



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

## APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MONTE CARLO EN LA PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MENCIÓN: ESTRUCTURAS Y CONSTRUCCIÓN

FRANCISCO ANDRÉS FLORES ARAYA

PROFESOR GUÍA:  
ALEJANDRO TIRACHINI HERNÁNDEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ALEJANDRO POLANCO CARRASCO  
WILLIAM WRAGG LARCO

SANTIAGO DE CHILE  
2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniero Civil, Mención Estructuras y  
Construcción.

POR: Francisco Andrés Flores Araya

FECHA: 09/01/2015

PROFESOR GUÍA: Alejandro Tirachini Hernández

## APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MONTE CARLO EN LA PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL

*El siguiente documento presenta la aplicación del método de simulación de Monte Carlo en la planificación de proyectos de ingeniería civil, específicamente aquellos en la fase de construcción. Propone la metodología para que su uso pueda ser utilizado por cualquier organismo o empresa que desarrolle el diseño y construcción de obras civiles. De esta manera se incluyen en el presupuesto y el cronograma las posibles variaciones producidas por eventos de riesgo que usualmente ocurren durante el proceso constructivo. Muestra aplicaciones numéricas con datos de proyectos reales para modelar distintos escenarios para el cronograma y el estimado de costo usando programas computacionales Adhoc, en este caso, @Risk. Los proyectos seleccionados son dos; el primero corresponde a la obra “Diseño y construcción del puente Chacao, región de Los Lagos” adjudicado al consorcio OAS-Hyundai-Systra-AAS Jakobsen por la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile y el segundo proyecto corresponde a un edificio típico en altura, específicamente a un Centro de Formación Técnica.*

*El primer proyecto, por su naturaleza compleja y dada la poca información disponible a la fecha para obtener datos necesarios para incorporar el riesgo, se muestra sólo con fines académicos. Para superar la falta de información sobre la estocasticidad de la duración de actividades y estimación de costos se realiza una encuesta dirigida a los profesionales del área de la planificación de proyectos para obtener datos empíricos y así poder modelar mediante simulación con datos reales los proyectos mencionados anteriormente. Se muestran análisis para distintas distribuciones de probabilidad y distintos tipos de variación del costo y duración de las actividades de cada proyecto, para ver qué efecto tiene el riesgo sobre el costo y el plazo total. Se determinan las contingencias de tiempo y costo con distintos niveles de confianza para cada proyecto y con ello, tener información más completa para tomar decisiones con una visión más amplia que la obtenida con costos y duraciones determinísticas.*

## DEDICATORIA

*Le dedico esta memoria a mi familia, quienes siempre creyeron en mí, especialmente a mi papá, que se ve reflejado en todos los éxitos que tengo.*

*A mi abuelo que está en los cielos y junto a mí, en cada paso que doy.*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi profesor guía Alejandro Tirachini, por su constante entusiasmo y entrega en el desarrollo de este trabajo de título. Su motivación y la pasión con que hace lo que ama ha sido un ejemplo para continuar desarrollándome profesionalmente fuera de la Universidad.

Agradecer también al profesor Alejandro Polanco por estar siempre disponible para aclarar mis constantes dudas durante este período, a Christian Fuentes por su ayuda en la difusión de la encuesta y a William Wragg por aceptar ser parte de la comisión.

A todas las personas que trabajan en CIPRES ingeniería Ltda. Por valorar mi trabajo y por darme las facilidades y el apoyo para realizar esta memoria de título mientras trabajaba con ellos.

A mis amigos, mi grupo PQHWP y a todas las personas que de alguna u otra forma han contribuido en mi desarrollo personal a lo largo de estos años, algunos aún continúan haciéndolo otros tomaron caminos diferentes, pero para cada uno de ustedes tengo un espacio en mi corazón que los recuerda con cariño.

A toda mi familia; Erika Araya, Francisco Flores, Carolina Flores y Cristián Flores por ser la mejor familia que podría tener, por darme su apoyo y ánimo para levantarme cada vez que me he sentido falto de fuerzas y por quererme de la manera en que lo hacen.

## TABLA DE CONTENIDO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUCCIÓN .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | MOTIVACIÓN .....  | 1         |
| 1.2      | OBJETIVOS .....   | 1         |
| 1.2.1    | OBJETIVOS GENERALES .....   | 1         |
| 1.2.2    | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 2         |
| 1.3      | ALCANCE .....   | 2         |
| 1.4      | METODOLOGÍA .....   | 3         |
| <b>2</b> | <b>PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS .....</b>   | <b>5</b>  |
| 2.1      | PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS EN INGENIERÍA CIVIL .....  | 5         |
| 2.2      | ESTRUCTURA DE SUBDIVISIÓN DEL PROYECTO (ESP) .....  | 7         |
| 2.3      | MÉTODO DEL CAMINO CRÍTICO .....   | 8         |
| 2.4      | PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE COSTOS .....   | 8         |
| 2.4.1    | Estimar costos .....  | 8         |
| 2.4.2    | Determinar presupuesto .....  | 9         |
| 2.4.3    | Controlar costos .....  | 10        |
| 2.5      | PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE ACTIVIDADES .....  | 10        |
| 2.5.1    | Definir las actividades .....   | 10        |
| 2.5.2    | Secuenciar las actividades .....  | 11        |
| 2.5.3    | Estimar los recursos de las actividades .....   | 11        |
| 2.5.4    | Estimar la duración de las actividades .....  | 12        |
| 2.5.5    | Desarrollar el cronograma .....   | 12        |
| 2.5.6    | Controlar el cronograma .....   | 12        |
| 2.6      | COMENTARIOS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....   | 13        |
| <b>3</b> | <b>RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS .....</b>  | <b>14</b> |
| 3.1      | GESTIÓN DE RIESGO .....   | 14        |
| 3.1.1    | Gestión del plan de Riesgo .....  | 14        |
| 3.1.2    | Identificación de Riesgo .....  | 14        |
| 3.1.3    | Análisis Cualitativo de Riesgo .....  | 15        |
| 3.1.4    | Análisis Cuantitativo de Riesgo .....   | 15        |
| 3.1.5    | Plan de respuesta ante el Riesgo identificado .....   | 15        |
| 3.1.6    | Control de riesgo .....   | 16        |
| 3.2      | EVENTOS DE RIESGO .....   | 16        |
| 3.3      | MÉTODOS PARA INCORPORAR RIESGO .....  | 19        |
| 3.3.1    | Análisis de Sensibilidad .....  | 19        |
| 3.3.2    | PERT .....  | 19        |
| 3.3.3    | GERT .....  | 20        |
| 3.3.4    | Simulación .....  | 20        |
| 3.4      | SIMULACIÓN DE MONTE CARLO .....   | 21        |
| 3.4.1    | Historia .....  | 21        |
| 3.4.2    | Características .....   | 21        |
| 3.4.3    | Aplicaciones .....  | 22        |
| 3.4.4    | Ventajas .....  | 22        |
| 3.4.5    | Desventajas .....   | 23        |
| 3.5      | DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD .....  | 24        |
| 3.5.1    | Distribución Uniforme .....   | 24        |
| 3.5.2    | Distribución Triangular .....   | 25        |
| 3.5.3    | Distribución Beta .....   | 27        |
| 3.5.4    | Distribuciones Abiertas .....   | 28        |
| 3.5.5    | Distribuciones según el grado de conocimiento de las actividades .....                          | 29        |
| 3.6      | HERRAMIENTAS PARA LA PLANIFICACIÓN Y EL RIESGO EN PROYECTOS .....                               | 31        |
| <b>4</b> | <b>APLICACIÓN DE ENCUESTA PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS .....</b> | <b>32</b> |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 4.1       | PRESENTACIÓN.....   | 32        |
| 4.2       | DESCRIPCIÓN.....  | 32        |
| 4.3       | ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....  | 34        |
| 4.4       | RESULTADOS.....   | 36        |
| 4.4.1     | <i>Análisis Cualitativo</i> .....   | 36        |
| 4.4.2     | <i>Análisis Cuantitativo</i> .....  | 39        |
| 4.5       | CONCLUSIONES ENCUESTA.....  | 47        |
| <b>5</b>  | <b>MODELACIÓN Y SIMULACIÓN MONTE CARLO: ANÁLISIS DE COSTO.....</b>            | <b>48</b> |
| 5.1       | PUENTE SOBRE EL CANAL DE CHACAO.....  | 48        |
| 5.1.1     | <i>Consideraciones al presupuesto</i> .....                                   | 50        |
| 5.1.2     | <i>Desarrollo metodológico para el presupuesto</i> .....                      | 51        |
| 5.1.3     | <i>Resultados Monte Carlo: Presupuesto</i> .....                              | 53        |
| 5.1.3.1   | Distribución Log-Normal.....  | 54        |
| 5.1.3.2   | Distribución Uniforme.....  | 55        |
| 5.1.3.3   | Distribución Triangular.....  | 56        |
| 5.1.4     | <i>Estimación del presupuesto de contingencia</i> .....                       | 58        |
| 5.1.4.1   | Distribución Log-Normal.....  | 58        |
| 5.1.4.2   | Distribución Uniforme.....  | 60        |
| 5.1.4.3   | Distribución Triangular.....  | 61        |
| 5.1.5     | <i>Estimación del presupuesto de contingencia: Análisis detallado</i> .....   | 62        |
| <b>6</b>  | <b>MODELACIÓN Y SIMULACIÓN MONTE CARLO: ANÁLISIS DE CRONOGRAMA.....</b>       | <b>65</b> |
| 6.1       | PUENTE SOBRE EL CANAL DE CHACAO.....  | 65        |
| 6.1.1     | <i>Consideraciones al Cronograma</i> .....                                    | 65        |
| 6.1.2     | <i>Desarrollo metodológico para el Cronograma</i> .....                       | 66        |
| 6.1.3     | <i>Resultados Monte Carlo: Cronograma</i> .....                               | 68        |
| 6.1.3.1   | Distribución Beta-Pert.....   | 68        |
| 6.1.3.2   | Distribución Triangular.....  | 68        |
| 6.1.3.3   | Distribución Uniforme.....  | 69        |
| 6.1.3.4   | Comparación Distribuciones 105%.....  | 70        |
| 6.1.3.5   | Comparación Distribuciones 115%.....  | 71        |
| 6.1.3.6   | Comparación Distribuciones 130%.....  | 72        |
| 6.1.3.7   | Comparación Distribuciones 150%.....  | 72        |
| 6.1.4     | <i>Conclusiones para el Cronograma: Puente sobre el canal de Chacao</i> ..... | 73        |
| 6.2       | EDIFICIO CONSTRUCCIÓN EN ALTURA: CENTRO DE FORMACIÓN TÉCNICA.....             | 74        |
| 6.2.1     | <i>Consideraciones al Cronograma</i> .....                                    | 74        |
| 6.2.2     | <i>Desarrollo metodológico para Cronograma</i> .....                          | 74        |
| 6.2.3     | <i>Resultados Monte Carlo: Cronograma</i> .....                               | 76        |
| <b>7</b>  | <b>CONCLUSIONES.....</b>  | <b>79</b> |
| 7.1       | USO DEL MÉTODO.....   | 79        |
| 7.2       | RESUMEN Y RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....                                    | 79        |
| 7.3       | EFFECTO DE LAS DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD.....                            | 81        |
| 7.4       | EVENTO DE RIESGOS PRINCIPALES.....  | 82        |
| 7.5       | RECOMENDACIONES Y BUENAS PRÁCTICAS.....                                       | 82        |
| <b>8</b>  | <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>  | <b>84</b> |
| <b>9</b>  | <b>ANEXO A.....</b>   | <b>87</b> |
| <b>10</b> | <b>ANEXO B.....</b>   | <b>92</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Diseño integrado y optimización envolvente .....                             | 6  |
| Figura 2: Diseño lineal de Proyectos .....   | 6  |
| Figura 3: Ejemplo de ruta crítica.....   | 8  |
| Figura 4: Ejemplo diagrama de precedencia nodo-actividad .....                         | 11 |
| Figura 5: Ejemplo cronograma de proyecto - carta Gantt.....                            | 12 |
| Figura 6: Ejemplo diagrama de Tornado.....   | 19 |
| Figura 7: Distribución de Probabilidad Beta distintos parámetros de forma. ....        | 27 |
| Figura 8: Interfaz @Risk .....   | 31 |
| Figura 9: Rubro de los profesionales encuestados .....                                 | 34 |
| Figura 10: Tamaño de la empresa en que trabajan los profesionales encuestados .....    | 35 |
| Figura 11: Tipo de Proyectos en que trabajan los profesionales encuestados.....        | 36 |
| Figura 12: Variación estimaciones de todas las respuestas para el límite superior..... | 41 |
| Figura 13: Variación estimaciones de todas las respuestas para el límite inferior..... | 42 |
| Figura 14: Variación estimaciones por actividad .....                                  | 43 |
| Figura 15: Variación de respuestas actividad: Excavaciones .....                       | 44 |
| Figura 16: Variación de respuestas actividad: Terminaciones.....                       | 44 |
| Figura 17: Variación de respuestas actividad: Instalaciones .....                      | 45 |
| Figura 18: Variación de respuestas actividad: Estructura ascensor .....                | 45 |
| Figura 19: Variación de respuestas actividad: Instalación de faena .....               | 46 |
| Figura 20: Variación de respuestas actividad: Construcción de muros perimetrales ..... | 46 |
| Figura 21: Ingreso variables de entrada, Distribución triangular .....                 | 51 |
| Figura 22: Ingreso variables de entrada, distribución Log-Normal.....                  | 51 |
| Figura 23: Variables de salida .....   | 52 |
| Figura 24: Simulación de Monte Carlo .....   | 52 |
| Figura 25: Comparación distribuciones de probabilidad para el presupuesto.....         | 53 |
| Figura 26: Variabilidad distribución Log-Normal .....                                  | 55 |
| Figura 27: Variabilidad distribución Uniforme .....                                    | 56 |
| Figura 28: Variabilidad distribución Triangular.....                                   | 57 |
| Figura 29: Concepto de presupuesto.....  | 58 |
| Figura 30, Comparación contingencia distribución Log-Normal.....                       | 59 |
| Figura 31: Comparación contingencia distribución Uniforme .....                        | 60 |
| Figura 32: Comparación contingencia distribución Triangular .....                      | 61 |
| Figura 33: Contingencia .....  | 64 |
| Figura 34: Variables de entrada para el cronograma distribución Triangular.....        | 66 |
| Figura 35: Variable de salida 1, cronograma .....                                      | 67 |
| Figura 36: Variable de salida 2, cronograma .....                                      | 67 |
| Figura 37: Duración total del proyecto, Distribución Beta-Pert. ....                   | 68 |
| Figura 38: Duración total del proyecto, Distribución Triangular.....                   | 69 |
| Figura 39: Duración total del proyecto, Distribución uniforme.....                     | 69 |
| Figura 40: Duración total del proyecto, variabilidad máx. 5% .....                     | 71 |
| Figura 41: Duración total del proyecto, variabilidad máx. 15% .....                    | 71 |
| Figura 42: Duración total del proyecto, variabilidad máx. 30% .....                    | 72 |
| Figura 43: Duración total del proyecto, variabilidad máx. 50% .....                    | 72 |
| Figura 44: Duración de actividades carta Gantt CFT .....                               | 75 |
| Figura 45: Resultados simulación CFT.....  | 76 |
| Figura 46: Contingencia simulación CFT .....   | 77 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 47: Diagrama Tornado, Informe @Risk .....   | 78 |
| Figura 48: Informes @Risk .....  | 78 |
| Figura 49: Dispersión de los resultados usando cada distribución de probabilidad (costo/duración)<br>..... | 81 |
| Figura 50: Carta Gantt Puente del Chacao .....   | 97 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Identificación de Riesgos .....   | 16 |
| Tabla 2: Factores que causan retrasos y sobrecostos.....   | 17 |
| Tabla 3: Contingencia, bajo niveles de incerteza .....   | 29 |
| Tabla 4: Ejemplos de tipos de distribución .....   | 30 |
| Tabla 5: Eventos de riesgo considerados en la encuesta .....   | 33 |
| Tabla 6: Actividades consideradas en la encuesta.....  | 33 |
| Tabla 7: Matriz Probabilidad e Impacto .....   | 37 |
| Tabla 8: Resultados Probabilidad e Impacto ordenados según matriz .....                              | 37 |
| Tabla 9: Factores clave proyectos exitosos .....   | 38 |
| Tabla 10: Límite inferior (escenario optimista) de la duración de actividades .....                  | 40 |
| Tabla 11: Límite superior (escenario pesimista) de la duración de actividades.....                   | 40 |
| Tabla 12: Detalle presupuesto Puente del Chacao.....   | 48 |
| Tabla 13: Totales distribución uniforme con 95% nivel de confianza .....                             | 56 |
| Tabla 14: Totales distribución uniforme con 95% nivel de confianza .....                             | 57 |
| Tabla 15: Probabilidad de ocurrencia riesgos seleccionados .....                                     | 62 |
| Tabla 16: Registro de riesgos para cada actividad .....  | 63 |
| Tabla 17: Sobrecostos, Iteración 1 .....   | 63 |
| Tabla 18: Sobrecostos, Iteración 2 .....   | 64 |
| Tabla 19: Resumen duración y fecha de término para el puente del Chacao, 95% nivel de confianza..... | 70 |
| Tabla 20: Resultados cronograma CFT para un 95% de nivel de confianza.....                           | 76 |
| Tabla 21: Índices Críticos.....  | 77 |
| Tabla 22: Resumen eventos de riesgo principales.....   | 82 |

# **1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1 MOTIVACIÓN**

La planificación y control de proyectos se ha convertido en un proceso clave en la ejecución de proyectos de ingeniería civil, hoy en día se observa cómo la metodología que se emplea se vuelve cada vez más importante para distribuir de mejor manera los recursos escasos. Es en esta línea donde es importante mejorar los procesos que se emplean en la planificación de proyectos para una toma de decisiones informada y con una base sólida.

Uno de los elementos importantes a considerar es el riesgo en los proyectos, definido como “un evento o condición incierta que si ocurre tiene un efecto positivo o negativo en uno o más objetivos del proyecto tales como el alcance, plazo, costo y calidad” (PMI, 2013). Estos eventos son usualmente subestimados por los profesionales que desarrollan esta tarea, principalmente por falta de experiencia o por exceso de confianza. Esto redundará en malas estimaciones de variables clave como la duración y costos de un proyecto. La determinación exacta de estas variables es imposible y es por eso que estimar con un alto grado de certeza es fundamental para cualquier planificador, esto conduce a una toma de decisiones con mayor información, mayor exactitud y por lo tanto se traduce en un posible ahorro monetario para el proyecto. Esto es una parte importante del manejo del riesgo en los proyectos y es actualmente un tema que muchas veces pasa desapercibido por las empresas privadas y organismos públicos que lo subestiman por falta de conocimiento. La inclusión del riesgo en la planificación de proyectos es el tema general de esta memoria y para eso se aplicará la simulación de Monte Carlo para cuantificar las variaciones del costo y el cronograma que se producen por eventos de riesgo en los proyectos de ingeniería civil.

