.584	0,5	\$	18.792	5,44	\$	204.363
				Herramienta menor	GLB	\$	1.792	1	\$	1.792	10,88	\$	19.485
				Andamio certificado	U/D	\$	16.200	4	\$	64.800	43,5	\$	704.700
28	Tablero en concreto premezclado 4000 PSI	M2	331,00	Formaleta para entrepiso	M2	\$	4.188	1	\$	4.188	331	\$	1.386.307
				Vibrador eléctrico	DIA	\$	37.584	0,5	\$	18.792	165,5	\$	6.220.152
				Herramienta menor	GLB	\$	1.792	1	\$	1.792	331	\$	593.059
29	Formaleta vigas	M2	139,02	Herramienta menor	GLB	\$	1.792	0,2	\$	363	28,14	\$	50.414
				Cercha metálica de 3mts	DIA	\$	157	35	\$	5.481	4865,7	\$	761.969
30	Formaleta tablero	M2	331,00	Cama baja	T/K	\$	1.134	1	\$	1.134	331	\$	375.354
				Herramienta menor	GLB	\$	1.792	0,07	\$	125	23,04	\$	41.276
				Taco metálico extensión de 2.0m a 3.30mt	DIA	\$	540	4,5	\$	2.430	1489,5	\$	804.330
				Tablero o plaqueta de 1.4mt x 0.7mt	DIA	\$	298	30	\$	8.942	9930	\$	2.959.934
				Viga celosía de 3mts	DIA	\$	540	7,5	\$	4.050	2482,5	\$	1.340.550
31	Bombeo concreto a máquina	M3	365,00	N/A									
32	Losa anden puente con casetón	M2	132,40	Formaleta para entrepiso	M2	\$	4.188	1	\$	4.188	132,4	\$	554.523
				Vibrador eléctrico	DIA	\$	37.584	0,5	\$	18.792	66,2	\$	2.488.061
33	Cimbra metálica	MES	1,00	Cama baja	T/K	\$	2.160.000	1	\$	2.160.000	1	\$	2.160.000
				Herramienta menor	GLB	\$	1.512	15	\$	22.680	15	\$	22.680
				Cimbra metálica	UND	\$	13.500.000	4	\$	54.000.000	4	\$	54.000.000
				Tablero o plaqueta de 1.4mt x 0.7mt	UN/MES	\$	756	200	\$	151.200	200	\$	151.200
34	Montaje vigas cimbra	UND	4,00	Subcontrato instalación cimbra	GB	\$	10.800.000	1	\$	10.800.000	4	\$	43.200.000

ITEM	DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	CANT. REQUERIDA	DESCRIPCION DEL EQUIPO	UND DEL EQUIPO	PRECIO UNIT	CANT POR UND DE MEDIDA	PRECIO POR UND DE MEDIDA	CANT TOTAL	VALOR TOTAL
38	Acero estructural para arquitectura	KLS	6307,00	Soldador eléctrico	DIA	\$ 30.780	0,01	\$ 277	56,76	\$ 1.747.165
				Pluma grúa 500 kilos	DIA	\$ 43.200	0,02	\$ 864	126,14	\$ 5.449.248
				Equipo sandblasting-granalladora arena	HRS	\$ 51.840	0,02	\$ 881	107,22	\$ 5.558.233
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,01	\$ 15	51,72	\$ 92.650
				Oxicorte (oxígeno-acetileno)	DIA	\$ 29.700	0	\$ 30	6,31	\$ 187.318
				Andamio certificado	U/D	\$ 16.200	0,24	\$ 3.888	1513,68	\$ 24.521.616
39	Imprimación mc-70	M2	198,60	Carrotanque-irigador	HRS	\$ 38.880	0,01	\$ 350	1,79	\$ 69.494
				Compresor	HRS	\$ 19.980	0	\$ 80	0,79	\$ 15.872
40	Carpeta asfáltica [st]	M3	15,89	Vibrocompactador ca-15	HRS	\$ 97.092	0,15	\$ 14.564	2,38	\$ 231.390
				Terminadora de asfalto	HRS	\$ 114.480	0,15	\$ 17.172	2,38	\$ 272.829
				Compactador de llanta	HRS	\$ 81.000	0,15	\$ 12.150	2,38	\$ 193.039
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	1	\$ 1.792	15,89	\$ 28.467
41	Acarreo asfalto volumen compactado	M3K	1557,02	Volqueta(acarreo)	M3K	\$ 1.134	1,26	\$ 1.425	1955,93	\$ 2.218.023
42	Transporte de equipo > 50 km	T/K	5880,00	Cama baja	T/K	\$ 1.134	1	\$ 1.050	5880	\$ 6.174.000
43	Apoyo de neopreno\ dureza 60	UND	8,00	N/A						
44	Tub.pvc 4 dren.novaf	ML	4,00	Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,05	\$ 93	0,21	\$ 371
45	Retiro de derrumbe	M3	108,17	Andamio certificado	U/D	\$ 16.200	1	\$ 16.200	108,17	\$ 1.752.354
				Motobomba de 3"	DIA	\$ 54.000	0,3	\$ 16.200	32,45	\$ 1.752.354
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.512	15	\$ 22.680	1622,55	\$ 2.453.296
46	Estabilizacion y conformacion de talud	M3	78,17	Mezcladora de 9 pies cubicos	DIA	\$ 41.904	0,08	\$ 3.352	6,25	\$ 262.018
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.512	3,5	\$ 5.293	273,63	\$ 413.723

ITEM	DESCRIPCION DE LA ACTIVIDAD	UNIDAD DE MEDIDA	CANT. REQUERIDA	DESCRIPCION DEL EQUIPO	UND DEL EQUIPO	PRECIO UNIT	CANT POR UND DE MEDIDA	PRECIO POR UND DE MEDIDA	CANT TOTAL	VALOR TOTAL
Bases y pavimentos										
47	Sub-base compac.mat.selecc.10k-invias no	M3	325,25	Motoniveladora cat-12-f	HRS	\$ 112.320	0,05	\$ 5.167	14,96	\$ 1.680.476
				Vibrocompactador ca-15	HRS	\$ 97.092	0,09	\$ 8.738	29,27	\$ 2.842.126
				Volqueta(acarreo)	M3K	\$ 1.134	13	\$ 14.742	4228,25	\$ 4.794.836
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,05	\$ 85	15,51	\$ 27.796
				Carrotanque agua	DIA	\$ 286.200	0	\$ 286	0,33	\$ 93.087
48	Pav.concret premezclado mr=42	M3	286,22	Regla vibratoria de 4mts	DIA	\$ 37.260	0,08	\$ 2.981	22,9	\$ 853.165
				Cortadora de pavimento	ML	\$ 5.262	1,1	\$ 5.788	314,84	\$ 1.656.621
				Equipo de acabado superficial	DIA	\$ 22.680	0,03	\$ 567	7,16	\$ 162.287
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,5	\$ 894	142,85	\$ 255.949
				Formaleta met.pavimento 0.15x0.20x3mts	DIA	\$ 1.404	0,15	\$ 211	42,93	\$ 60.278
49	Muro concreto contencion 0<h<=1.00mts	M3	84,70	Vibrador electrico	DIA	\$ 37.584	0,04	\$ 1.503	3,39	\$ 127.341
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	2	\$ 3.580	169,25	\$ 303.244
				Tablero o plaqueta de 1.4mt x 0.7mt	DIA	\$ 298	7,33	\$ 2.185	620,88	\$ 185.072
				Andamio certificado	U/D	\$ 16.200	2	\$ 32.400	169,41	\$ 2.744.423
50	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa	KLS	5929,31	N/A						
51	Realce camara de inspeccion	UND	4,00	Formaleta	UND	\$ 17.242	2	\$ 34.484	8	\$ 137.938
				Retroexcavadora jd-510	HRS	\$ 101.693	1	\$ 101.693	4	\$ 406.771
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,06	\$ 108	0,24	\$ 430
Obras varias										
52	Acero refuerzo flejado 60000 psi 420mpa	KLS	583,32	N/A						
53	Anclaje hierro ,3/4"-perf. ,7/8" 16-20c	PTO	122,00	Taladro percutor tipo hilti	DIA	\$ 57.780	0,06	\$ 3.467	7,32	\$ 422.950
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,46	\$ 830	56,49	\$ 101.206
54	Anclaje hierro ,1/2"-perf. ,5/8" 10-15c	PTO	50,00	Taladro percutor tipo hilti	DIA	\$ 57.780	0,06	\$ 3.467	3	\$ 173.340
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,46	\$ 830	23,15	\$ 41.478
55	Mensula concreto 4000 psi	M3	7,00	Vibrador eléctrico	DIA	\$ 37.584	0,3	\$ 11.275	2,1	\$ 78.926
				Herramienta menor	GLB	\$ 1.792	0,5	\$ 902	3,52	\$ 6.312

Fuente: Elaboración propia con base en el análisis de precios unitarios (APU) del proyecto

Anexo 3. Cronograma inicial de actividades e identificación de Actividades críticas