Entender que los eventos de riesgo no tienen predicción alguna de forma determinista, pero saber que estadísticamente pueden ser entendidos, es un objetivo que quiere mostrar esta memoria de título, además de poder conocer los impactos que éstos tienen sobre las actividades que se realizan en un proyecto.

Los continuos avances tecnológicos que se están produciendo continuamente permiten que el uso de herramientas de simulación sea de mayor acceso, calidad y con un menor costo. Hoy en día la simulación está al alcance de cualquier profesional, las computadoras pueden procesar millones de datos en poco tiempo y almacenarlos sin problemas en sus discos duros y permite resolver problemas cada vez más complejos; sin embargo se requiere de una mirada crítica por parte del planificador, quien, si no tiene cuidado puede interpretar incorrectamente los resultados y tomar o recomendar decisiones erradas.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVOS GENERALES**

El eje central de esta memoria es utilizar y mostrar el método de Monte Carlo en el análisis de riesgo del cronograma y costo en proyectos de ingeniería civil. Usar el programa *@Risk*; para Microsoft Project en la planificación del cronograma y para Microsoft Excel en el análisis de costo.

## 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Mostrar que la simulación numérica puede ser una herramienta habitual y útil para ser incluida en la planificación de proyectos de las empresas constructoras y organismos públicos.
- Desarrollar una metodología simple para aplicar la simulación de Monte Carlo con herramientas de Microsoft Excel, Microsoft Project y el complemento @Risk, de manera que sea aplicada por cualquier profesional que trabaje en la planificación de costo y cronograma.
- Conocer de forma no determinista la cantidad de recursos monetarios y tiempo que presentan los proyectos de ingeniería civil considerando intervalos de confianza para los eventos de riesgo.
- Estimar contingencias en la elaboración de presupuestos y plazos con distintos niveles de confianza.
- Mostrar las diferencias entre aplicar el método determinístico y probabilístico (Monte Carlo) para el cálculo de plazos y costos.

## 1.3 ALCANCE

Para un análisis de la aplicación de la simulación de Monte Carlo en esta memoria es necesario definir el siguiente alcance.

1. Investigar, recopilar y analizar bibliografía respecto al tema.
  - Planificación de proyectos.
  - Elementos que constituyen riesgo.
  - Métodos para incorporar riesgo.
  - Simulación de Monte Carlo.
  - Distribuciones de Probabilidad.
2. Realizar una encuesta (cuestionario) para conocer la opinión de profesionales que trabajen en el área de la planificación de proyectos, sobre aleatoriedad en la duración y estimación de costos.
3. Aplicación Monte Carlo.
  - Aplicación del método al Puente del canal de Chacao
    - Plan Maestro, Proyecto Público
    - Estimado de Costo
    - Cronograma
  - Aplicación del método para edificios en altura.
    - Proyectos Privados
    - Solo en el cronograma

4. Limitaciones de los resultados
  - Se asume independencias de las actividades del presupuesto
  - No existe completa independencia de actividades en el cronograma debido a la relación de precedencia entre ellas.
5. Conclusiones, recomendaciones y buenas prácticas

## 1.4 METODOLOGÍA

Para aplicar el método de simulación de Monte Carlo en la Planificación de costos y cronograma se debe seguir la siguiente metodología:

- Asumir una distribución de probabilidad de cada componente aleatoria (actividad) tanto para las partidas del estimado de costos como para las actividades del cronograma. Se usarán las siguientes distribuciones de probabilidad, que son aquellas que más se usan según la literatura:
  - Triangular
  - Log Normal
  - Uniforme
  - Beta-Pert
- Información sobre los rangos de valores para cada evento para poder generar los números aleatorios de acuerdo a la distribución asumida según la literatura.
  - Experiencias internacionales
  - Experiencias nacionales
  - Encuesta
- Establecer relaciones entre las variables de entrada.
  - Suma de cada una de las partidas en el caso del presupuesto
  - Relaciones de precedencia, que conforman rutas, en el caso del cronograma
- Iterar las veces que sea necesario para obtener un resultado confiable de los objetivos globales del proyecto (tiempo y costo).
  - 10.000 iteraciones en cada uno de los resultados
- Obtener resultados una vez aplicado el método y concluir.
  - Histogramas de distribución
  - Curvas de distribución de acumulada
  - Intervalos de confianza para las estimaciones de tiempo y costo

- Además se deben tener las siguientes consideraciones antes de aplicar en un método como éste:

En una simulación de Monte Carlo puede haber distintos tipos de errores dependiendo de cómo se generen los números aleatorios. “Cualquier persona que considere métodos aritméticos para producir números aleatorios está, por su puesto, en un estado de pecado” (Von Neumann, 1951). Esto es debido a que la generación de números *pseudo*-aleatorios no es 100% aleatoria. Sin embargo se asumirá que Microsoft Excel entrega números aleatorios de forma aceptable para el desarrollo de esta memoria. Los algoritmos probabilísticos son usados en situaciones donde los métodos determinísticos son insuficientes y aunque el error de aproximación es aleatorio y la convergencia es lenta, es el mejor método conocido hasta ahora (Lapeyre et al., 2003).

## **2 PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS**

### **2.1 PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS EN INGENIERÍA CIVIL**

Hoy en día, cuando los recursos son escasos y la mayoría de los elementos constituyentes de un proyecto son costosos, es de vital importancia minimizar errores en la planificación de una obra de construcción, es por esto que es necesario manejar las variantes que definen el proyecto y conocer de manera adecuada los procesos que se llevan a cabo para poder ejecutarlo acorde al plan.

Planificar es visualizar cómo se llevarán a cabo las tareas del futuro para generar un producto que aún no se materializa hasta que éste sea materializado, es decir, no basta solo con proyectar el proceso, sino que se necesita la permanente toma de decisiones (acciones) a medida que el proyecto esté en marcha para obtener un buen resultado y por consiguiente realizar una buena ejecución. Es un proceso cíclico y continuo que básicamente consta de 4 etapas; planificación, ejecución, seguimiento y control. Además coordina esfuerzos de todos los *stakeholders* del proyecto (personas, empresas, instituciones que se ven afectadas por el proyecto), permitiendo la relación con todas las divisiones dentro la empresa y así tener un enfoque multidisciplinario en la concepción del proyecto. Esto es uno de los aspectos importantes con relación al ciclo de vida del proyecto (Serpell y Alarcón, 2012).

A medida que el proyecto avanza y se materializa, la influencia de la toma de decisiones va perdiendo importancia, al contrario de lo que pasa con las decisiones que se toman al principio de la obra. Además el costo de modificar va aumentando a medida que el proyecto avanza, por lo que de vital importancia tomar buenas decisiones en las etapas iniciales. Ésto va de la mano con el nuevo concepto de diseño sustentable en proyectos llamado “diseño integrado” (ver Figura 1) que mediante el cambio del paradigma del diseño lineal de los proyectos (Figura 2) pasa a un diseño compartido en donde todas las especialidades conversan entre sí, esto se traduce en una mayor duración de la fase inicial de los proyectos, pero con menores errores en la fase de construcción y por lo tanto una menor cantidad de recursos perdidos.

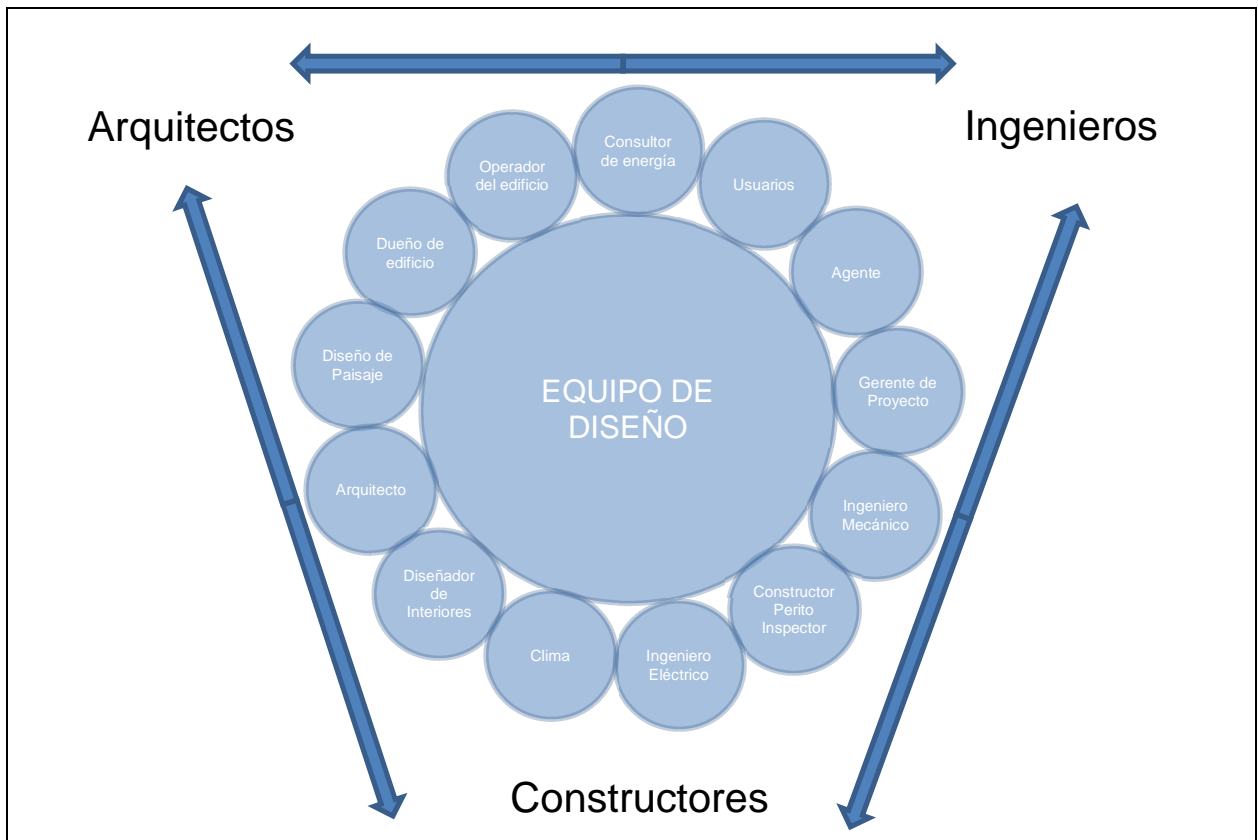


Figura 1: Diseño integrado y optimización envolvente  
 Fuente: Adaptado de: EA, Energía y Arquitectura, México D.F.

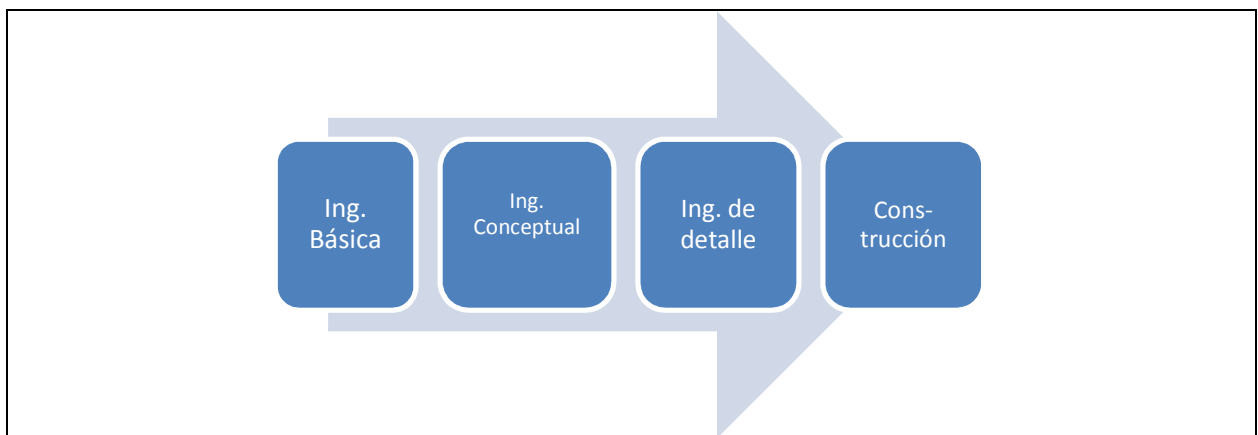


Figura 2: Diseño lineal de Proyectos  
 Fuente: Elaboración Propia

Esta memoria de título enfoca la planificación en el cálculo de recursos de tiempo y costo incorporando riesgo en cada uno de estos elementos de forma global, para eso es necesario conocer cómo se maneja el riesgo en la construcción. El cronograma de una obra de construcción habitualmente se modela como una red de actividades relacionadas lógicamente entre sí concebidas mediante la aplicación de la estructura de subdivisión del proyecto o ESP (también conocida por su sigla en inglés, *Work Breakdown Structure* o *WBS*). En tanto las actividades se pueden representar como un evento temporal único a las que se les da características propias

medibles (como el tiempo de ejecución) o no medibles (como el código o descripción de la actividad). En cambio, los costos de un proyecto solo se modelan como una suma de componentes.

## **2.2 ESTRUCTURA DE SUBDIVISIÓN DEL PROYECTO (ESP)**

Un proyecto se define como un esfuerzo temporal para crear un producto, servicio o resultado único (PMI, 2013). Para abordar un proyecto, se ha desarrollado una metodología para hacerlos fáciles de tratar. Esto es separarlos en partes más pequeñas que sean menos complejas. A este desglose lo llamamos, estructura de subdivisión de un proyecto. (Serpell y Alarcón, 2012) indican que el desarrollo de la ESP comienza del nivel más alto del proyecto con la identificación de sus principales elementos, hasta los elementos que son manejables o en el cual no se puedan dividir más, llamados actividades. Estos autores presentan una serie de atributos cuantitativos propios de las actividades, enumerados a continuación.

- Duración estimada: Corresponde al período de tiempo que se le asigna a cada actividad para lograr ser terminada
- Fechas de inicio y término: Corresponden a dos eventos que delimitan entre qué fechas debe realizarse la actividad
- Porcentaje de avance teórico: es el porcentaje de avance de una actividad que debiera tener en una fecha de control determinada de acuerdo al programa original.
- Costo estimado: es el costo determinado para cada actividad que se usa para el cálculo del presupuesto total.
- Recursos: mano de obra, materiales y equipos. Para cada actividad se debe señalar el requerimiento de recursos que tenga.

También dan una serie de cualidades que tiene una actividad:

- Nombre de la actividad.
- Descripción del trabajo.
- Número o código.
- Calendario del trabajo asociado.

Si bien identificar las actividades que componen un proyecto es importante, el trabajo aún no está concluido. Otra parte importante que necesita la planificación de proyectos es la relación que tienen estas actividades entre sí.



## 2.3 MÉTODO DEL CAMINO CRÍTICO

El método del camino crítico o CPM por su sigla en inglés (*Critical Path Method*) es un diagrama lógico que representa las relaciones entre actividades y su duración permitiendo calcular la duración mínima que tendrá un proyecto. En términos simples se puede definir como aquel camino en el que si se atrasa una actividad, se atrasa todo el proyecto. Es decir, la secuencia de actividades sin holgura. El método del camino crítico tiene la desventaja de que solo analiza un caso posible (Córdova, 2008). Es determinista. Esta limitación es superada con la introducción de otros modelos como PERT (se describe en el capítulo 3) y mediante simulación se pueden mostrar múltiples rutas potencialmente críticas, dependiendo de las variables de entrada que se indiquen en el proyecto, teniendo en cuenta la distribución de probabilidad que describe cada actividad. Sin embargo el método del camino crítico es muy útil para identificar las actividades que son esenciales para que el proyecto no se atrase. A continuación se muestra un ejemplo de la visualización de una ruta crítica en el programa Microsoft Project.

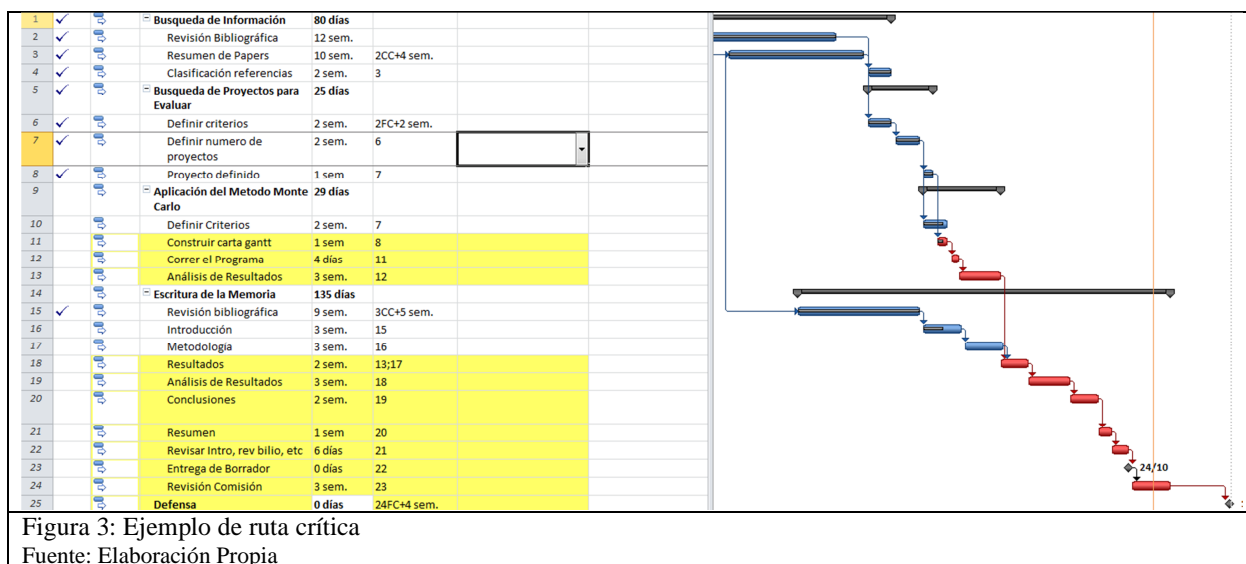


Figura 3: Ejemplo de ruta crítica

Fuente: Elaboración Propia

## 2.4 PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE COSTOS

Según el PMBOK® (PMI, 2013), la planificación de costos del proyecto involucra estimar, presupuestar y controlar los costos para que se pueda completar de forma correcta el presupuesto aprobado en la adjudicación. Los procesos que se muestran a continuación interactúan entre sí y con la planificación de actividades que se verá en el punto 2.5.

### 2.4.1 Estimar costos

Proceso clave en la planificación de proyectos. Consiste en construir un documento que integre la aproximación de los costos que se necesitan para completar todas las actividades que forman el proyecto. Para realizar lo anterior es necesario contar con información que permita construir la planilla de costos, esto generalmente se hace con el juicio de expertos, proyectos anteriores, proyectos similares, base de datos previa, biblioteca de costos unitarios, cotizaciones. Es muy recomendable ir actualizando la lista de costos a medida que el proyecto avanza y guardarlas para

proyectos futuros. El estimado de costo excluye las contingencias del proyecto, pues éstas se evalúan aparte.

Para realizar una buena planificación de los costos es necesario contar con un equipo integrado que permita la correcta definición del costo de cada una de las actividades. En este punto es importante hacer la distinción de quién es la entidad que hace la estimación de costos; el dueño o el contratista y el nivel de detalle que se quiere obtener.

Cada uno de estos actores posee incentivos distintos a la hora de hacer una estimación de costos. Generalmente lo que quiere el mandante es que la obra se ejecute esperando que no cueste más del monto de dinero aprobado para en el proyecto, por otra parte, el contratista lo que generalmente quiere es maximizar sus utilidades. De esta manera los riesgos asumidos son diferentes para cada uno de ellos. Cuando el mandante abre una licitación para construir un proyecto, no dice todo el dinero que tiene para ejecutar la obra, sino que hace que los contratistas compitan por el mejor precio, por lo que las estimaciones del mandante no tienen que ser por qué ser tan precisas. Sin embargo debe realizar un análisis de riesgo para no hacer peligrar su proyecto si ocurren eventualidades no previstas. El contratista por su parte debe luchar por obtener el mejor precio para ganarse el contrato, es aquí donde la precisión en las estimaciones de costo es una de las cosas más importantes a considerar pero ¿y si ocurren imprevistos?

Los tipos de contratos en que se configure el proyecto es determinante a la hora de estimar los costos y precios. Para los contratos a suma alzada (monto fijo de dinero), que son aquellos proyectos en donde la ingeniería de diseño está bien definida y se acuerda un plazo fijo para la finalización de la obra, los contratistas deben estudiar bien las partidas y los planos para no incurrir en gastos futuros por actividades que no fueron consideradas. El contratista debe tener especial cuidado con los eventos de riesgo que se puedan producir para no incurrir en sobrecostos y además debe tener un precio competitivo para poder adjudicarse la propuesta (conveniente hacer análisis de riesgo). Al mandante le interesa realizar el proyecto al menor costo posible y que el trabajo se lleve a cabo bajo un presupuesto controlado y un tiempo prudente. Pero debe tener un monto de resguardo por si ocurren imprevistos (Análisis de riesgo). Para los proyectos convenidos en precio unitario, en donde la ingeniería no es acabada ya que la información se va teniendo a medida que el proyecto avanza, el riesgo lo asume mayoritariamente el mandante pues los imprevistos deben ser considerados para no incurrir en sobrecostos. Sin embargo el contratista puede hacer un análisis de riesgo para que sus precios unitarios sean competitivos según fluctuaciones en los precios de los insumos o de algunas variables que no pueda manejar completamente.

#### **2.4.2 Determinar presupuesto**

El presupuesto de una empresa u organización expresa la forma en que se van a aplicar los recursos disponibles en el futuro para conseguir los objetivos fijados en la planificación (Muñiz, 2009). Para generar el presupuesto, se tiene que tener muy claro el tipo de contrato con el cual se está trabajando y conocer los objetivos de la empresa y el proyecto. La elaboración del presupuesto está ligado al sistema de cálculo de los costos por los que se haya optado realizar (costos directos, indirectos, por partidas, etc.). La elaboración de un presupuesto ligado a un cronograma, generalmente se expresa como el costo del desarrollo de cada actividad, grupo de actividades o partidas. Sin embargo deben agregarse otros elementos que no están presentes en el desglose de actividades de un proyecto, tales como:

- Gastos Generales
- Gastos de oficina central
- Gastos Financieros
- Imprevistos
- Utilidades
- Impuestos

### **2.4.3 Controlar costos**

Controlar costos es el proceso por el cual se monitorea el uso de recursos económicos a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Consiste en registrar los costos reales en que se ha incurrido y tomar las acciones correctivas necesarias para volver al plan si es que ha existido alguna desviación o cambiarlo según corresponda. Es recomendado hacer informes de avance cada cierto tiempo que permitan a todas las personas involucradas conocer el estado actual del proyecto, desde el punto de vista de costos y documentar el registro para el uso futuro de los datos en los próximos proyectos que se lleven a cabo.

## **2.5 PLANIFICACIÓN Y CONTROL DE ACTIVIDADES**

Para realizar un buen plan es necesario conocer el contexto en el que se desarrolla el proyecto además de conocer todas las aristas del proyecto en sí. Es necesario saber qué es lo que hay que hacer, cómo hay que hacerlo, dónde hay que realizar el proyecto, cuándo hay que realizarlo, a quienes involucra y por qué se hace. Hacerse todas estas preguntas ayuda a visualizar a grandes rasgos las características propias de cada proyecto. Asumiendo que se tiene definido todo lo anterior, además del alcance y los objetivos del proyecto, se puede enfocar en la planificación del proyecto, teniendo en consideración que es un proceso cíclico a lo largo del ciclo de vida del éste.

La gestión del tiempo de los proyectos involucra 6 procesos descritos más adelante, según el PMBOK® Guide (PMI, 2013). Estos procesos interactúan unos con otros y se superponen en el proyecto, por lo que no es necesario que se apliquen en el orden presentado, pero sí es necesario tenerlos integrados al momento de hacer la planificación.

### **2.5.1 Definir las actividades**

Para definir las actividades es necesario conocer el contexto del proyecto que se debe haber definido en fases anteriores, tales como las regulaciones ambientales, las políticas del sector, lineamientos generales, alcance del propio proyecto, experiencias previas, etc. Con eso en mente, se debe subdividir los paquetes de trabajo que constituyen el proyecto en componentes más pequeños. Este proceso está detallado en la sección 2.2. Es fundamental para este proceso hacer participar a la mayor cantidad de gente posible involucrada en el proyecto, para así tener resultados más precisos y definir de mejor manera la lista de actividades. También es recomendable confeccionar una lista de Hitos que identifique los eventos significativos del proyecto.

## 2.5.2 Secuenciar las actividades

Secuenciar actividades corresponde al proceso de incluir las relaciones lógicas de sucesión entre cada una de las actividades del proyecto. La lista de actividades se obtiene a partir del punto 2.5.1. Para realizar esto se utiliza el método de relación de precedencia usado comúnmente en el método del camino crítico descrito en la sección 2.3, gráficamente se puede ver como muestra la Figura 4. Sin embargo es común utilizar programas que automaticen este tipo de relaciones como Microsoft Project, Primavera o software libres como Project libre Openproj, Ganttproject, Intervalos, entre otros.

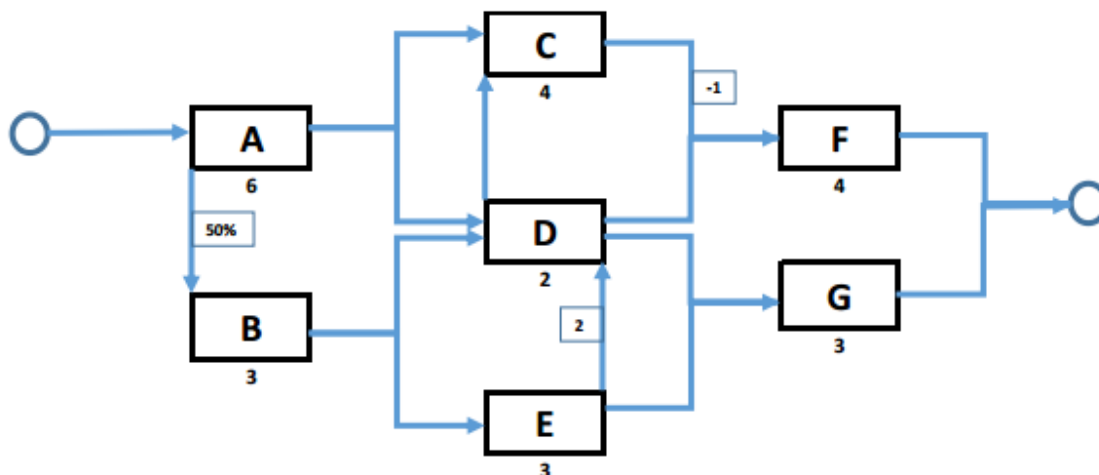


Figura 4: Ejemplo diagrama de precedencia nodo-actividad

Fuente: Curso planificación y control de proyectos, Universidad de Chile, Primavera 2013.

Las relaciones de precedencias que tiene cada proyecto son fundamentales para el correcto funcionamiento de la planificación del cronograma debido a que son las redes neuronales del proyecto. La relación de precedencia del tipo Fin-Comienzo es la más usual, sin embargo existen otros tipos de enlaces entre actividades como son Comienzo-Comienzo (CC), Fin-Fin (FF) e Comienzo-Fin (CF). En el ejemplo de la figura 4 se pueden observar casi todos los tipos de relaciones. La que se observa con mayor regularidad es el tipo Fin-Comienzo e indica que una actividad puede comenzar después de que termine la actividad precedente. La actividad A posee una relación de FC con las actividades C y D. Por otra parte, la actividad A también tiene una relación CC con la actividad B con un desfase del 50% del avance de A. En este caso la actividad B puede comenzar cuando la actividad A tenga un 50% de avance. La relación FF, se usa comúnmente cuando se requiere que dos actividades terminen simultáneamente, o desfasadas por algún tiempo para poder continuar con otra actividad que dependa de las dos primeras, y así poder ahorrar recursos. En el ejemplo anterior se puede observar que la Actividad G depende del término de las actividades E y D, en tanto la actividad D puede terminar dos días después que termine la actividad E. La relación de precedencia CF no es muy utilizada.

## 2.5.3 Estimar los recursos de las actividades

Estimar los recursos de las actividades consiste en considerar el tipo y las cantidades de materiales, personas, maquinarias que se necesitan para completar cada tarea de la lista de actividades que se describió en la sección 2.5.1 y está directamente ligada a la planificación de costos, proceso que se comentará en la sección 2.4. Estas estimaciones se pueden obtener del

juicio de expertos en el tema, de estimaciones análogas con otros proyectos, estimaciones paramétricas, etc.

## 2.5.4 Estimar la duración de las actividades

Este proceso corresponde a la cantidad de tiempo; días, semanas o meses en que una actividad debe ser completada con los recursos que se tiene disponible. La duración de actividades es definida por el equipo a cargo de la planificación del proyecto, junto con las personas a cargo de cada área del proyecto. Por ser una estimación de un proceso que aún no se ejecuta, está sujeto a cambios, debido a que generalmente las duraciones de actividades varían; produciendo desvíos en el plan.

## 2.5.5 Desarrollar el cronograma

Desarrollar el cronograma consiste en utilizar como entrada todos los puntos anteriores para crear un sistema que permita visualizar el desarrollo de la totalidad del proyecto en el tiempo. Generalmente se utiliza el método del camino crítico visto en el punto 2.3 para determinar la duración total del proyecto en la carta Gantt, ver Figura 5. En el cronograma aparecen las actividades agrupadas y ordenadas en columnas con su nombre, duración, fecha de inicio y término, y las relaciones de precedencia que existen entre ellas respectivamente. Al costado derecho se puede visualizar la forma en que se trabaja un diagrama de Gantt con las relaciones representadas por flechas de precedencia.

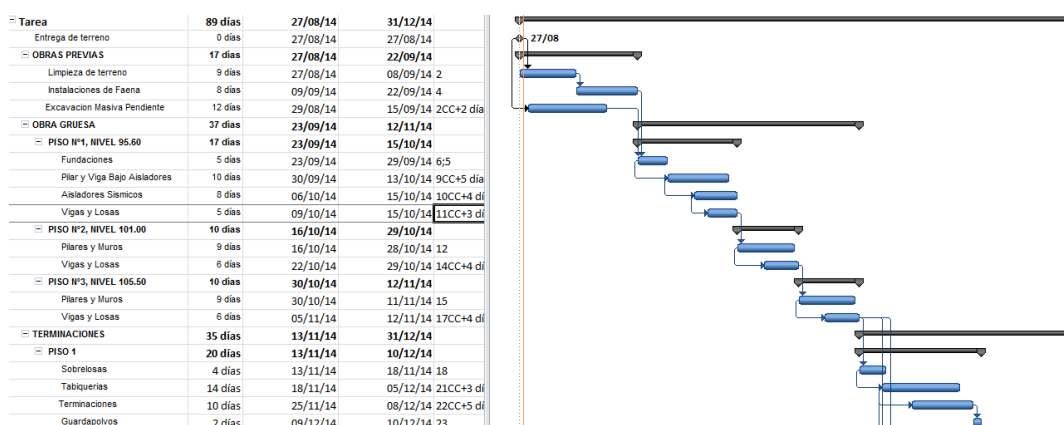


Figura 5: Ejemplo cronograma de proyecto - carta Gantt  
Fuente: Propia

## 2.5.6 Controlar el cronograma

Consiste en obtener del análisis y el seguimiento del proyecto la información necesaria para tomar las acciones correctivas que permitan avanzar de acuerdo a la planificación o modificarla si es necesario. Para que el control del cronograma sea efectivo es necesario que se comunique con claridad los objetivos del proyecto o de las distintas etapas del proyecto, que sean conocidos por los diferentes actores y que se recojan datos reales sobre el avance del proyecto. Generalmente lo más recomendado es hacer informes de avance periódicamente que permitan a todas las personas involucradas conocer el estado actual del proyecto y ante las desviaciones al plan, actuar para volver a éste. Sin embargo, si la planificación resulta ser incorrecta, es en este momento donde se debe modificar.

## **2.6 COMENTARIOS Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO**

Lo revisado hasta el momento establece las bases para realizar una planificación de proyectos de forma secuencial, se han revisado varios conceptos y se han tomado los puntos más importantes de manera de tener una base para comprender los capítulos posteriores. La planificación de proyectos debe ser entendida como un proceso que permite ordenar el desarrollo de una obra en construcción de un proyecto, anticipándose a eventos futuros que pueden comprometer la correcta ejecución del mismo. Sin embargo aunque la planificación sea perfecta, nunca se tendrán resultados perfectos. De lo único que se tiene certeza es que no hay certeza; y eso lo resume muy bien el capítulo siguiente que describe cómo los eventos de riesgos afectan la planificación de proyectos, cómo abordarlos y como obtener resultados confiables en niveles de confianza predefinidos

### **3 RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS**

El riesgo, definido como *“un evento o condición incierta que si ocurre tiene un efecto positivo o negativo en uno o más objetivos del proyecto tales como el alcance, plazo, costo y calidad”*(PMI, 2013) entrega palabras clave que deben ser analizadas. En primer lugar se habla de evento o condición incierta, es decir una situación que no se sabe con exactitud cuándo ni cómo pasará, sin embargo implícitamente tiene asociado un grado de conocimiento que puede cuantificarse, y se denominará probabilidad de ocurrencia, el segundo término clave es “que si ocurre” lo que indica que puede suceder o no. Aquí hay que hacer la diferencia con el concepto de incertidumbre, que es un evento de riesgo que siempre ocurre pero su efecto en los objetivos del proyecto no es conocido, tal como la variación de precios de un insumo.

Si un evento de riesgo ocurre, deja de ser un riesgo y pasa a ser un evento al cual reaccionar, pero si no ocurre sigue siendo un riesgo para el resto del proyecto. Finalmente la parte que dice que tiene un efecto positivo o negativo en la definición entregada anteriormente, significa que produce un impacto y también unifica la palabra riesgo dándole además una connotación positiva: una oportunidad. Aun cuando un evento de riesgo pueda tener efectos positivos o negativos, es más común usarlo sólo para referirse a la posibilidad de eventos con efectos negativos. La consecuencia que un evento ocurra afecta directamente al costo o al cronograma del proyecto, por lo que para cubrir estos eventos se necesita un monto de dinero o tiempo extra no definido en el estimado de costo o planificación inicial del cronograma. A este monto se le llamará contingencia.

#### **3.1 GESTIÓN DE RIESGO**

El PMBOK® Guide (PMI, 2013) provee una revisión de los 6 procesos de la gestión de riesgos los cuales se resumen a continuación.

##### **3.1.1 Gestión del plan de Riesgo**

Es el proceso que define como manejar la gestión del riesgo en el proyecto. Este plan es vital para la correcta comunicación de todos los actores que participan durante el ciclo de vida del proyecto. Debe entregar los roles y responsabilidades de cada actor, el presupuesto de contingencia para riesgos, una metodología para saber cómo actuar y el protocolo de la aplicación de las reservas del cronograma.

##### **3.1.2 Identificación de Riesgo**

Es el proceso de determinar cuáles riesgos pueden afectar el proyecto y documentar sus características. La clave de este proceso es anticiparse a todos los eventos que pueden causar un impacto en los objetivos del proyecto y almacenarlos en una base de datos. Este proceso debe entregar una lista de todos los riesgos y las respuestas si es que ocurre. En este proceso es ideal que todas las personas que formen parte del ciclo de vida del proyecto participen de la identificación de riesgos, con la finalidad de tener una base de datos más completa.

### **3.1.3 Análisis Cualitativo de Riesgo**

Es el proceso de priorizar los riesgos identificados para futuros análisis o acciones combinando la probabilidad de ocurrencia con el impacto. Es un análisis subjetivo y debe ser analizado por los todos los actores que participen en el ciclo de vida del proyecto, se deben definir criterios para la probabilidad de ocurrencia y criterios para el impacto. Generalmente este proceso requiere de reuniones para identificar esos criterios. Una herramienta muy útil para definir este proceso, es generar la matriz de probabilidad e impacto. Donde para cada riesgo se identifica con una probabilidad y un impacto generando un rango de valores aceptables o no aceptables y de acuerdo a ellos tomar acciones para dar respuesta a los riesgos que se van produciendo.