Fuente: Elaboración propia

Anexo 4 Actividades Críticas

Nombre	Comienzo	Fin	% completado	Trabajo restante	Nombres de los recursos
INICIO	lun 3/10/16	lun 3/10/16	0%	0 horas	
CAMPAMENTO TABLA 18 M2	lun 3/10/16	sáb 15/10/16	0%	0 horas	
LOCALIZACION-REPLANTEO PROYECTO VIAS Y PUENTE EN LAS DIFERENTES ETAPAS	lun 3/10/16	lun 24/10/16	0%	0 horas	
DEMOLANDEN E=0.10 +RETIRO CRA 28	lun 24/10/16	lun 31/10/16	0%	0 horas	
DEMOL.CONCRETO CICLOPEO	sáb 15/10/16	lun 31/10/16	0%	0 horas	
EXCAVACION PARA PILOTES D= 2M INCLUIDO MANEJO DE AGUA	lun 31/10/16	mié 14/12/16	0%	0 horas	
RETIRO ESCOMBROS MANUAL-VOLQUETA <=10KM.	mié 14/12/16	jue 5/01/17	0%	0 horas	
SOLADO ESPESOR E=0.07M 2000 PSI 14 MPA	mié 14/12/16	mié 21/12/16	0%	0 horas	
TUB CONCRETO REFORZADO D=80"	jue 5/01/17	vie 17/02/17	0%	0 horas	
VIGA CABEZAL	vie 7/04/17	mar 30/05/17	0%	0 horas	
VIGA I CONCRETO PREMEZCLADO 6000 PSI ACELERADO	vie 7/04/17	mar 30/05/17	0%	0 horas	
FORMALETA VIGAS	vie 17/02/17	vie 7/04/17	0%	0 horas	
BOMBEO CONCRETO A MAQUINA	mié 21/12/16	vie 7/04/17	0%	0 horas	
CIMBRA METALICA	mar 30/05/17	lun 31/07/17	0%	0 horas	
MONTAJE VIGAS CIMBRA	lun 31/07/17	lun 7/08/17	0%	0 horas	
CABLE ACERO ALTA RESISTENCIA INCLUYE TENSIONAMIENTO	lun 7/08/17	vie 22/09/17	0%	0 horas	
ACERO REFUERZO FLEJADO 60000 PSI 420Mpa (CAISSON)	vie 22/09/17	jue 9/11/17	0%	0 horas	
ACERO ESTRUCTURAL PARA ARQUITECTURA	jue 9/11/17	jue 28/12/17	0%	0 horas	
FIN	jue 28/12/17	jue 28/12/17	0%	0 horas	

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5. Formulación modelo matemático

• Función objetivo:

Minizar costos

$$\begin{aligned}
 = & \{[(167403 \times X_3) + (338671 \times X_4) + (271896 \times X_{11}) \\
 & + (60516 \times X_{19}) + (390760 \times X_{20}) + (108252 \times X_{21}) \\
 & + (87593 \times X_{22}) + (269478 \times X_{25}) + (269479 \times X_{26}) \\
 & + (16930 \times X_{29}) + (67576 \times X_{31}) + (1010204 \times X_{33}) \\
 & + (200349 \times X_{36}) + (348756 \times X_{38})] \\
 & \times [(255000 \times W_{10}) + (255000 \times W_{11}) + (133875 \times W_{19}) \\
 & + (327544 \times W_{21}) + (17973818 \times W_{22}) + (32772466 \times W_{25}) \\
 & + (37911102 \times W_{26}) + (4586583 \times W_{29}) + (8047958 \times W_{31}) \\
 & + (7041735 \times W_{33}) + (5400000 \times W_{34}) + (39033278 \times W_{32}) \\
 & + (10983960 \times W_{36}) + (45894778 \times W_{38})]\}
 \end{aligned}$$

• Restricciones:

- Reducción máxima de tiempo en las actividades:

	$X_{17} \leq 0 \times W_{17}$	$X_{34} \leq 0 \times W_{34}$
$X_1 \leq 0 \times W_1$	$X_{18} \leq 0 \times W_{18}$	$X_{35} \leq 0 \times W_{35}$
$X_2 \leq 0 \times W_2$	$X_{19} \leq 7 \times W_{19}$	$X_{36} \leq 23,5 \times W_{36}$
$X_3 \leq 3 \times W_3$	$X_{20} \leq 8,5 \times W_{20}$	$X_{37} \leq 0 \times W_{37}$
$X_4 \leq 6,5 \times W_4$	$X_{21} \leq 2,5 \times W_{21}$	$X_{38} \leq 13,5 \times W_{38}$
$X_5 \leq 0 \times W_5$	$X_{22} \leq 13 \times W_{22}$	$X_{39} \leq 0 \times W_{39}$
$X_6 \leq 0 \times W_6$	$X_{23} \leq 0 \times W_{23}$	$X_{40} \leq 0 \times W_{40}$
$X_7 \leq 0 \times W_7$	$X_{24} \leq 0 \times W_{24}$	$X_{41} \leq 0 \times W_{41}$
$X_8 \leq 0 \times W_8$	$X_{25} \leq 14,5 \times W_{25}$	$X_{42} \leq 0 \times W_{42}$
$X_9 \leq 0 \times W_9$	$X_{26} \leq 14,5 \times W_{26}$	$X_{43} \leq 0 \times W_{43}$
$X_{10} \leq 0 \times W_{10}$	$X_{27} \leq 0 \times W_{27}$	$X_{44} \leq 0 \times W_{44}$
$X_{11} \leq 3 \times W_{11}$	$X_{28} \leq 0 \times W_{28}$	$X_{45} \leq 0 \times W_{45}$
$X_{12} \leq 0 \times W_{12}$	$X_{29} \leq 18,5 \times W_{29}$	$X_{47} \leq 0 \times W_{47}$
$X_{13} \leq 0 \times W_{13}$	$X_{30} \leq 0 \times W_{30}$	$X_{48} \leq 0 \times W_{48}$
$X_{14} \leq 0 \times W_{14}$	$X_{31} \leq 42,5 \times W_{31}$	$X_{49} \leq 0 \times W_{49}$
$X_{15} \leq 0 \times W_{15}$	$X_{32} \leq 0 \times W_{32}$	$X_{50} \leq 0 \times W_{50}$
$X_{16} \leq 0 \times W_{16}$	$X_{33} \leq 24,5 \times W_{33}$	$X_{51} \leq 0 \times W_{51}$