### **3.1.4 Análisis Cuantitativo de Riesgo**

Es el proceso de un análisis numérico de los efectos de los riesgos que ya fueron identificados. Ayudado por el análisis cualitativo de riesgos define en cuánto afecta esto al proyecto completo, para aquellos que fueron más importantes en el análisis anterior. Entrega un análisis probabilístico del proyecto que entregan un nivel de confianza variable que depende de la tolerancia que defina el planificador.

### **3.1.5 Plan de respuesta ante el Riesgo identificado**

Es el proceso de desarrollar opciones y acciones para aprovechar las oportunidades y reducir los impactos que pueda producir un riesgo. La importancia de este proceso es que maneja a los riesgos según su nivel de prioridad definido por la matriz de probabilidad e impacto. Para cada tipo de riesgo se pueden encontrar distintos niveles de respuestas.

Para riesgos negativos se tiene la siguiente clasificación:

- Evitar
- Transferir
- Mitigar
- Aceptar

Para riesgos positivos se tiene la siguiente clasificación

- Explotar
- Mejorar
- Compartir
- Aceptar



### 3.1.6 Control de riesgo

Es el proceso de implementar el plan de respuesta ante riesgos, llevar el conteo de los riesgos identificados, monitorear los riesgos residuales, identificar nuevos riesgos, y evaluar que el proceso sea efectivo a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

## 3.2 EVENTOS DE RIESGO

Muchos autores han desarrollado mecanismos para comprender la planificación de proyectos e incluir la contingencia en los análisis de costos y las holguras en la planificación del cronograma. Esta tarea ha desarrollado una intuición en los planificadores para identificar los eventos de riesgo, saber qué hacer ante su presencia y poder manejarlos de manera más rápida y efectiva (Pich et al., 2002). Por otra parte, (McCabe, 2003) muestra una serie de eventos de riesgos que deben ser considerados en las planificaciones de proyectos, siendo los más importantes los que muestra la Tabla 1. Lo importante es que esta tabla fue construida en base a la opinión de expertos de Estados Unidos y representa un agregado de eventos de riesgos que se deben considerar para poder planificar proyectos.

Tabla 1: Identificación de Riesgos

| Riesgo Asociado a  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Condiciones del terreno</b>   | Área de Construcción<br>Proyecto de Reconstrucción<br>Actividad externa al sitio de trabajo<br>Condiciones de Tráfico<br>Congestión del Terreno<br>Tramitación de Permisos, Aprobaciones<br>Seguridad<br>Restricciones de horarios de trabajo | <b>Materiales</b><br>Adquisiciones de material<br>Acopio de materiales seguros<br>Robo de materiales<br>Dependencia de la entrega de los<br>Escasez de material<br>Incendios  |
|  | <b>Mano de Obra</b>   | <b>Medio ambiente</b><br>Terremotos<br>Estaciones, temporadas<br>Lluvias<br>Humedad   |
| Sindicatos<br>Problemas laborales, Huelgas<br>Disponibilidad de mano de obra<br>Sueldos<br>Nivel de habilidades mano de obra<br>Actividades adversas potenciales<br>Lesiones del trabajo<br>Productividad Mano de obra |   | <b>Geotécnico</b><br>Consultor Geotécnico<br>Historia geotécnica local<br>Reconocimiento arqueológico hecho<br>Condiciones de la superficie inesperadas   |
| <b>Política</b>  | Actitud de la comunidad<br>Influencias de un Grupo fuerte<br>Potenciales retrasos por otras causas<br>Abandono de la obra, paralizaciones<br>Demandas públicas  | <b>Diseño</b><br>Cronograma "Fast track"<br>Equipo de Diseño<br>Edificio multifuncional<br>Definición del proyecto<br>Diseño innovador complejo<br>Especificaciones de diseño<br>Calidad del diseño<br>Cambios en el diseño |
|  |   | <b>Propietario, dueño o mandante</b><br>Tipo de propietario o mandante<br>Toma de decisiones<br>Estabilidad financiera del dueño<br>Pagos   |
| <b>Recursos que no dependen de la mano de obra</b>   | Flexibilidad del proveedor<br>Importación de equipos críticos o<br>Calidad de los Equipos<br>Falla de Equipos<br>Daños a equipos<br>Escasez de equipo<br>Robo de Equipos y/o Herramientas   |   |
|  |   |   |

Nota. Fuente: Adaptado de McCABE, B. (2003).

Es muy difícil encontrar una base de datos que permita tener en conocimiento la probabilidad de ocurrencia e impacto de los distintos elementos de riesgo y en esta memoria se trata de hacer cargo de ese problema utilizando eventos de riesgo como los de la tabla 1 y otros como el

estudio realizado sobre el retraso en las construcciones y el sobre costo de obras para aguas subterráneas en países en desarrollo como Ghana (Frimpong et al., 2003). Ellos realizan una consulta a los mandantes, contratistas y consultores de 47 proyectos identificando los elementos más comunes que producen los retrasos. Los resultados se muestran en la Tabla 2 ordenados del más al menos importante, para cada uno de los eventos de riesgo considerados. De los 47 proyectos encuestados, un total de 33 se atrasaron correspondiendo al 70% del total.

Tabla 2: Factores que causan retrasos y sobrecostos

| Factores  | RANKING | RANKING     | RANKING     | RANKING |
|---|---------|-------------|-------------|---------|
|   | Dueño   | Contratista | Consultores | Todos   |
| Dificultad de los pagos mensuales   | 5       | 1           | 1           | 1       |
| Mala gestión del contrato   | 1       | 7           | 2           | 2       |
| Adquisición de materiales   | 2       | 2           | 9           | 3       |
| Inflación   | 7       | 4           | 6           | 4       |
| Estabilidad financiera del dueño  | 12      | 4           | 3           | 5       |
| Aumento de precios de los materiales  | 4       | 5           | 8           | 6       |
| Flujo de cajas durante la construcción  | 6       | 6           | 6           | 7       |
| Deficiencias en la planificación y el cronograma  | 3       | 11          | 4           | 8       |
| Clima   | 9       | 9           | 8           | 9       |
| Las deficiencias en las estimaciones de costos entregados                               | 9       | 13          | 10          | 10      |
| Retraso en la entrega de materiales y equipos   | 11      | 14          | 13          | 11      |
| Condiciones geológicas inesperadas  | 10      | 8           | 18          | 12      |
| Las dificultades para obtener materiales de construcción a precios corrientes oficiales | 15      | 11          | 13          | 13      |
| Baja oferta   | 16      | 13          | 14          | 14      |
| Escasez de materiales y equipos   | 13      | 17          | 11          | 15      |
| Fallos frecuentes en de la construcción de la planta y equipos                          | 14      | 20          | 16          | 16      |
| Importación de materiales   | 17      | 18          | 15          | 17      |
| Retraso en la Aprobación para empezar a trabajar  | 20      | 15          | 20          | 18      |
| Control inadecuado  | 18      | 17          | 20          | 19      |
| Escasez de personal técnico   | 22      | 20          | 17          | 20      |
| Escasez de mano de obra   | 23      | 21          | 23          | 21      |
| Errores durante la construcción   | 22      | 24          | 21          | 22      |
| Problemas del terreno   | 19      | 22          | 25          | 23      |
| Espera de información   | 25      | 23          | 23          | 24      |
| Los retrasos en la inspección y pruebas   | 25      | 25          | 24          | 25      |
| Lenta toma de decisiones  | 26      | 26          | 26          | 26      |

**Nota.** Fuente: Adaptado de FRIMPONG, Y., OLUWOYE, J., & CRAWFORD, L. (2003).

Se puede observar que los riesgos van desde los factores inherentes a la tecnología y su gestión, hasta los que resultan del ambiente físico, social y financiero que engloba el proyecto, siendo los más importantes aquellos que son evitables tales como la mala gestión del contrato o el flujo de caja durante la construcción. Esto anticipa que la buena gestión a lo largo en un proyecto es de vital importancia para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

Se reitera que dada la poca información que se tiene de los eventos de riesgo que existen en la planificación y ejecución de proyectos es que se ha revisado la literatura internacional como los expuestos anteriormente y otros como (Chan, 1997) que también muestra las causas más probables de retrasos y sobrecostos en Hong Kong. Con toda esta información se confecciona una base de datos para ser utilizada en la identificación de riesgos en esta memoria la cual se mostrará en acápites posteriores.

En proyectos de infraestructura de transporte es vital tener en mente los eventos de riesgos que pueden hacer que un proyecto se retrase o cueste más. (Flyvbjerg, 2002) muestra un artículo, el cual presenta los resultados del primer estudio estadísticamente significativo del aumento de costos en proyectos de infraestructura de transporte. Son 258 proyectos de infraestructura de transporte con un valor total de 90.000 Millones de dólares y que representan diferentes tipos de proyectos, regiones geográficas (tales como Alemania, Holanda, Dinamarca, entre otros) y períodos históricos distintos. Se muestra evidencia significativa de que las estimaciones de costos utilizados para decidir cuales proyectos deben construirse son alta y sistemáticamente engañosos. Una causa de la sobrestimación de costos es que no se tiene el tiempo suficiente para estudiar bien los proyectos y a veces para tener el proyecto aprobado se ignoran una serie de elementos riesgosos para el proyecto que al final se convierten en el sobrecosto. El artículo da una serie de datos significativos de proyectos públicos que se presentan a continuación:

- En 9 de cada 10 proyectos de infraestructura de transporte, los costos están subestimados.
- Para los proyectos ferroviarios, los costos reales son en promedio 45% más altos que los costos estimados.
- **Para los proyectos de enlace fijo (túneles y puentes), los costos reales son en promedio 34% más altos que los costos estimados.**
- Para los proyectos de carreteras, los costos reales son en promedio 20% más altos que los costos estimados.
- Para todos los tipos de proyectos, los costos reales son en promedio 28% más altos que los costos estimados.
- Existe una subestimación de costos a través de 20 países y 5 continentes; parece ser un fenómeno global.
- Subestimación de costos parece ser más pronunciado en los países en desarrollo que en América del Norte y Europa (datos para proyectos ferroviarios solamente).
- Subestimación de costos no ha disminuido en los últimos 70 años. No parece haber aprendizaje sobre exactitud en proceso de estimación.
- Subestimación de costos no se puede explicar por un error y parece que se explica mejor por la tergiversación estratégica, es decir, la mentira.

- Los proyectos de infraestructura de transporte no parecen ser más propensos a la subestimación de costos que son otros tipos de proyectos de gran envergadura.

(Flyvbjerg, 2004) advierte que para todos los tipos de proyectos, los datos no apoyan que los proyectos más grandes tienen un mayor riesgo de aumento de los costos que aquellos proyectos que son más pequeños; el riesgo de aumento de los costos es alto para todos los tamaños y tipos de proyectos. Por lo que el proceso de planificación llevado a cabo de buena manera es vital para cualquier tipo de proyecto, y no solo para aquellos de grandes montos de inversión.

### 3.3 MÉTODOS PARA INCORPORAR RIESGO

#### 3.3.1 Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad es un método de visualización de que permite determinar cuáles son las variables que más influyen en el comportamiento de un proyecto completo. En este caso se muestra qué riesgo es el que tiene mayor potencial de impacto en un proyecto. Ayuda a entender las correlaciones entre las variaciones de los objetivos del proyecto, para diferentes eventos de riesgo. El típico gráfico que se genera al realizar un análisis de sensibilidad es el de tornado como muestra la Figura 6, que muestra la clasificación relativa de un riesgo frente a otro mediante la comparación entre ellos, y como es su influencia en el proyecto total. Se puede observar como varía el total del presupuesto del proyecto “x” al estar en presencia de cada evento de riesgo, de esta forma se priorizan aquellos que más hacen variar el presupuesto y con ellos se modela.

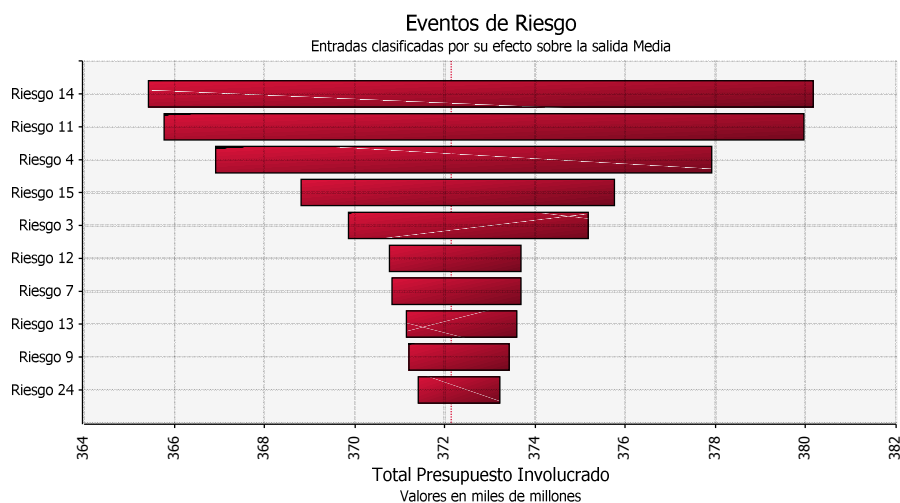


Figura 6: Ejemplo diagrama de Tornado  
Fuente: Propia

#### 3.3.2 PERT

PERT es la sigla en inglés de *Program Evaluation and Review Technique*, El método fue usado por primera vez en la planificación del desarrollo del Sistema de armas Polaris en 1958 para la flota de la Dirección de Artillería Marina de los EE.UU. Se creó para desarrollar, probar e implementar una metodología que proporcionara a la administración, una evaluación cuantitativa de los progresos realizados y las perspectivas para el logro de los objetivos en el futuro. Esto

debido a que los itinerarios fueron continuamente diferentes a los que se programaron en un principio. El concepto fue desarmar el proyecto en pequeñas actividades o grupos de actividades y de forma probabilística determinar el tiempo necesario para terminar el trabajo (Malcolm et al., 1959).

PERT se caracteriza como una red de eventos interrelacionados, independientes, secuenciados y ordenados adecuadamente. Estima tres valores, uno pesimista, optimista y el más probable en la duración (Ahuja et al., 1994). De esta manera los define el Project Management Institute:

- Valor Pesimista ( $t_p$ ): La duración de la actividad basada en el análisis del peor escenario para la actividad.
- Valor Optimista ( $t_o$ ): La duración de la actividad basada en el análisis del mejor escenario para la actividad.
- Valor más probable ( $t_m$ ): Esta estimación está basada en la duración de la actividad dados los recursos, su productividad, expectativas realistas para la realización de la actividad, dependencias de otros participantes e interrupciones.

La distribución Beta fue considerada por los desarrolladores de PERT como una posible distribución para caracterizar la duración de las actividades debido a su flexibilidad de forma (Ahuja et al., 1994).

### 3.3.3 GERT

GERT es el acrónimo de *Graphical Evaluation and Review Technique* que es un procedimiento de estudio de redes estocásticas compuestas por expresiones lógicas y nodos o flechas. Las flechas de la red se describen por dos o más parámetros (1) una probabilidad que la flecha es atravesada y (2), el tiempo en que se demora en atravesar (Pritsker, 1966). Permite una ramificación adicional extendiendo la incertidumbre a la programación, incluso agrega imprevistos que impidan terminar una actividad, cosa que no es incluida por PERT o CPM en las que hay que determinar todas las actividades que ocurren en un nodo antes de continuar

El Beneficio de GERT es que principalmente considera un número mayor de situaciones que pueden ser de utilidad para planificar proyectos debido a su naturaleza probabilística.

### 3.3.4 Simulación

La simulación es una herramienta que permite representar la realidad en un computador usando modelos. En esta memoria se utilizan dos modelos; Carta Gantt para el cronograma de un proyecto y el estimado de costo para generar un presupuesto. Un modelo de simulación de un proyecto traduce un especificado y detallado número de riesgos del proyecto en un potencial impacto en sus objetivos. El modelo es corrido muchas veces para generar resultados de forma aceptable y de esta manera obtener una base sólida para poder tomar decisiones con mayor claridad teniendo muchos resultados posibles. La principal ventaja es que no se necesita que el proyecto esté construido o en etapa de ejecución para poder visualizar posibles eventos futuros, y esto hace que la planificación sea más precisa al tomar efectos previstos antes de generar el plan.

A continuación se introduce el método de Monte Carlo para las simulaciones que se realizan en esta memoria de título, sus aplicaciones, sus ventajas y sus desventajas.

## **3.4 SIMULACIÓN DE MONTE CARLO**

### **3.4.1 Historia**

Monte Carlo es el nombre del método estadístico numérico no determinístico que mediante la utilización de números aleatorios permite aproximar expresiones matemáticas complejas. Este método fue desarrollado por Stanislaw Ulam y John Von Neumann a mediados de los años 40 al desarrollar investigaciones para la creación de la bomba atómica en la segunda guerra mundial y que se mejoró con el desarrollo de las computadoras (Liu and Chen, 1998). Llamado así debido a que Nicholas Metropolis notó que Stan Ulam tenía un tío al que le gustaba pedir prestado a sus parientes, justo cuando tenía que ir a jugar al casino de Monte Carlo en la provincia de Mónaco (Cooper et al., 1989) además la ruleta es un continuo generador de números aleatorios, necesario para que el método funcione. Actualmente se utiliza en varios campos de la ingeniería y ciencias para dar respuesta a problemas que no tienen una solución analítica, o es muy difícil encontrarla.

### **3.4.2 Características**

El método consiste en realizar una generación de variables aleatorias que representan la ocurrencia de eventos para una distribución de probabilidad asumida. Por ejemplo para el evento instalación de moldajes se le asigna una duración para la cual la actividad es completada. Esa duración corresponde a la generación de una variable aleatoria (número real) y esa variable aleatoria debe seguir la distribución de probabilidad asumida con anterioridad. Entonces para cada una de las iteraciones se tendrán distintas duraciones para la misma actividad que en su conjunto seguirán la distribución de probabilidad que se asumió. Se hace este mismo procedimiento para cada una de las actividades que son parte del proyecto o simplemente para aquellas que tienen un mayor impacto en el desarrollo del proyecto, esto según el nivel de detalle que se quiera alcanzar. Luego se resuelve la ecuación matemática que para el proyecto completo; en el caso del cronograma, es la carta Gantt y para un estimado de costo, es la suma de cada una de las partidas que lo conforman. Finalmente se repite un número suficiente de veces para entregar un resultado confiable. La clave de la simulación es poder representar la realidad de la mejor manera posible y la distribución de probabilidad de las actividades es vital.

Como esto es un método de simulación, para que funcione correctamente se deben conocer todas las variables que definen el problema, relaciones lógicas e interacciones para que el resultado sea confiable. Lo relevante del método es que, como es una simulación, se puede hacer correr el modelo las veces que sea necesario para generar diferentes escenarios modificando las variables constituyentes del problema.