$$X_{52} \leq 0 \times W_{52}$$

$$X_{54} \leq 0 \times W_{54}$$

$$X_{53} \leq 0 \times W_{53}$$

$$X_{55} \leq 0 \times W_{55}$$

- **Tiempo de inicio de las actividades:**

$$Y_1 = 0$$

$$Y_2 = 0$$

$$Y_3 = 0$$

$$Y_4 = 0$$

$$Y_5 = 0$$

$$Y_6 - Y_5 + X_5 = D_5$$

$$Y_7 = 0$$

$$Y_8 = 0$$

$$Y_9 = 0$$

$$Y_{10} - Y_3 + X_3 = D_3$$

$$Y_{10} - Y_4 + X_4 = D_4$$

$$Y_{11} - Y_3 + X_3 = D_3$$

$$Y_{12} - Y_2 + X_2 = D_2$$

$$Y_{13} - Y_{11} + X_{11} = D_{11}$$

$$Y_{13} - Y_{12} + X_{12} = D_{12}$$

$$Y_{14} - Y_3 + X_3 = D_3$$

$$Y_{15} - Y_3 + X_3 = D_3$$

$$Y_{15} - Y_{14} + X_{14} = D_{14}$$

$$Y_{15} - Y_{10} + X_{10} = D_{10}$$

$$Y_{16} - Y_3 + X_3 = D_3$$

$$Y_{16} - Y_{15} + X_{15} = D_{15}$$

$$Y_{17} - Y_{10} + X_{10} = D_{10}$$

$$Y_{17} - Y_{11} + X_{11} = D_{11}$$

$$Y_{17} - Y_{16} + X_{16} = D_{16}$$

$$Y_{18} - Y_{17} + X_{17} = D_{17}$$

$$Y_{18} - Y_{19} + X_{19} = D_{19}$$

$$Y_{19} - Y_{10} + X_{10} = D_{10}$$

$$Y_{19} - Y_{11} + X_{11} = D_{11}$$

$$Y_{20} - Y_{10} + X_{10} = D_{10}$$

$$Y_{20} - Y_{11} + X_{11} = D_{11}$$

$$Y_{20} - Y_{17} + X_{17} = D_{17}$$

$$Y_{20} - Y_{19} + X_{19} = D_{19}$$

$$Y_{21} - Y_{17} + X_{17} = D_{17}$$

$$Y_{21} - Y_{19} + X_{19} = D_{19}$$

$$Y_{22} - Y_{17} + X_{17} = D_{17}$$

$$Y_{22} - Y_{19} + X_{19} = D_{19}$$

$$Y_{22} - Y_{20} + X_{20} = D_{20}$$

$$Y_{23} - Y_{21} + X_{21} = D_{21}$$

$$Y_{23} - Y_{22} + X_{22} = D_{22}$$

$$Y_{23} - Y_{24} + X_{24} = D_{24}$$

$$Y_{24} - Y_{17} + X_{17} = D_{17}$$

$$Y_{24} - Y_{19} + X_{19} = D_{19}$$

$$Y_{25} - Y_{29} + X_{29} = D_{29}$$

$$Y_{25} - Y_{30} + X_{30} = D_{30}$$

$$Y_{25} - Y_{31} + X_{31} = D_{31}$$

$$Y_{25} - Y_{37} + X_{37} = D_{37}$$

$$Y_{25} - Y_{23} + X_{23} = D_{23}$$

$$Y_{26} - Y_{29} + X_{29} = D_{29}$$

$$Y_{26} - Y_{30} + X_{30} = D_{30}$$

$$Y_{26} - Y_{31} + X_{31} = D_{31}$$

$$Y_{26} - Y_{37} + X_{37} = D_{37}$$

$$Y_{26} - Y_{23} + X_{23} = D_{23}$$

$$Y_{27} - Y_{28} + X_{28} = D_{28}$$

$$Y_{28} - Y_{29} + X_{29} = D_{29}$$

$$Y_{28} - Y_{30} + X_{30} = D_{30}$$

$$Y_{29} - Y_{24} + X_{24} = D_{24}$$

$$Y_{29} - Y_{21} + X_{21} = D_{21}$$

$$Y_{29} - Y_{22} + X_{22} = D_{22}$$

$$Y_{30} - Y_{24} + X_{24} = D_{24}$$

$$Y_{30} - Y_{21} + X_{21} = D_{21}$$

$$Y_{30} - Y_{22} + X_{22} = D_{22}$$

$$Y_{31} - Y_{21} + X_{21} = D_{21}$$

$$Y_{32} - Y_{31} + X_{31} = D_{31}$$

$$Y_{32} - Y_{43} + X_{43} = D_{43}$$

$$Y_{32} - Y_{50} + X_{50} = D_{50}$$

$$Y_{33} - Y_{25} + X_{25} = D_{25}$$

$$Y_{33} - Y_{26} + X_{26} = D_{26}$$

$$Y_{34} - Y_{25} + X_{25} = D_{25}$$

$$Y_{34} - Y_{26} + X_{26} = D_{26}$$

$$Y_{34} - Y_{33} + X_{33} = D_{33}$$

$$Y_{35} - Y_{25} + X_{25} = D_{25}$$

$$Y_{35} - Y_{26} + X_{26} = D_{26}$$

$$Y_{35} - Y_{34} + X_{34} = D_{34}$$

$$Y_{36} - Y_{21} + X_{21} = D_{21}$$

$$Y_{36} - Y_{22} + X_{22} = D_{22}$$

$$Y_{36} - Y_{24} + X_{24} = D_{24}$$

$$Y_{36} - Y_{35} + X_{35} = D_{35}$$

$$Y_{37} - Y_{21} + X_{21} = D_{21}$$

$$Y_{37} - Y_{22} + X_{22} = D_{22}$$

$$Y_{37} - Y_{24} + X_{24} = D_{24}$$

$$Y_{38} - Y_{27} + X_{27} = D_{27}$$

$$Y_{38} - Y_{28} + X_{28} = D_{28}$$

$$Y_{38} - Y_{32} + X_{32} = D_{32}$$

$$Y_{38} - Y_{36} + X_{36} = D_{36}$$

$$Y_{38} - Y_{37} + X_{37} = D_{37}$$

$$Y_{39} - Y_{48} + X_{48} = D_{48}$$

$$Y_{40} - Y_{48} + X_{48} = D_{48}$$

$$Y_{40} - Y_{39} + X_{39} = D_{39}$$

$$Y_{41} - Y_{48} + X_{48} = D_{48}$$

$$Y_{42} - Y_{48} + X_{48} = D_{48}$$

$$Y_{43} - Y_{25} + X_{25} = D_{25}$$

$$Y_{43} - Y_{26} + X_{26} = D_{26}$$

$$Y_{44} - Y_{18} + X_{18} = D_{18}$$

$$Y_{45} - Y_{17} + X_{17} = D_{17}$$

$$Y_{46} - Y_{45} + X_{45} = D_{45}$$

$$Y_{47} - Y_{18} + X_{18} = D_{18}$$

$$Y_{48} - Y_{47} + X_{47} = D_{47}$$

$$Y_{48} - Y_{51} + X_{51} = D_{51}$$

$$Y_{48} - Y_{53} + X_{53} = D_{53}$$

$$Y_{48} - Y_{54} + X_{54} = D_{54}$$

$$Y_{48} - Y_{55} + X_{55} = D_{55}$$

$$Y_{49} - Y_{18} + X_{18} = D_{18}$$

$$Y_{50} - Y_{18} + X_{18} = D_{18}$$

$$Y_{51} - Y_{44} + X_{44} = D_{44}$$

$$Y_{52} - Y_{29} + X_{29} = D_{29}$$

$$Y_{52} - Y_{30} + X_{30} = D_{30}$$

$$Y_{52} - Y_{31} + X_{31} = D_{31}$$

$$Y_{52} - Y_{37} + X_{37} = D_{37}$$

$$Y_{53} - Y_{29} + X_{29} = D_{29}$$

$$Y_{53} - Y_{30} + X_{30} = D_{30}$$

$$Y_{53} - Y_{31} + X_{31} = D_{31}$$

$$Y_{53} - Y_{37} + X_{37} = D_{37}$$

$$Y_{54} - Y_{29} + X_{29} = D_{29}$$

$$Y_{54} - Y_{30} + X_{30} = D_{30}$$

$$Y_{54} - Y_{31} + X_{31} = D_{31}$$

$$Y_{54} - Y_{37} + X_{37} = D_{37}$$

$$Y_{55} - Y_{29} + X_{29} = D_{29}$$

$$Y_{55} - Y_{30} + X_{30} = D_{30}$$

$$Y_{55} - Y_{31} + X_{31} = D_{31}$$

$$Y_{55} - Y_{37} + X_{37} = D_{37}$$

$$Y_{55} - Y_{24} + X_{24} = D_{24}$$

$$YF - Y_1 + Y_1 = D_1$$

$$YF - Y_6 + Y_6 = D_6$$

$$YF - Y_7 + Y_7 = D_7$$

$$YF - Y_9 + Y_9 = D_9$$

$$YF - Y_{13} + Y_{13} = D_{13}$$

$$YF - Y_{38} + Y_{38} = D_{38}$$

$$YF - Y_{40} + Y_{40} = D_{40}$$

$$YF - Y_{41} + Y_{41} = D_{41}$$

$$YF - Y_{42} + Y_{42} = D_{42}$$

$$YF - Y_{46} + Y_{46} = D_{46}$$

$$YF - Y_{49} + Y_{49} = D_{49}$$

$$YF - Y_{52} + Y_{52} = D_{52}$$

$$YF - Y_8 + Y_8 = D_8$$

- **Duración del proyecto:**

$$YF \leq 270$$

- **Cantidad de actividades máxima a acelerar:**

$$\sum_{i \in ACT} w_i \leq n \times \alpha$$

- **Restricción de no negatividad :**

$$x_i, y_i, y_f, w_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, ACT;$$

Fuente: Elaboración propia

Anexo 6. Resultados arrojados por el programa AMPL de las variables X y Y.

```

ampl: model modelotdg5.txt;
ampl: data datostdg5.txt;
Gurobi 4.6.0: optimal solution; objective 88729770.5
30 simplex iterations
plus 69 simplex iterations for intbasis
:      x      y      :=
1      0      0
2      0      0
3      3      0
4      6      0
5      0      0
6      0      11
7      0      0
8      0      0
9      0      0
10     0      10.5
11     3      8
12     0      132
13     0      143
14     0      8
15     0      19
16     0      24.5
17     0      35.5
18     0      117
19     7      16
20     3.5    42
21     0      42
22     13     55
23     0      75
24     0      42
25     0      108
26     0      108
27     0      220.5
28     0      194
29     5.5    75
30     0      97
31     22     47.5
32     0      220.5
33     23.5   146.5
34     0      172.5
35     0      178
36     23.5   216.5
37     0      80.5
38     0      231.5
39     0      259
40     0      264.5
41     0      264.5
42     0      264.5
43     0      215
44     0      231.5
45     0      215
46     0      242.5
47     0      242.5
48     0      248
49     0      226
50     0      122.5
51     0      237
52     0      264.5
53     0      242.5
54     0      242.5
55     0      242.5