Propiedades de convergencia de probabilidad de grandes muestras demuestran que para un estimador  $\phi'$  de un parámetro  $\phi$ , que perfectamente puede ser la duración de una actividad, se acerca a medida que el tamaño de la muestra aumenta. Es decir cuando la muestra tiende a infinito ( $n \rightarrow \infty$ ), la probabilidad del estimador, es el parámetro ( $P(\phi') = \phi$ ). La ley de los grandes números aporta estabilidad a la generación de fenómenos aleatorios, sin embargo si estos fenómenos aleatorios son generados de mala forma entregarán una simulación pobre también

(Barreto et al., 2006). Para efectos de esta memoria se asumirá que la generación de números aleatorios es aceptable.

Monte Carlo no es comúnmente usado hoy en día debido al poco conocimiento que se tiene de este tipo de herramientas aplicadas al campo de la ingeniería civil, sin embargo sí es utilizada en el área financiera y es perfectamente aplicable a la generación de presupuestos. En los plazos de un proyecto también es aplicable ya que para las duraciones de las actividades existen distribuciones de probabilidad que las definen, tales como la propia distribución, beta o triangular, según la información disponible.

La estimación de los tres valores es la forma más usada para contrarrestar la falta de información en práctica, donde los expertos asignan valores al peor, al más probable y al mejor caso para cada duración de una actividad en un cronograma, o un estimado de costo en el presupuesto. Empero, si así lo desea, el planificador puede ajustar los tres valores a una distribución de probabilidad tal como una Log-Normal, beta o triangular. Lo anterior se puede realizar fácilmente usando software de gestión de proyectos, tales como Microsoft Project o Primavera, junto con complementos de simulación de Monte Carlo como @Risk o Risk+.

Además en la gestión de los costos del proyecto, el planificador puede asignar distribución de probabilidad a los costos de las actividades o al grupo de ellas. Las estimaciones son producidas por un experto en el tema de costos y el producto final es una distribución de probabilidad del costo final del proyecto. Además los propietarios del proyecto suelen utilizar esta información para establecer la reserva del presupuesto del proyecto (contingencia) que se utilizara para responder a los posibles eventos de riesgos.

### **3.4.3 Aplicaciones**

Simulación de Monte Carlo se ha utilizado en muchos proyectos de construcción para entender mejor algunos riesgos. Por ejemplo, el ruido y sus efectos perjudiciales sobre la comunidad cercana es un riesgo en muchos proyectos de construcción urbana. (Gilchrist et al., 2003) han desarrollado un modelo de simulación de Monte Carlo que permite a los contratistas de la construcción predecir y mitigar la ocurrencia y el impacto del ruido de la construcción en sus proyectos. Este modelo ha sido probado y validado utilizando mediciones in situ durante las diversas etapas de la construcción de un estacionamiento de ocho pisos en Londres, Ontario, Canadá.

También se encuentra la aplicación de la simulación de Monte Carlo para el estudio de modelos económicos de empleos, problemas de transportes en semiconductores, Geofísica, Meteorología, Biología, Química, entre otros más que se encuentran en publicaciones internacionales.

### **3.4.4 Ventajas**

- Herramienta poderosa para entender y cuantificar los efectos de los riesgos de un proyecto.
- Muestra distribución de probabilidades de los resultados para cada nivel de confianza escogido y no sólo un valor
- Permite al *Project Manager* calcular las contingencias del Proyecto.

- Supera restricciones de los enfoques analíticos en la planificación de proyectos que las hacen inutilizables en situaciones prácticas (Williams, 2003).
- Muestra gráficamente las distribuciones de duración o el costo de un proyecto, que es una forma mucho más útil de visualización para responder a preguntas sobre el nivel de confianza de las fechas de finalización y costos del proyecto.
- Simulación de Monte Carlo maneja miles de datos y por lo tanto miles de caminos que pueden ser analizados (Kwak et al., 2007).
- Posibilidad de variar valores que hagan cambiar la totalidad del proyecto y poder analizar cada caso.

### 3.4.5 Desventajas

- Toma grandes cantidades de tiempo para procesar todos los datos (Williams, 2003). Depende mucho del nivel de complejidad y la cantidad de actividades que se procesen.
- Falta de Conocimiento de los *Software* hace difícil de incorporar en la industria.
- Alto costo
- La Simulación de Monte Carlo muestra una distribución de probabilidad de la duración que es muy ancha en algunos proyectos. (Williams, 2003) explica que esto se debe a que "las simulaciones se producen de forma poco inteligente, ya que asume que no hay una **acción** en la gestión. En el mundo real, es probable que se tomen medidas para recuperar los proyectos que están severamente retrasados, y algunas de estas acciones pueden (aunque no siempre) ayudar a traer el proyecto de nuevo en un rango aceptable.
- El modelo que ejecuta Monte Carlo debe ser acorde a la realidad para que los resultados sean coherentes.
- Incapacidad de estimar correctamente los valores límites de distribución. La estimación de la duración de las actividades del proyecto normalmente requiere un conocimiento experto, o datos históricos de proyectos similares. La experiencia previa y los datos detallados de proyectos anteriores del mismo tipo son a la vez útiles para mitigar esta incertidumbre, sin embargo estos datos a menudo no están disponibles. Por lo tanto, el gerente de proyecto debe tener mucho cuidado en la revisión de ambos; las estimaciones de valores y la elección de las distribuciones de probabilidad con la que modelar para evitar el síndrome "*Garbage in, Garbage Out*" (basura entra, basura salen).
- Alto escepticismo en la industria por falta de conocimiento.
- CPM es la base para aplicar este método, y en este contexto identificar las actividades predecesoras y sucesoras es vital (McCabe, 2003).



- Ningún resultado será exacto a cómo se de en la realidad. Solo se tendrán valores aproximados.

### 3.5 DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

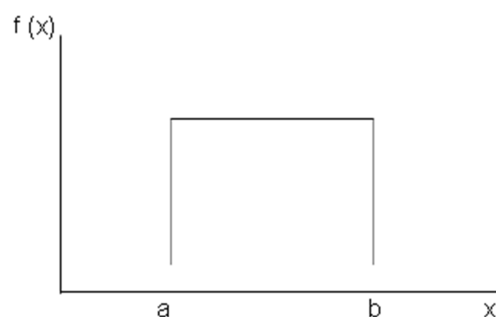
Para saber lo que es una distribución de probabilidad primero hay que conocer lo que es una variable aleatoria. (Lapin, 1983) en su libro “*Probability and statistics for modern engineering*” define variable aleatoria como una función que muestra cada evento asociado a un espacio muestral. Por ejemplo, la suma de los puntos de dos dados o la cantidad de tiempo que se demora una actividad en ser completada. Además el autor del libro agrega que los niveles de una variable aleatoria, junto con sus correspondientes probabilidades constituyen una distribución de probabilidad. En el libro se muestra el ejemplo del número de fallas de un equipo y la probabilidad que eso ocurra. En esta memoria se abordan diferentes distribuciones de probabilidad para aproximar la duración de las actividades en la planificación de proyectos y los costos en la elaboración de un presupuesto y sus contingencias.

Muchos autores proponen distribuciones de probabilidad para aproximar la duración de actividades y el presupuesto de una obra.

A continuación se presentan las distribuciones de probabilidad más comúnmente utilizadas para representar la variabilidad inherente tanto a la duración de actividades como a la estimación de costos en un proyecto.

#### 3.5.1 Distribución Uniforme

La distribución uniforme por su parte entrega valores que son igualmente probables, y su eso es aplicable cuando no se tiene información histórica del costo o duración de las actividades. Las características de la distribución Uniforme se presentan a continuación.



- Función densidad

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & \sim \end{cases}$$

- Función distribución

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & x \geq b \end{cases}$$

En que;

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$$

$$E(x) = \frac{a+b}{2}$$

$$V(x) = \frac{(b-a)^2}{12}$$

Una de las formas para utilizar la distribución uniforme en la simulación de Monte Carlo, es ocupar el Método de Transformación Inversa que consiste en los siguientes pasos.

- Se genera un número aleatorio R
- Se establece que  $R = F(x)$
- Se determina el valor de x

Luego para  $a \leq x < b$

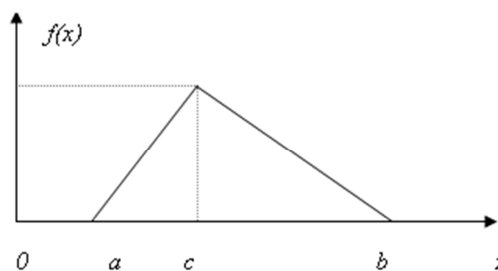
$$F(x) = R$$

$$F(x) = \frac{x-a}{b-a} = R$$

$$\Rightarrow x = a + (b-a) * R$$

### 3.5.2 Distribución Triangular

La distribución triangular utiliza tres parámetros a, b, c que corresponden al valor mínimo, el valor máximo y el valor más probable respectivamente tal como muestra la figura siguiente.



Las propiedades de a función distribución Triangular, son las siguientes:

- Función densidad

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & a \leq x \leq c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & c \leq x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases}$$

- Función distribución

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{(x-a)^2}{(b-a)(c-a)} & a \leq x \leq c \\ 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a)(b-c)} & c \leq x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases}$$

En que;

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$$

$$E(x) = \frac{a+b+c}{3}$$

$$V(x) = \frac{(b-c)^2 + (b-a)(c-a)}{18}$$

Para utilizar la distribución triangular en la simulación de Monte Carlo, se debe ocupar el Método de Transformación Inversa que consiste en los siguientes pasos.

- Se genera un número aleatorio R
- Se establece que  $R = F(x)$
- Se determina el valor de x

Luego para  $a \leq x \leq c$

$$F(x) = R$$

$$F(x) = \frac{(x-a)^2}{(b-a)(c-a)} = R$$

$$\Rightarrow x = a + \sqrt{R(b-a)(c-a)}$$

Y para  $c \leq x \leq b$

$$F(x) = R$$

$$F(x) = 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a)(b-c)} = R$$

$$\Rightarrow x = b - \sqrt{(1-R)(b-a)(b-c)}$$

La distribución triangular es muy utilizada en simulación Monte Carlo, (Walls et al., 1998) la recomienda para análisis financieros cuando no se tiene información histórica de datos, en cambio (Graves, 2001), la propone como distribución para poder comenzar a simular antes de probar con las distribuciones abiertas.

### 3.5.3 Distribución Beta

La distribución Beta es muy utilizada para modelar la duración de actividad y es la que fue considerada por los desarrolladores de PERT (Ahuja et al., 1994). La distribución Beta tiene cuatro parámetros representados por  $f(x; \alpha, \gamma, L, U)$  donde  $x$  es la variable,  $\alpha$  y  $\gamma$  son parámetros de forma y  $L$  y  $U$  son los límites. Debido a que los límites son introducidos por expertos en la materia, la distribución Beta requiere un parámetro adicional para caracterizarla (el de forma  $\alpha$ ) y esto no es tan fácil de hacer analíticamente. Es por esto que en sus inicios los desarrolladores del método PERT toman el supuesto que la desviación estándar debe ser de  $1/6$  de la diferencia de los límites  $L$  y  $U$  facilitando la determinación de valores de los demás parámetros y por eso se adoptó. Actualmente la desviación estándar se encuentra corregida empíricamente por el factor  $1/3,2$  en vez de  $1/6$ .

La distribución Beta tiene ciertas ventajas sobre las otras distribuciones (por ejemplo la Log-Normal, triangular, gamma, uniforme). Por ejemplo, la función de densidad de probabilidad se puede ajustar a muchas formas como muestra la Figura 7, y es utilizable para representar actividades que se acerquen más a las duraciones pesimista u optimista según corresponda. En este sentido, la distribución normal, no tiene esta ventaja de flexibilidad al ser simétrica en torno a la media.

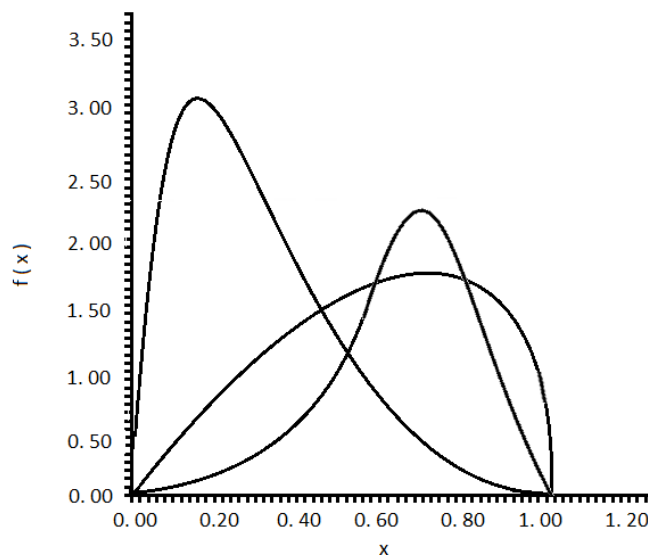


Figura 7: Distribución de Probabilidad Beta distintos parámetros de forma.

**Nota.** Fuente: ABOURIZK, S. M., & HALPIN, D. W. (1992).

La distribución beta es completamente definida por dos valores límites y dos factores de forma, su forma funcional la da la siguiente ecuación.

$$f(x; \alpha, \gamma, L, U) = \begin{cases} \frac{\Gamma(\alpha + \gamma)(x - L)^{\alpha-1}(U - x)^{\gamma-1}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\gamma)(U - L)^{\alpha+\gamma-1}} & \text{si } L \leq x \leq U \\ 0 & \sim \end{cases}$$

Donde,  $\Gamma()$  es la función Gamma,

$$\Gamma(z) \equiv \int_0^{\alpha} t^{z-1} e^{-t} dt \quad \forall z > 0$$

La desviación de la distribución beta está dada por las siguientes ecuaciones:

$$\mu = \frac{\alpha U + \gamma L}{\alpha + \gamma}$$

$$\sigma^2 = \frac{(U - L)^2 \alpha \gamma}{(\alpha + \gamma)^2 (\alpha + \gamma - 1)}$$

Los desarrolladores de PERT simplificaron la estimación de los parámetros de la media y la varianza para facilitar el procesamiento computacional de la siguiente manera

$$\mu = \frac{L + 4M + U}{6}$$

$$\sigma^2 = \left( \frac{U - L}{6} \right)^2$$

De hecho la distribución beta que satisface esas condiciones debe tener los siguientes factores de forma  $\alpha$  y  $\gamma$  (Ver Grubs, 1962)

$$\begin{array}{l} \alpha = 2 + \sqrt{2} \quad y \quad \gamma = 2 - \sqrt{2} \\ \alpha = 2 - \sqrt{2} \quad y \quad \gamma = 2 + \sqrt{2} \\ \alpha = 3 \quad y \quad \gamma = 3 \end{array}$$

A esta distribución se le denomina Beta-Pert, la cual aparece programada en complementos para hacer simulaciones Monte Carlo tales como @Risk donde se especifica valores (mínimo, más probable y máximo). El parámetro de forma se calcula a partir del valor más probable, por lo tanto es una distribución de probabilidad acotada.

AbouRizk y Halpin (1992) encontraron que la distribución Beta puede ser aproximada por una distribución de tipo Triangular para simplificar los cálculos, pues la distribución triangular solo requiere tres parámetros para la duración o costo; Pesimista, Optimista y el valor más probable.

### 3.5.4 Distribuciones Abiertas

Las distribuciones mostradas anteriormente son doblemente acotadas. Sin embargo, hay autores que proponen la utilización de distribuciones abiertas como la distribución logarítmica normal, en lugar de utilizar las distribuciones de tipo cerrado (tales como la distribución triangular) en simulaciones de Monte Carlo (Graves, 2001). En una distribución cerrada se niega explícitamente cualquier posibilidad de que la duración de la tarea se pueda completar antes que la duración mínima y sobrepase el límite máximo de duración. En proyectos reales este supuesto puede violarse, ya que a veces los eventos de riesgo pueden aparecer cuando menos se los espera y causar problemas serios en el proyecto. También sugiere que en la creación de esta distribución de composición abierta, el director de proyecto debe obtener una estimación base, una cantidad

para imprevistos, y una estimación de probabilidad de sobre costo, en lugar de estimaciones para el más probable, el peor y mejor de los casos.

Para describir una tarea utilizando una distribución abierta, tres cantidades se deben especificar:

- Estimación base, el costo o el tiempo necesario, si todo va según lo planeado.
- Cantidad de Contingencia, el costo o el tiempo adicional que pueda ser necesario si las cosas no salen según lo planeado, acorde a lo que puede ser previsto en el momento.
- Probabilidad de excedencia, la probabilidad de que el costo o el tiempo real superará la contingencia asignada.

Porcentaje de contingencia razonable entre el 10%-50% pero si no está definido el alcance de cada tarea no se podrá estimar de buena manera. La probabilidad de excedencia es justamente para capturar esa información faltante que rodea a cada tarea como lo muestra la tabla 3.

Tabla 3: Contingencia, bajo niveles de incerteza

| <b>Probabilidades de exceder el monto de reservas típicas</b>               |                    |                                   |
|---|--------------------|-----------------------------------|
| Situación Típica  | Nivel de Incerteza | Probabilidad de Excedencia típica |
| Tarea Rutinaria   | Bajo               | 1%                                |
| Tarea bastante Rutinaria (menor incerteza)                                  | Medio Bajo         | 2%                                |
| Tarea de tipo desarrollo, pero no se espera una especial dificultad técnica | Medio Bajo         | 5%                                |
| Tarea tipo Desarrollo, algunas dificultades técnicas podrían ocurrir        | Medio Alto         | 10%                               |
| Problemas técnicos esperados  | Alto               | 20%                               |
| No existe experiencia en esta área, estimar es un poco más que adivinar     | Muy Alto           | 50%                               |

**Nota:** Fuente: Adaptado de Graves (2001).

Esta tabla de ejemplo muestra las posibilidades de ir más allá de los factores de contingencia basados en el nivel de incertidumbre que muestran las actividades se define a partir de un nivel de incerteza bajo a uno muy alto. Los valores numéricos reales varían de un sector de la industria a otro. Probabilidades mayores al 50% no son usadas ya que se excede el monto de contingencia.