```

Fuente: Resultados obtenido por el programa AMPL

Anexo 7. Resultados arrojados por el programa AMPL de las variables yf, w y costos

```

yf = 270

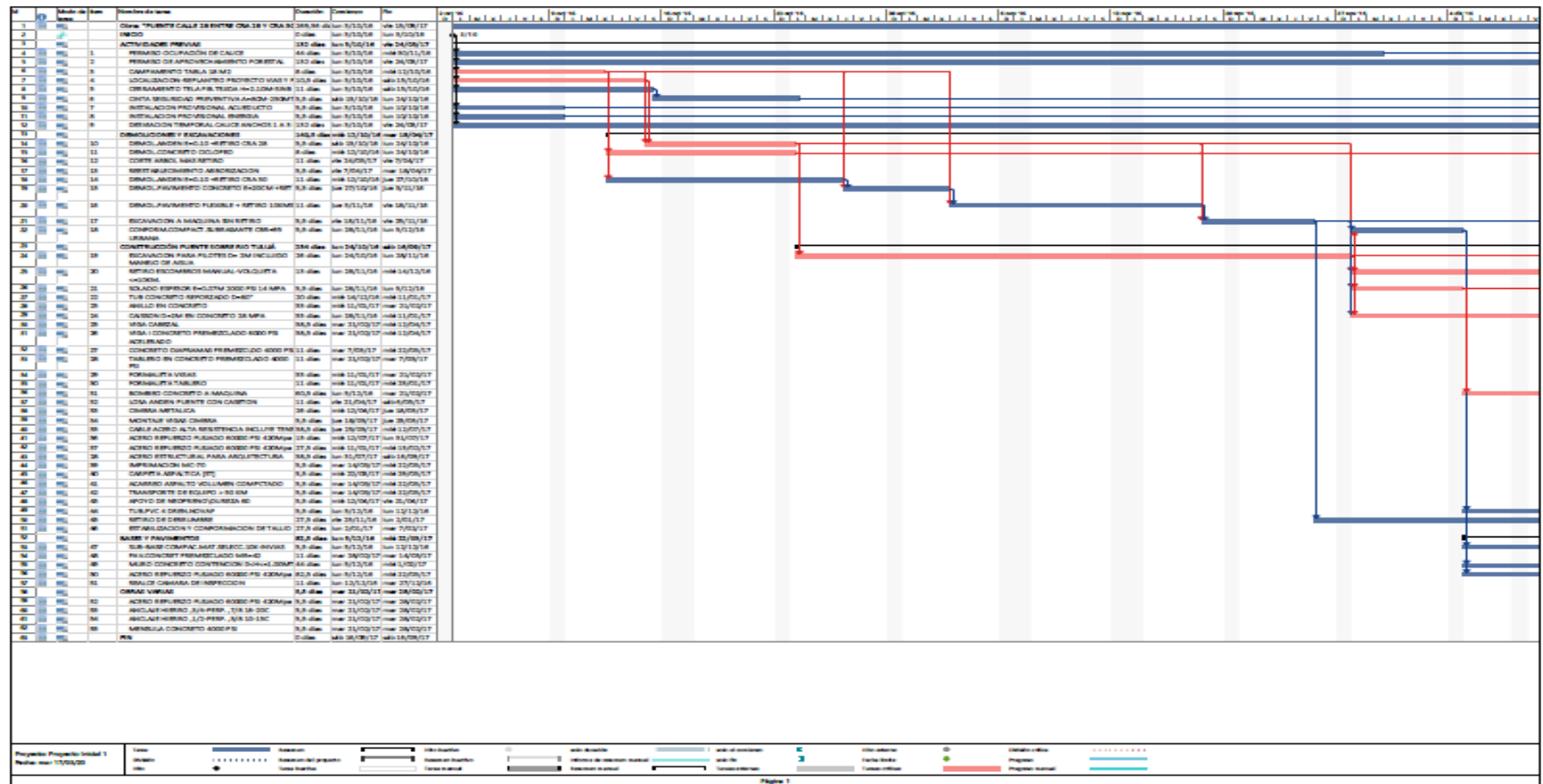
w [*] :=
1 0 6 0 11 1 16 0 21 0 26 0 31 1 36 1 41 0 46 0 51 0
2 0 7 0 12 0 17 0 22 1 27 0 32 0 37 0 42 0 47 0 52 0
3 1 8 0 13 0 18 0 23 0 28 0 33 1 38 0 43 0 48 0 53 0
4 1 9 0 14 0 19 1 24 0 29 1 34 0 39 0 44 0 49 0 54 0
5 0 10 0 15 0 20 1 25 0 30 0 35 0 40 0 45 0 50 0 55 0
;

costos = 88729800

```

Fuentes: Resultados obtenido por el programa AMP

Anexo 8. Cronograma de actividades con duración de 270 días del proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

BIBLIOGRAFÍA

- Atkinson, R. (1999). Project management: Cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, its time to accept other success criteria. *International Journal of Project Management*, 17(6), 337–342. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(98\)00069-6](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(98)00069-6)
- Babu, A., & Suresh, N. (1996). Gestión del proyecto con consideraciones de tiempo, costo y calidad. *European Journal of Operational Research*, 320–327.
- Bnamericas. (2016). Bnamericas. Retrieved from <https://www.bnamericas.com/es/news/energielectrica/retrasos-y-sobrecostos-impactan-a-75-de-los-proyectos-hidroelectricos-en-a-latina>
- Borja, M. F., & Puertas, A. (2012). *Propuesta Metodológica de gestión del tiempo de múltiples proyectos basada en los principios de Lean Project Management y Portafolio Management, aplicados al sector de la construcción en Santiago De Cali*.