### 3.5.5 Distribuciones según el grado de conocimiento de las actividades


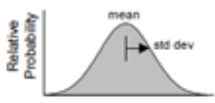
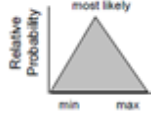
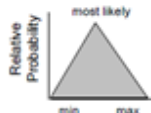

Los costos de las actividades de construcción son un componente muy importante en la mayoría de los proyectos y por este motivo las diferencias entre las estimaciones ex-ante y el valor observado ex-post han sido ampliamente estudiados. Las conclusiones a que se han llegado son que en algunos tipos de proyectos existe un claro sesgo optimista en la estimación de los costos, es decir, que el costo final del proyecto será muy superior al estimado. Por este motivo la distribución asociada a esta variable tiene que ser asimétrica y con una cola más larga hacia la derecha (es decir, hacia valores mayores que el valor más probable). Distribuciones que cumplen

con esta característica son la Beta y la Triangular. También existen otras distribuciones posibles dependiendo del conocimiento que se tiene del costo de cada actividad y se clasifican según las tres categorías siguientes (Costa y Cubela, 2014):

- **Grado de Conocimiento Bajo**, cuando se tiene tan poca información que ni siquiera se ha podido estimar un valor para la variable sino sólo un rango de valores. En este caso se puede asumir que todos los valores del rango son igualmente probables y la distribución asociada sería uniforme.
- **Grado de Conocimiento Medio**, cuando se ha podido estimar un valor para la variable que se supone que es el más probable, pero sólo se conoce el valor máximo y el mínimo que podría tomar. En este caso se suele utilizar una distribución de tipo triangular que queda definida por sólo tres valores: el máximo, el mínimo y el valor más probable.
- **Grado de Conocimiento Alto**, cuando se ha podido estimar con cierta precisión una distribución de probabilidad asociada a la variable aleatoria; costo o duración de una actividad, entonces se utiliza dicha distribución.

Un ejemplo de las consideraciones que la literatura entrega, lo otorgan Walls y Smith (1998) quienes encontraron que para ciertos tipos de costos y actividades se definían según la Tabla 4. En la cual definen ciertas distribuciones consultadas a expertos debido a que tampoco se cuenta con registro de proyectos anteriores o una base de datos a la cual consultar. Estos autores también confirman que el tipo de distribución de probabilidad a usar depende del grado de conocimiento que se tenga del costo de las actividades. Además Walls y Smith proponen la simulación de Monte Carlo con @Risk y comentan su uso.

Tabla 4: Ejemplos de tipos de distribución

| Variable   | Tipo de Distribución | Ilustración   |
|--|----------------------|---|
| Costo inicial  | Normal               |  |
| Costos de rehabilitación futuros                     | Normal               |  |
| Costo de iniciación de la construcción de pavimentos | Triangular           |  |
| Rehabilitación de pavimentos                         | Triangular           |  |
| Tasa de Retorno                                      | Triangular           |  |

**Nota:** Fuente: Adaptado de Walls et al., (1998).

### 3.6 HERRAMIENTAS PARA LA PLANIFICACIÓN Y EL RIESGO EN PROYECTOS

La principal herramienta con la cual se hará el análisis de riesgo en esta memoria es la simulación de Monte Carlo para el costo y el cronograma discutido en la sección 3.4. Es la herramienta más usada para el análisis cuantitativo de riesgo. Existen varios programas que permiten hacer simulación de Monte Carlo, para esta memoria se utilizará el complemento de Microsoft Excel, @Risk de Palisade<sup>1</sup>, ver figura 8.

Si se suponen 5000 iteraciones para calcular el costo o el cronograma usando variables aleatorias para costos y duraciones de cada actividad y sus respectivas distribuciones de probabilidad, se estarían creando 5000 pseudo proyectos. Los resultados no pueden predecir el costo o el tiempo de un proyecto con exactitud, pero sí entrega una distribución de probabilidad para el costo y duración total para un intervalo de confianza.

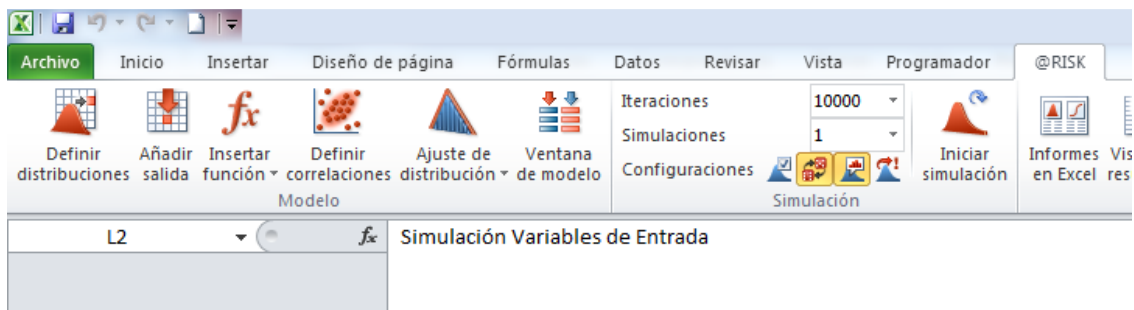


Figura 8: Interfaz @Risk  
Fuente: Propia

Además de @Risk, se utiliza Microsoft Excel, software que permite crear tablas, calcular y analizar datos y Microsoft Project, un software de administración de proyectos diseñado, desarrollado y comercializado por Microsoft para asistir a administradores de proyectos en el desarrollo de planes, asignación de recursos a tareas, dar seguimiento al progreso, administrar presupuesto y analizar cargas de trabajo para calcular la duración de las actividades. Este último, es comúnmente utilizado por los profesionales que se dedican a la planificación de proyectos.

<sup>1</sup> <http://www.palisade.com/>



## **4 APLICACIÓN DE ENCUESTA PARA EL ANÁLISIS DE RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN DE PROYECTOS**

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta la persona encargada de planificar proyectos es la falta de información con la que se trabaja, ya sea porque el proyecto es complejo, porque es algo nuevo, o simplemente por no tener tiempo para buscar dicha información. La falta de información sobre distribuciones de probabilidad o valores optimista, pesimista y más probable dificulta la adopción de simulaciones Monte Carlo en la planificación de proyectos de construcción, tanto en Chile como en otros países. Identificado este problema, esta memoria intenta disminuir la falta de información presente en la realidad chilena por medio de una encuesta, utilizando un cuestionario como la principal herramienta para hacer una consulta a personas que están a cargo de la planificación de proyectos. Los resultados de tal encuesta serán usados como insumo para hacer simulaciones Monte Carlo de dos proyectos de construcción en Chile.

### **4.1 PRESENTACIÓN**

Para conocer la realidad chilena en cuanto a la planificación de proyectos y a la gestión de riesgos se trabaja en una encuesta orientada a profesionales que trabajen en dicha área con el fin de conocer sus percepciones y así la forma en que toman decisiones basadas en su juicio experto. Los encuestados son profesionales del área de la Ingeniería civil que estudiaron en la Universidad de Chile a los cuales se les envió un una invitación por correo electrónico, con motivo de contestar un cuestionario el cual se detalla en el ANEXO B. Además, se contó con la colaboración de la división de construcción del Instituto de Investigaciones y Ensayos de Materiales (IDIEM) de la Universidad de Chile, para contactar a más profesionales del área de la construcción dedicadas a la planificación de proyectos a las que también se les envió el mismo cuestionario.

### **4.2 DESCRIPCIÓN**

La encuesta es construida como un cuestionario on-line mediante un link único el cual se envía a través de un correo electrónico. La elaboración pasa por un gestor de encuestas gratuito llamado “e-encuesta” el cual posee una interfaz simple y permite exportar los resultados en un archivo de Microsoft Excel.

La encuesta se estructura en 3 partes. La primera busca conocer características personales y laborales de los profesionales. La segunda parte busca conocer la opinión de los profesionales de área de la planificación de proyectos con respecto la probabilidad e impacto de una serie de eventos de riesgos que se les presenta. Los eventos de riesgos considerados se presentan en la tabla siguiente y fueron recopilados siguiendo los factores de riesgo más comúnmente mencionados en la literatura (Chan, 1997), (Frimpong et al., 2003), (McCabe, 2003) y (Marchant, 2012)

Tabla 5: Eventos de riesgo considerados en la encuesta

| N  | Riesgos   |
|----|---|
| 1  | Dificultad de los pagos por parte del mandante                      |
| 2  | Retraso en la adquisición y entrega de materiales                   |
| 3  | Retraso en la adquisición y entrega de equipos                      |
| 4  | Retraso en la aprobación para empezar a trabajar                    |
| 5  | Retraso en la aprobación de planos                                  |
| 6  | Retrasos en la inspección técnica de obras                          |
| 7  | Retraso de los subcontratistas                                      |
| 8  | Retrasos en toma de muestras y pruebas                              |
| 9  | Aumento de precios de los materiales                                |
| 10 | Inflación   |
| 11 | Deficiencias en la planificación y el cronograma                    |
| 12 | Deficiencias en las estimaciones de costos entregados               |
| 13 | Escasez de personal directivo y de supervisión                      |
| 14 | Escasez de personal técnico   |
| 15 | Escasez de mano de obra   |
| 16 | Lenta toma de decisiones  |
| 17 | Variaciones del proyecto producidas por el cliente                  |
| 18 | Duraciones de los contratos poco realistas impuestas por el cliente |
| 19 | Errores y desacuerdos en los documentos de diseño                   |
| 20 | Huelgas, conflictos laborales, paralizaciones de obra               |
| 21 | Posibilidad de insolvencia económica del mandante                   |
| 22 | Posibilidad de insolvencia económica del contratista                |
| 23 | Condiciones no previstas del terreno                                |
| 24 | Mal tiempo  |
| 25 | Desastres naturales   |

Fuente: Propia

La tercera parte de la encuesta busca conocer la opinión de los profesionales en las variaciones de costo y tiempo para cada una de las actividades de una edificación en altura. Las actividades típicas se obtuvieron de proyectos construidos o en construcción, como el edificio Terraza Toesca o el edificio Los Castaños, y otros proyectos. Se escogieron aquellas actividades que más se repetían. Estas se detallan en la tabla que se presenta a continuación.

Tabla 6: Actividades consideradas en la encuesta

| Actividades                        |
|------------------------------------|
| Excavaciones                       |
| Limpieza del terreno               |
| Instalación de Faena               |
| Fundaciones                        |
| Instalación de grúa torre          |
| Colocación de moldajes             |
| Enfierradura                       |
| Hormigonado                        |
| Construcción de muros perimetrales |

| Actividades             |
|-------------------------|
| Construcción de pilares |
| Construcción de muros   |
| Construcción de vigas   |
| Construcción de losas   |
| Cubierta                |
| Terminaciones           |
| Instalaciones           |
| Estructura ascensor     |

Fuente: Propia

Cabe mencionar que para esta parte se exigió que se respondiera solo si el encuestado tenía experiencia en el tema, por lo tanto el número de personas que contestaron esta parte de la encuesta fue menor.

### 4.3 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

De la primera parte de la encuesta se obtiene información relevante del espacio muestral. Las personas que respondieron la primera y segunda parte de la encuesta fueron 46 en total. Principalmente se destaca que los encuestados tienen 5 años de experiencia en promedio y la mayoría se dedica o se ha dedicado al área de planificación de proyectos ya sea en la jefatura, el área técnica o la ejecución de proyectos de ingeniería.

En la Figura 9 se muestra el rubro en que trabajan mayoritariamente los profesionales encuestados, se puede observar que la mayoría de los profesionales se desempeña en el área de construcción (60,9%), seguido por los rubros consultoría (28,3 %) y minería (23,9%)

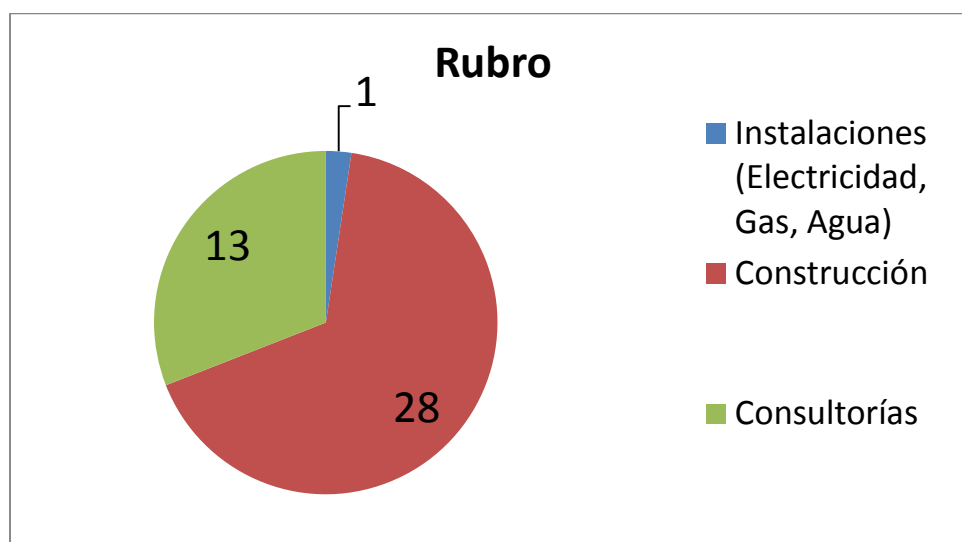


Figura 9: Rubro de los profesionales encuestados  
Fuente: Propia

En la fase constructiva de los proyectos es necesario contar con elementos que permitan solucionar de forma efectiva y eficaz los problemas que puedan presentarse durante el ciclo de vida de la construcción del proyecto. Es común que los profesionales piensen que es una pérdida

de recursos preocuparse en demasía por la planificación de proyectos y el uso de herramientas de simulación como ésta para ayudar a tomar mejores decisiones ante la presencia de elementos de riesgo. Es una buena señal que las personas que se dediquen al rubro de la construcción hayan contestado esta encuesta.

La mayoría de los encuestados se encuentran insertos en empresas de gran tamaño, por lo que las decisiones que se toman tienen un mayor peso y por lo tanto se debe contar con un poco más de información para poder tomarlas minimizando el riesgo propio de las incertidumbre de un proyecto. En tanto, para las empresas medianas o pequeñas que quieran crear un estándar en que la gestión de riesgo sea importante para el desarrollo de sus actividades como empresa, introducir este tema es importante en las etapas iniciales, de forma de poder tomar decisiones con mayor información y contrastar proyectos con evaluación de riesgo y proyectos sin evaluación de riesgo.

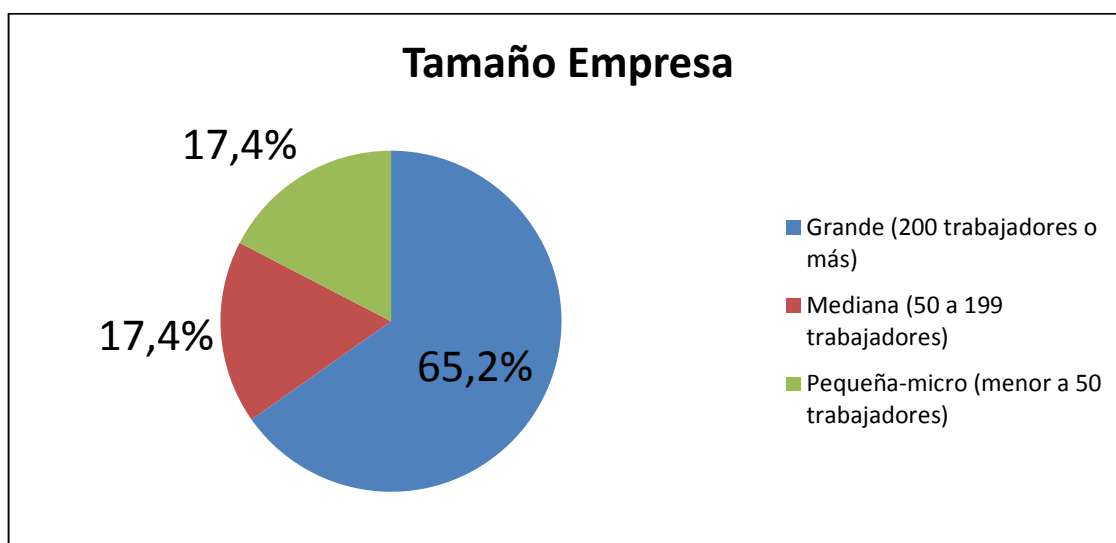


Figura 10: Tamaño de la empresa en que trabajan los profesionales encuestados  
Fuente: Propia

En los proyectos de construcción se hace la diferencia entre un organismo público o privado en el tipo de mandante que contrata para realizar una obra y el contratista. Generalmente los contratistas son empresas privadas, pero los mandantes pueden ser de ambos tipos. Si bien las personas que contestaron esta encuesta pertenecen mayoritariamente al sector privado, existe un porcentaje que se dedica al sector público y puede que una cantidad no menor de profesionales, alguna vez haya trabajado en el sector público.

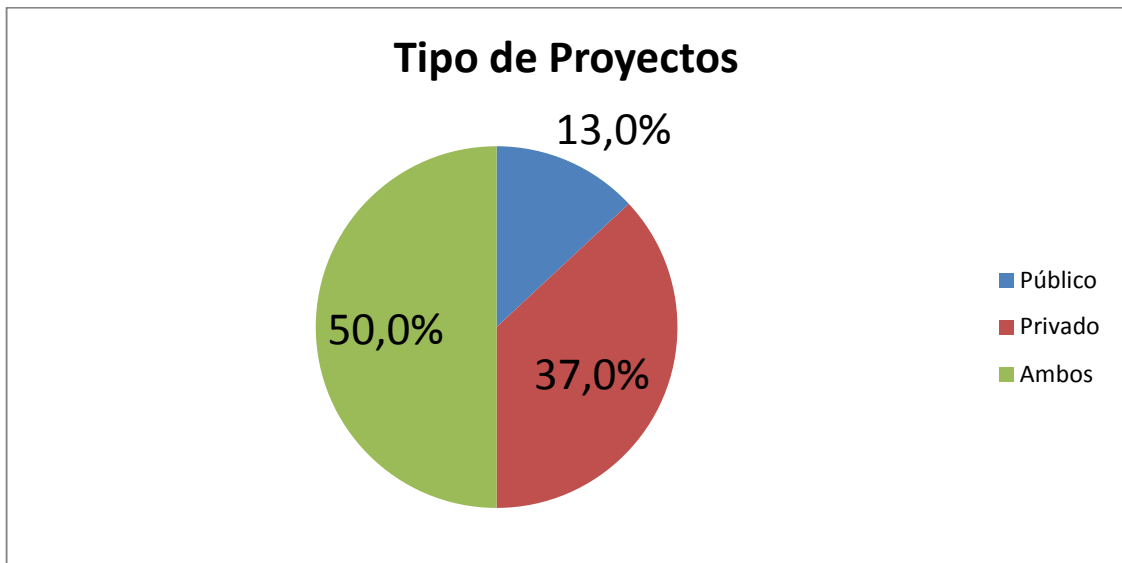


Figura 11: Tipo de Proyectos en que trabajan los profesionales encuestados  
Fuente: Propia

Parece interesante ver que en la cotidianeidad de los proyectos públicos, (entendiéndose el mandante como una entidad pública, como el gobierno o alguna municipalidad, etc.) la percepción en general, es que todos los proyectos se atrasan. Es muy fácil observar cómo en el banco integrado de proyectos se encuentran proyectos no ejecutados aun cuando el presupuesto para ellos está aprobado.