- Calameo. (2019). Programación Dinámica. Retrieved from <https://es.calameo.com/read/001021100be0543e3b2d6>
- CAMACOL. (2015). CAMACOL. *Urbana*, 70.
- Carreño, E., Escobar, A., Gallego, R., & Romero, R. (2003). Algoritmo Brach And Bound especializado aplicado al planeamiento a largo plazo de sistemas de transmisión. *A Pesquisa Operacional e Os Recursos Renováveis*, 1691–1697.
- El Tiempo. (2016). El Tiempo. Retrieved from <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16534744>
- Fu, F., & Zhang, T. (2016). A new model for solving time-cost-quality trade-off problems in construction. *PLoS ONE*, 11(12), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167142>
- Garcia, M. (2009). La planificación y control de proyectos en la industria de la construcción.
- Gembicki, F. W., & Haimes, Y. Y. (1975). Approach to performance and sensitivity multiobjective optimization: The goal attainment method. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 769–771.
- Global Construction Review. (2018). Global Construction Review. Retrieved from <http://www.globalconstructionreview.com/news/californias-high-speed-rail-project-may-face-cance/>
- Gray, C., & Larson, E. (2009). Administración de proyectos. In Mc Graw (Ed.), *Administración de proyectos*.
- Institute Project Management. (2013). *Guia del PMBOK*.
- Javis, J., & Monkhtar S. (1996). Programación lineal y flujo de redes. *Limusa*.
- Karmaker, C. L., & Halder, P. (2017). Scheduling Project Crashing Time Using Linear