## 4.4 RESULTADOS

### 4.4.1 Análisis Cualitativo

A continuación se presentan los resultados de la encuesta. Estos resultados son una fuente de información importante para hacer simulación debido a que representa la opinión de profesionales del área de la planificación de proyectos que han trabajado en proyectos y conocen las fallas o potenciales riesgos en los proyectos del rubro. De esta forma es posible preparar un matriz de probabilidad e impacto como la que muestra a continuación, en que se multiplica la probabilidad de ocurrencia de un evento de riesgo con el impacto que pueda tener en el cronograma o en la variación de costos de alguna actividad y luego se multiplica por 100 para obtener un valor manejable. Hecho esto es posible identificar en la matriz, el rango de valores para cierto evento de riesgo. En la siguiente tabla se presenta un ejemplo de cómo podría quedar una matriz "Probabilidad x Impacto" en que:

- Verde: Leve-Ignorar
- Amarillo: Medio-Mitigar
- Rojo : Alto-Evitar

Esto se puede hacer tanto para riesgos con consecuencias positivas como aquellos en que las consecuencias son negativas y lo único que cambia son las acciones mostradas en el punto 3.1.5.

Tabla 7: Matriz Probabilidad e Impacto

|              |          | IMPACTO        |                    |                 |                   |
|--------------|----------|----------------|--------------------|-----------------|-------------------|
|              |          | Menor<br>(±5%) | Moderado<br>(±15%) | Serio<br>(±30%) | Crítico<br>(±50%) |
| PROBABILIDAD | 0%-10%   | 0,5            | 1,5                | 3               | 5                 |
|              | 10%-20%  | 1              | 3                  | 6               | 10                |
|              | 20%-30%  | 1,5            | 4,5                | 9               | 15                |
|              | 30%-40%  | 2              | 6                  | 12              | 20                |
|              | 40%-50%  | 2,5            | 7,5                | 15              | 25                |
|              | 50%-60%  | 3              | 9                  | 18              | 30                |
|              | 60%-70%  | 3,5            | 10,5               | 21              | 35                |
|              | 70%-80%  | 4              | 12                 | 24              | 40                |
|              | 80%-90%  | 4,5            | 13,5               | 27              | 45                |
|              | 90%-100% | 5              | 15                 | 30              | 50                |

Fuente: Propia

Con los datos obtenidos en la Tabla 5 y aplicando la matriz de la tabla anterior se pueden ordenar los eventos de riesgos según la importancia que ellos tienen. La siguiente tabla muestra los resultados de la probabilidad y el impacto promedio de los distintos factores de riesgo individualizados, valores que pueden ser utilizados en análisis cuantitativo como cualitativo de de riesgo.

Tabla 8: Resultados Probabilidad e Impacto ordenados según matriz

| N  | Riesgos   | Probabilidad | Impacto | P x I |
|----|---|--------------|---------|-------|
| 17 | Variaciones del proyecto producidas por el cliente                  | 71%          | 28%     | 20    |
| 12 | Deficiencias en las estimaciones de costos entregados               | 62%          | 27%     | 17    |
| 19 | Errores y desacuerdos en los documentos de diseño                   | 61%          | 28%     | 17    |
| 18 | Duraciones de los contratos poco realistas impuestas por el cliente | 61%          | 28%     | 17    |
| 11 | Deficiencias en la planificación y el cronograma                    | 64%          | 27%     | 17    |
| 7  | Retraso de los subcontratistas                                      | 59%          | 24%     | 15    |
| 2  | Retraso en la adquisición y entrega de materiales                   | 56%          | 21%     | 12    |
| 5  | Retraso en la aprobación de planos                                  | 50%          | 23%     | 12    |
| 23 | Condiciones no previstas del terreno                                | 59%          | 20%     | 12    |
| 16 | Lenta toma de decisiones  | 54%          | 22%     | 12    |
| 3  | Retraso en la adquisición y entrega de equipos                      | 55%          | 23%     | 12    |
| 22 | Posibilidad de insolvencia económica del contratista                | 37%          | 26%     | 10    |
| 15 | Escasez de mano de obra   | 45%          | 23%     | 10    |
| 4  | Retraso en la aprobación para empezar a trabajar                    | 48%          | 18%     | 9     |
| 9  | Aumento de precios de los materiales                                | 51%          | 17%     | 9     |
| 20 | Huelgas, conflictos laborales, paralizaciones de obra               | 38%          | 20%     | 8     |
| 13 | Escasez de personal directivo y de supervisión                      | 46%          | 17%     | 8     |
| 1  | Dificultad de los pagos por parte del mandante                      | 46%          | 18%     | 8     |
| 21 | Posibilidad de insolvencia económica del mandante                   | 30%          | 24%     | 7     |
| 6  | Retrasos en la inspección técnica de obras                          | 46%          | 15%     | 7     |
| 25 | Desastres naturales   | 32%          | 18%     | 6     |
| 24 | Mal tiempo  | 45%          | 14%     | 6     |
| 10 | Inflación   | 41%          | 11%     | 5     |
| 8  | Retrasos en toma de muestras y pruebas                              | 41%          | 12%     | 5     |

Fuente: Propia

Es interesante notar que según la clasificación propuesta, la mitad de estos eventos tienen una probabilidad de ocurrencia mayor al 50% y son estos los que se concentran en la parte superior de la tabla. Por otra parte la probabilidad de impacto en los objetivos del proyecto que originan estos eventos se mantienen casi constantes en la parte superior de la tabla, bordeando el 28%. Este nivel de impacto tiene una connotación de ser serio, y esto equivale a tener un incremento severo en costos y plazos, en que los requerimientos secundarios probablemente no se alcancen. Sumado a la alta probabilidad que poseen, los posiciona en el top 5 de los riesgos que deben evitarse o mitigarse, según corresponda.

De la misma forma, existen otros eventos de riesgo que tienen un mismo nivel de probabilidad x impacto, pero sus componentes individuales varían. El riesgo número 22, que corresponde a la posibilidad de insolvencia económica del mandante tiene una probabilidad de ocurrencia de un 37%, que es considerada medianamente baja en comparación con las demás, pero el nivel de impacto que podría causar este evento es alto. Casi tan alto como los que se encuentran en las primeras filas. Por su parte el riesgo número 15 que corresponde a la escasez de mano de obra, tiene una probabilidad de ocurrencia cercana al 50% pero un impacto bajo, pues no condiciona de forma tan significativa el desarrollo de la obra. Este último evento de riesgo puede ser fácilmente corregido en algunos casos, no así el riesgo número 22. Ambos eventos de riesgo se encuentran con un nivel 10 de probabilidad x impacto, pues la falta de un componente, como la probabilidad de ocurrencia se compensa con el de la probabilidad de impacto.

Otra de las consecuencias que entrega los resultados de la tabla anterior es el riesgo N° 17, que es aquel que tiene una mayor probabilidad de ocurrencia y el mayor impacto. Este evento de riesgo, tiene relación directa con el alcance y definición del proyecto. Según el libro “Project control in design engineering, A report to the Construction Industry Institute” (Diekmann, 1986) los factores clave para el éxito o fracaso de proyecto de construcción según la visión de contratistas de Estados Unidos, es la que se muestra en la siguiente tabla, en donde las causas de los eventos de riesgos considerados son comunes y concuerdan con lo expresado en esta memoria

Tabla 9: Factores clave proyectos exitosos

| <b>PROYECTOS EXITOSOS</b>  | <b>PROYECTOS NO EXITOSOS (PROBLEMAS SERIOS)</b>   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alcance bien definido</li> <li>• Planificación cuidadosa</li> <li>• Liderazgo y administración competentes</li> <li>• Buena relación mandante/contratista</li> <li>• Buenas relaciones en equipo del proyecto</li> <li>• Adaptación y respuesta rápida a cambios</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Alcance mal definido</b></li> <li>• <b>Planificación deficiente</b></li> <li>• Mala administración y dirección</li> <li>• Problemas en la comunicación entre ingeniería y construcción</li> <li>• <b>Demasiados cambios a lo largo del proyecto</b></li> <li>• Control inadecuado o insuficiente</li> </ul> |

**Nota.** Fuente: Elaboración Propia en base a documento de J. E. Diekmann (1984).

En la tabla anterior se muestra los factores que hacen que un proyecto no sea exitoso, y entre ellos se encuentra que el alcance no esté bien definido. Esto produce que durante el ciclo de vida del proyecto se vayan produciendo cambios que se condice con que el riesgo 17 se encuentre primero en la lista de la tabla Tabla 8, lo que redundará en atrasos o sobre costos futuros. Hay que recordar que mientras más avanzada esté la fase de ejecución de un proyecto, las decisiones que

se vayan tomando son más costosas y tienen menor influencia en el proyecto. Es por esta misma razón que el proyecto de Beauchef 851, tuvo tantos problemas en terminar. Uno de los principales eventos de riesgo que ocurrió durante el proyecto, fue el cambio del alcance del proyecto en donde se propuso estructurar una escalera tipo caracol que no estaba prevista en diseños iniciales, esto produjo una serie de atrasos en la entrega final del proyecto. Si bien este no fue el único motivo, fue uno de los más importantes.

#### **4.4.2 Análisis Cuantitativo**

La siguiente parte de la encuesta es más específica ya que pregunta por variaciones que pueden tener las partidas típicas de edificios de construcción en altura que se mostraron en la Tabla 6. Específicamente se pregunta por aquellas actividades descritas en un diagrama de Gantt típico de este tipo de construcciones.

Al ser una pregunta específica, en la que se pide que el encuestado responda solo si tiene experiencia, las respuestas disminuyeron a un 30% teniendo un total de 10 profesionales en la muestra.

La pregunta que se hizo fue indicar los rangos de variación usuales en la duración de un conjunto de actividades comunes en la construcción de edificios, según la experiencia de cada encuestado.

Se les pide estimar los valores mínimos y máximos que la duración de una actividad puede tener, como porcentaje del valor usado en la planificación inicial, que corresponde al 100%, el cual será interpretado como el valor más probable para hacer simulación. A continuación se presenta un ejemplo de respuesta a esta pregunta:

Ej: Hormigonado.

Valor mínimo: **90**

Valor máximo: **115**

\*Donde el valor más probable siempre es 100%.

Esto significa que el encuestado estima que el plazo real de completar la tarea de hormigonado está entre el 90% (mejor escenario) y el 115% (peor escenario) del plazo más probable (100%). Las tablas siguientes muestran los resultados obtenidos de la encuesta en que se saca la media, mediana y moda de las repuestas para los rangos pedidos. La media corresponde a la principal medida de tendencia central que se utiliza en estadística y es la suma de los datos dividido por el número total de ellos, la mediana corresponde el valor central de una serie de datos ordenados y la moda es el valor que aparece con mayor frecuencia en una muestra.



Tabla 10: Límite inferior (escenario optimista) de la duración de actividades

|                        | <b>Actividades</b>                 | <b>Media %</b> | <b>Mediana %</b> | <b>Moda %</b> |
|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|---------------|
| <b>Límite Inferior</b> | Excavaciones                       | 89             | 90               | 90            |
|                        | Limpieza del terreno               | 88             | 90               | 80            |
|                        | Instalación de Faena               | 92             | 95               | 95            |
|                        | Fundaciones                        | 92             | 92,5             | 95            |
|                        | Instalación de grúa torre          | 89             | 90               | 90            |
|                        | Colocación de moldajes             | 89             | 90               | 90            |
|                        | Enfierradura                       | 91             | 90               | 95            |
|                        | Hormigonado                        | 92             | 92,5             | 95            |
|                        | Construcción de muros perimetrales | 92             | 90               | 90            |
|                        | Construcción de pilares            | 90             | 90               | 90            |
|                        | Construcción de muros              | 91             | 90               | 90            |
|                        | Construcción de vigas              | 92             | 90               | 90            |
|                        | Construcción de losas              | 93             | 95               | 95            |
|                        | Cubierta                           | 91             | 95               | 95            |
|                        | Terminaciones                      | 94             | 95               | 95            |
|                        | Instalaciones                      | 93             | 92,5             | 90            |
|                        | Estructura ascensor                | 92             | 90               | 90            |

Fuente: Propia

Tabla 11: Límite superior (escenario pesimista) de la duración de actividades

|                        | <b>Actividades</b>                 | <b>Media %</b> | <b>Mediana %</b> | <b>Moda %</b> |
|------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|---------------|
| <b>Límite Superior</b> | Excavaciones                       | 127            | 127,5            | 110           |
|                        | Limpieza del terreno               | 110            | 110              | 105           |
|                        | Instalación de Faena               | 112            | 107,5            | 105           |
|                        | Fundaciones                        | 117            | 115              | 115           |
|                        | Instalación de grúa torre          | 114            | 110              | 105           |
|                        | Colocación de moldajes             | 114            | 115              | 110           |
|                        | Enfierradura                       | 117            | 115              | 115           |
|                        | Hormigonado                        | 118            | 115              | 115           |
|                        | Construcción de muros perimetrales | 111            | 110              | 110           |
|                        | Construcción de pilares            | 118            | 120              | 120           |
|                        | Construcción de muros              | 118            | 120              | 120           |
|                        | Construcción de vigas              | 118            | 120              | 120           |
|                        | Construcción de losas              | 117            | 120              | 120           |
|                        | Cubierta                           | 123            | 125              | 130           |
|                        | Terminaciones                      | 140            | 135              | 130           |
|                        | Instalaciones                      | 134            | 135              | 150           |
|                        | Estructura ascensor                | 127            | 130              | 110           |

Fuente: Propia

Se puede observar que en las tablas la media, la mediana y la moda no varían mucho, ya que todas son medidas de tendencia central. Para las simulaciones que vienen en los capítulos posteriores se utiliza la media de las respuestas debido a que representa más la opinión del promedio de las personas, incluso es fácil desprender que para una edificación típica en altura conformada por las partidas que muestran las tablas anteriores, el promedio de la duración del conjunto de actividades varían entre un 90% y un 120%.

A continuación se muestran dos gráficos que muestran como varían las respuestas de todas las estimaciones hechas por los profesionales para los límites superiores e inferiores de la estimación<sup>2</sup>.

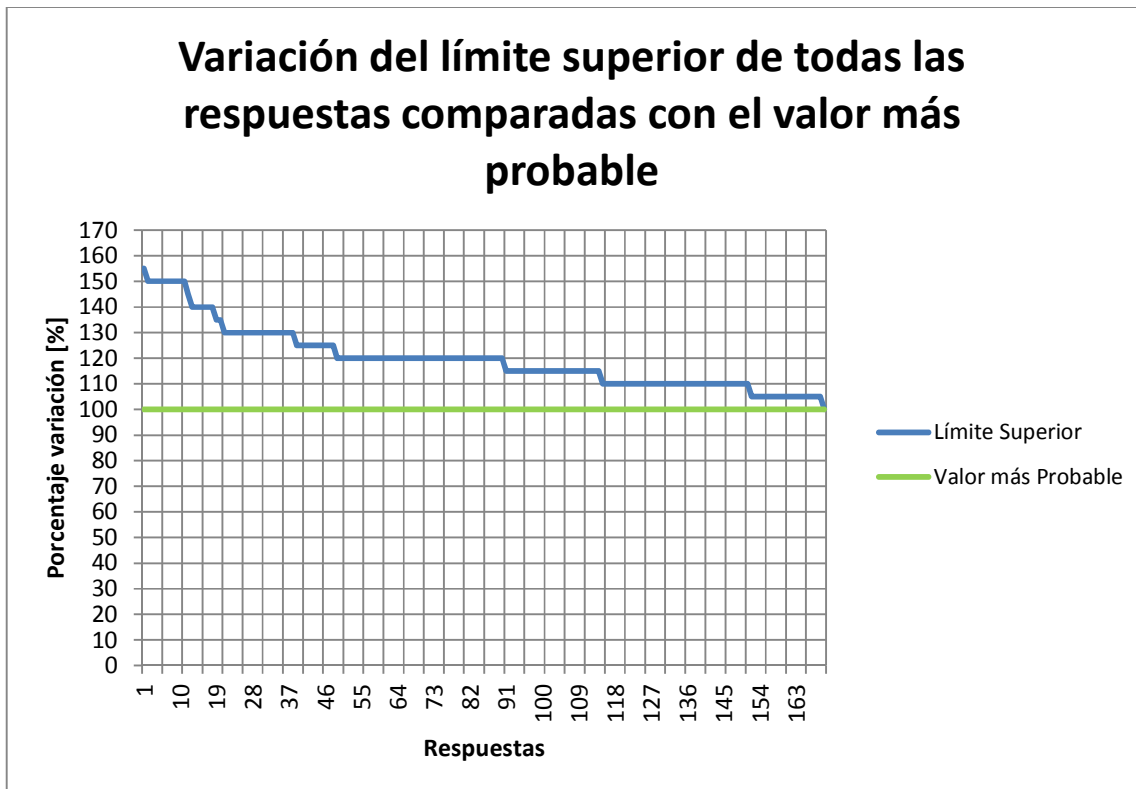


Figura 12: Variación estimaciones de todas las respuestas para el límite superior  
Fuente: Propia

El valor más probable, representado en color verde, es la estimación de las actividades en la planificación inicial de un proyecto. En palabras más simples, es aquella duración que tendrían las actividades si es que todo sale como estaba planeado y es equivalente al 100%. El gráfico anterior muestra una comparación entre el valor más probable y el límite superior de todas las respuestas recibidas, las cuales abarcan todas las actividades que estructuran un edificio en altura tal cual como se definió en la encuesta. Se puede observar que gran parte de las respuestas se acumulan entre los rangos 110%-130% equivalente a 140 respuestas aproximadamente. Lo que muestra una fuerte sobreestimación de las actividades, contrario a lo que ocurre con las subestimaciones. El rango de variación se mueve entre el 85% y 95%, rango mucho más acotado y que representa la opinión de 150 personas aproximadamente. Esto se condice con la preferencia que tienen los profesionales de sobrestimar más que subestimar costos u duraciones en proyectos de ingeniería. Lo que permite resguardar montos de dinero o tiempo ante posibles eventos de riesgos que puedan aparecer en el ciclo de vida del proyecto. Como conclusión, se puede decir que la duración y costo de actividades sí tienen un sesgo hacia el límite superior por lo que para este tipo de proyectos, las distribuciones que mejor la definen deberían ser distribuciones asimétricas con una cola más larga hacia la derecha. Entonces, es más probable atrasarse que adelantarse en el término de una actividad, lo que es un resultado esperado. La novedad de esta

<sup>2</sup> Los datos se han ordenado de mayor a menor para una mejor visualización.

encuesta es que permite cuantificar el efecto de los atrasos y adelantos de acuerdo a percepciones basadas en la experiencia de los encuestados.