- Programming Approach : Case Study. *International Journal of Research in Industrial Engineering*, 6(4), 283–292.
<https://doi.org/10.22105/riej.2017.96572.1010>
- Kerzner, H. (2013). *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*.
- Kim, J. Y., Kang, C. W., & Hwang, I. K. (2012). A practical approach to project scheduling: Considering the potential quality loss cost in the time-cost tradeoff problem. *International Journal of Project Management*, 30(2), 264–272.
<https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2011.05.004>
- Lin, J., Qian, Y., Cui, W., & Miao, Z. (2010). Overlapping and communication policies in product development. *European Journal of Operational Research*, 201(3), 737–750. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.03.040>
- Mariana, P., & Gavilánez, Ó. (2018). *Programación Lineal para la toma de decisiones*. Riobamba, Ecuador. Retrieved from
https://www.academia.edu/38963103/programación_lineal_para_la_toma_de_decisiones
- Merino Maestre, M. (2019). Técnicas Clásicas de Optimización. Parte I: Programación Lineal y No Linea. Retrieved from <https://docplayer.es/10582293-Tecnicas-clasicas-de-optimizacion-parte-i-programacion-lineal-y-no-lineal.html>
- Mohammadipour, F., & Sadjadi, S. J. (2016). Project cost-quality-risk tradeoff analysis in a time-constrained problem. *Computers and Industrial Engineering*, 95, 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.02.025>
- Monghasemi, S., Reza, M., Ali, M., Fasaee, K., & Adamowski, J. (2015). Expert Systems with Applications A novel multi criteria decision making model for optimizing time – cost – quality trade-off problems in construction projects. *Expert Systems with Applications*, 42(6), 3089–3104.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.032>
- Orm, M. B., & Jeunet, J. (2018). Time Cost Quality Trade-off Problems: A survey exploring the assessment of quality. *Computers and Industrial Engineering*, 118(January), 319–328. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.01.012>
- Pillai, A. ., Joshi, A., & Rao, K. . (2002). Performance measurement of R&D projects in a multi-project, concurrent engineering environment. *International Journal of Project Management*, 165–177.
- Portafolio. (2017). Portafolio. Retrieved from
<https://www.portafolio.co/economia/infraestructura/diez-proyectos-de-4g-frenados-por-retraso-en-inicio-de-obras-504988>
- ProColombia. (2016). ProColombia. Retrieved from
<https://www.inviertaencolombia.com.co/como-invertir-test/33-sectores/materiales-de-construccion/400-descripcion-del-sector.html>
- Project Management Institute. (2017). *Pulse of the Profession*, 32.
- Sahu, K., & Sahu, M. (2014). Cost & Time and Also Minimum Project Duration Using

- Alternative Method. *International Review of Applied Engineering Research*, 4(5), 403–412. Retrieved from <http://www.ripublication.com/iraer.htm>
- Scott Youn, C., & Samson, D. (2008). Project success and project team management: Evidence from capital projects in the process industries. *ScienceDirect*, 26(6), 749–766.
- Taha, hamdy A. (2011). *I Nvestigación H Amdy a . T Aha*.
- Tapias-Isaza, C. J., Galeano-Ossa, A. A., & Hincapie Isaza, R. A. (2011). Planeación de sistemas secundarios de distribución usando el algoritmo Branch and Bound. *Ingeniería y Ciencia - Ing.Cienc.*, 7(13), 47–64. Retrieved from <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/400>
- Vázquez Romero, G. A. (2013). Tesis - “Aplicación de algunas heurísticas del problema de la mochila.” *Universidad Autónoma de Puebla*. Retrieved from <https://docplayer.es/27352362-Benemerita-universidad-autonoma-de-puebla-facultad-de-ciencias-fisico-matematicas-aplicacion-de-algunas-heuristicas-al-problema-de-la-mochila-tesis.html>
- Vidal Holguin, C. J. (2011). *Introducción a la modelación matemática y optimización*. Cali, Colombia.
- Wi, H., & Jung, M. (2010). Modeling and analysis of project performance factors in an extended projectoriented virtual organization. *Expert Systems with Applications*, 1143–1151.
- Xu, J., Zheng, H., Zeng, Z., Wu, S., & Shen, M. (2012). Discrete time-cost-environment trade-off problem for large-scale construction systems with multiple modes under fuzzy uncertainty and its application to Jinping-II Hydroelectric Project. *International Journal of Project Management*, 30(8), 950–966. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2012.01.019>