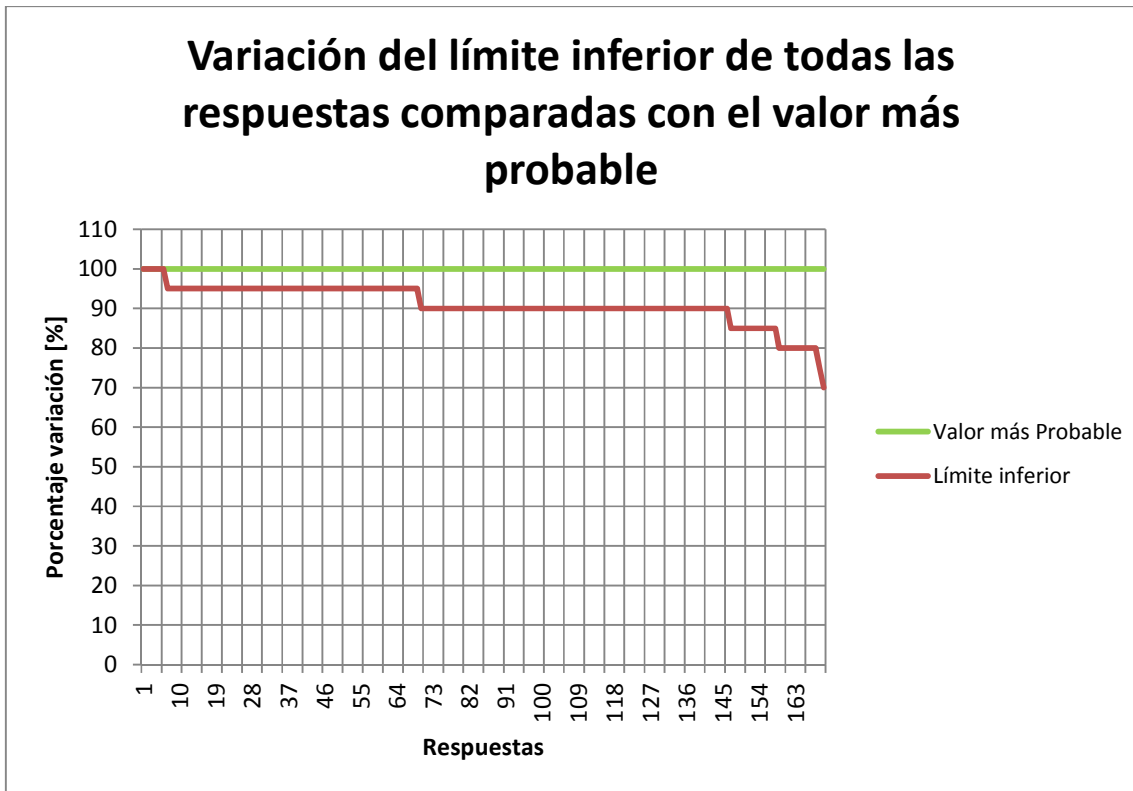


Figura 13: Variación estimaciones de todas las respuestas para el límite inferior  
Fuente: Propia

Por otra parte es posible visualizar de mejor manera esta por partidas, tal como lo muestra la Figura 14 en que las partidas que más se sobrestiman son:

- Excavaciones
- Terminaciones
- Instalaciones
- Estructura ascensor

Es lógico pensar que esto sucede por la poca información que se tiene de estas actividades ya que existe mayor incertidumbre en la primera por tratarse del suelo y en las últimas por tratarse de actividades que se hacen luego de terminar la obra gruesa y por lo tanto están condicionadas por obras que se hacen previamente. En tanto, la subestimación es casi constante en todas las actividades y ambos gráficos muestran esa cualidad.

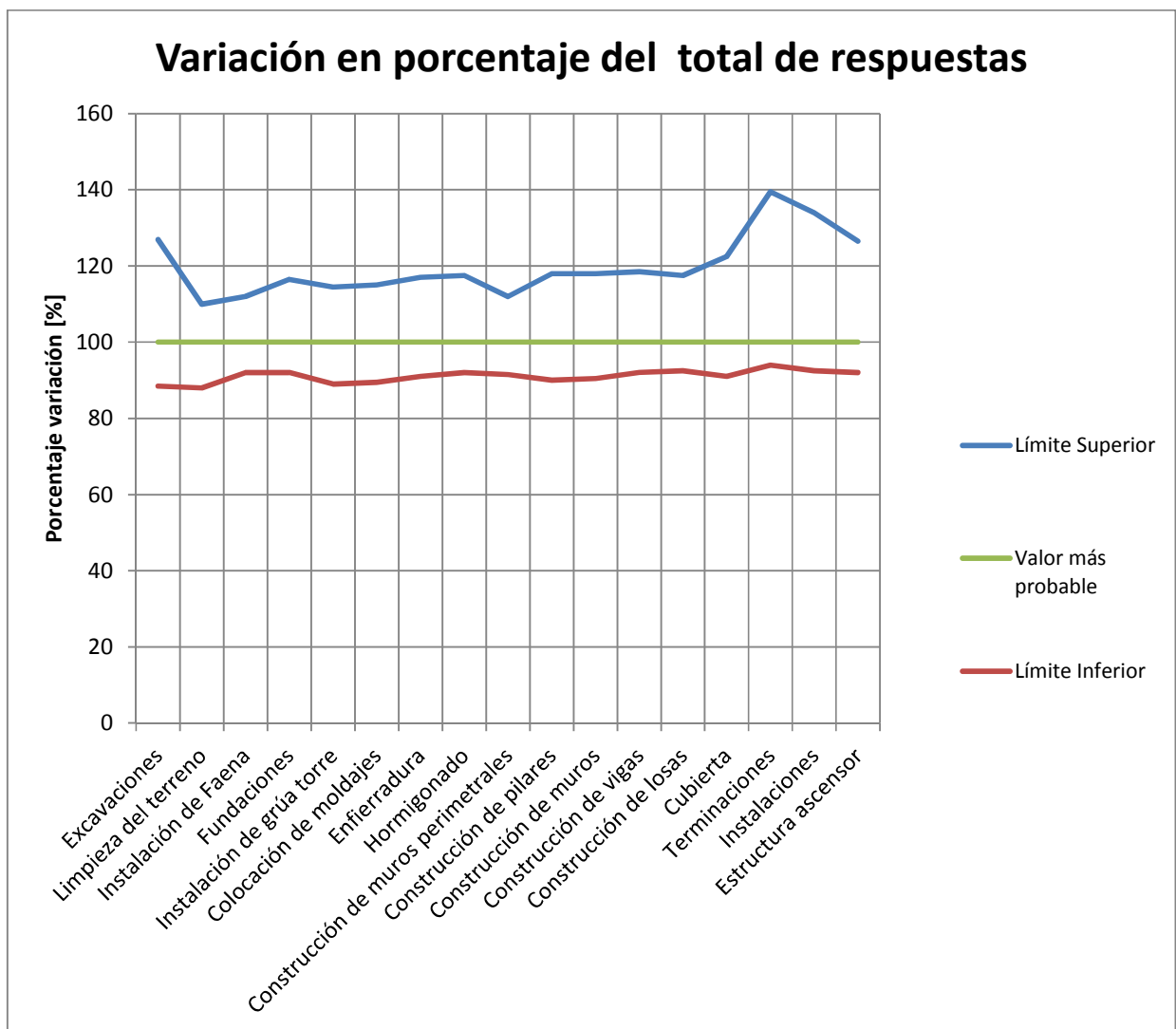


Figura 14: Variación estimaciones por actividad  
Fuente: Propia

Es interesante observar que el orden en que se encuentran las actividades es el que se usa en la realidad para construir un edificio, se puede inferir del gráfico que las mayores variaciones se producen en el principio y final de una obra de edificación en altura.

Para las actividades que presentan mayor variación en el límite superior se observa que en ninguna de ellas a excepción de la actividad “terminaciones”, existe común acuerdo sobre los porcentajes de la estimación del valor pesimista o límite superior. En la actividad de terminaciones existe un poco más de consenso por el valor 130% y 150%. Por otra parte el límite inferior (valor optimista) se mantiene constante para todos los casos, muy cercano al 90%.

Por otro lado, aquellas que tienen menor variación son instalación de faenas y la construcción de muros perimetrales, que son actividades que no tienen mucha dificultad y siempre se hacen de la misma forma, eso podría explicar la baja dispersión de los datos. Todos los datos han sido ordenados de menor a mayor para una mejor caracterización.

- Excavaciones

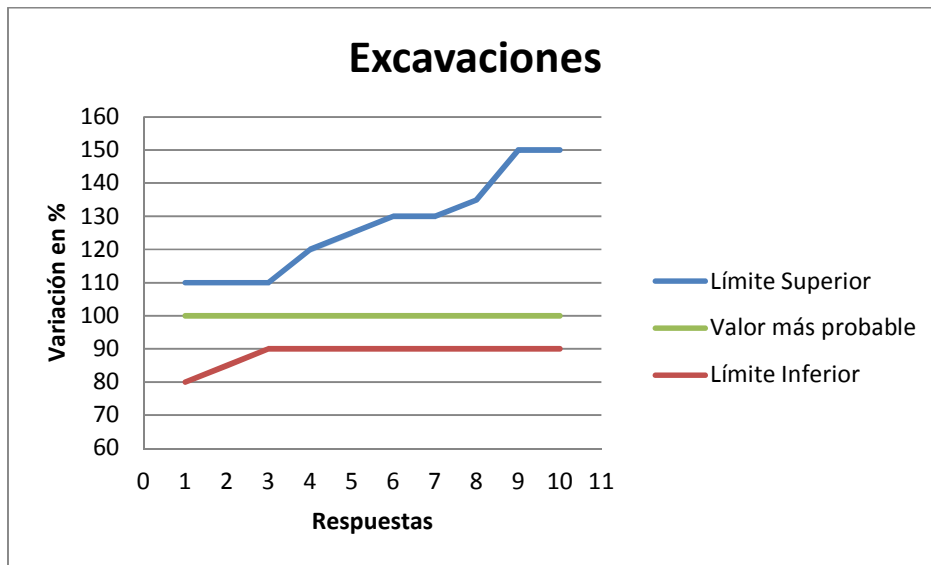


Figura 15: Variación de respuestas actividad: Excavaciones  
Fuente: Propia

- Terminaciones

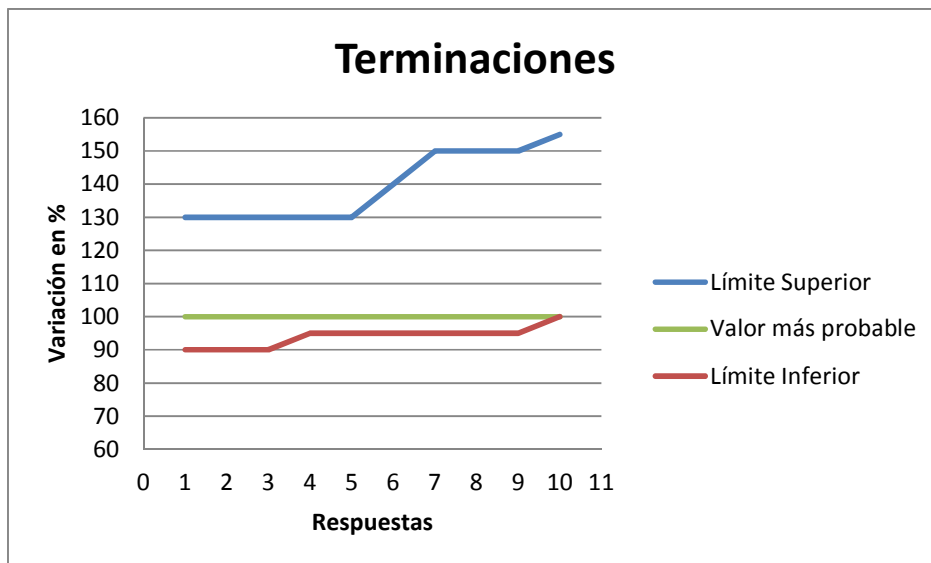


Figura 16: Variación de respuestas actividad: Terminaciones  
Fuente: Propia

- Instalaciones

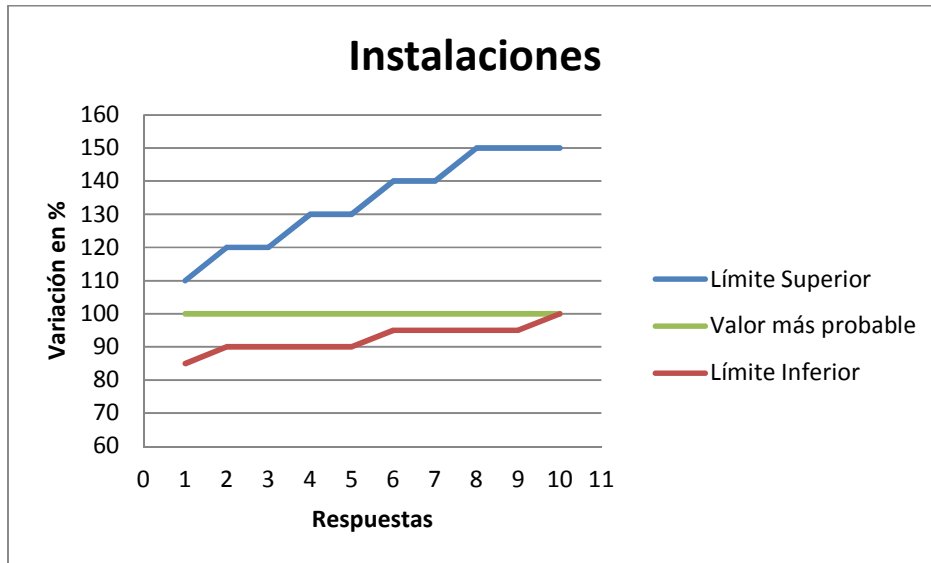


Figura 17: Variación de respuestas actividad: Instalaciones  
Fuente: Propia

- Estructura ascensor

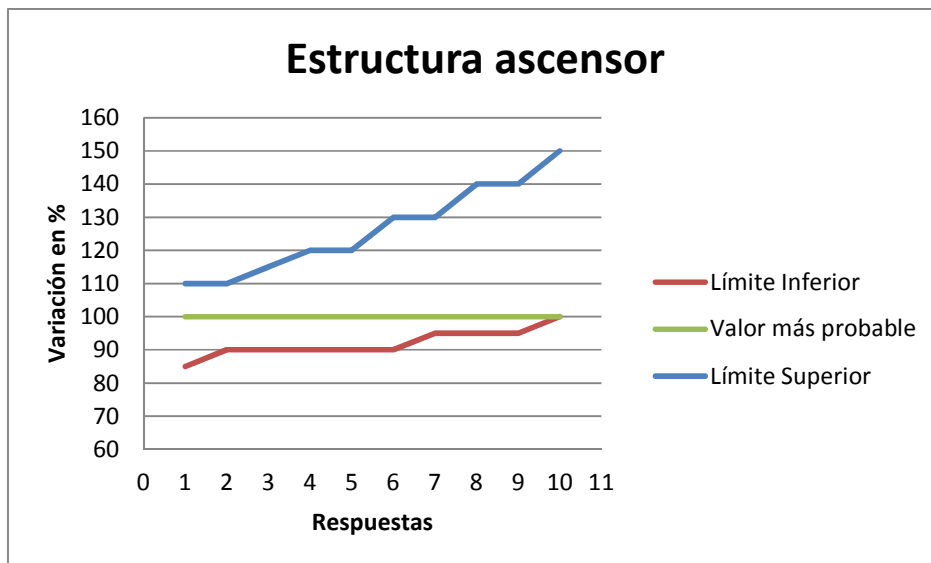


Figura 18: Variación de respuestas actividad: Estructura ascensor  
Fuente: Propia

- Instalación de Faena

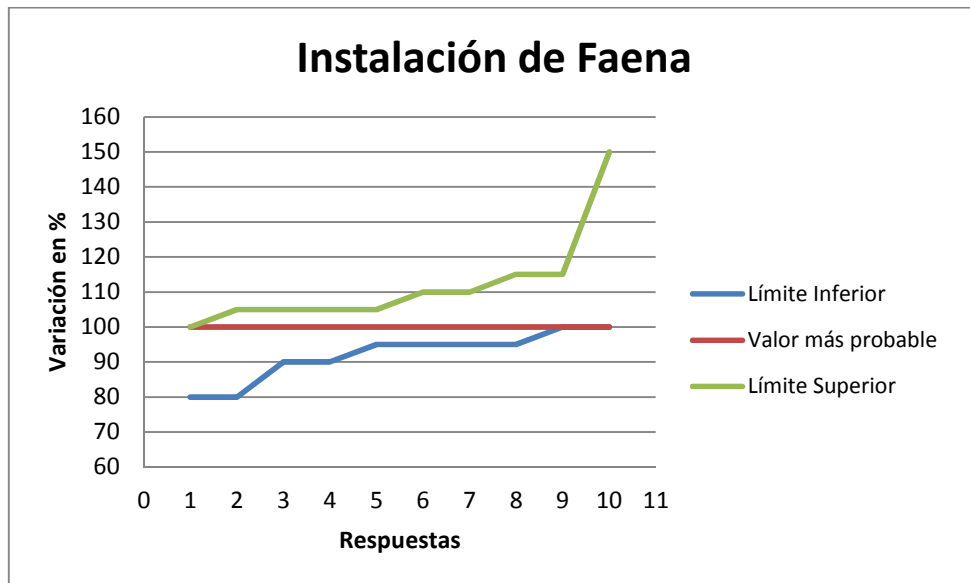


Figura 19: Variación de respuestas actividad: Instalación de faena  
Fuente: Propia

- Construcción de muros perimetrales

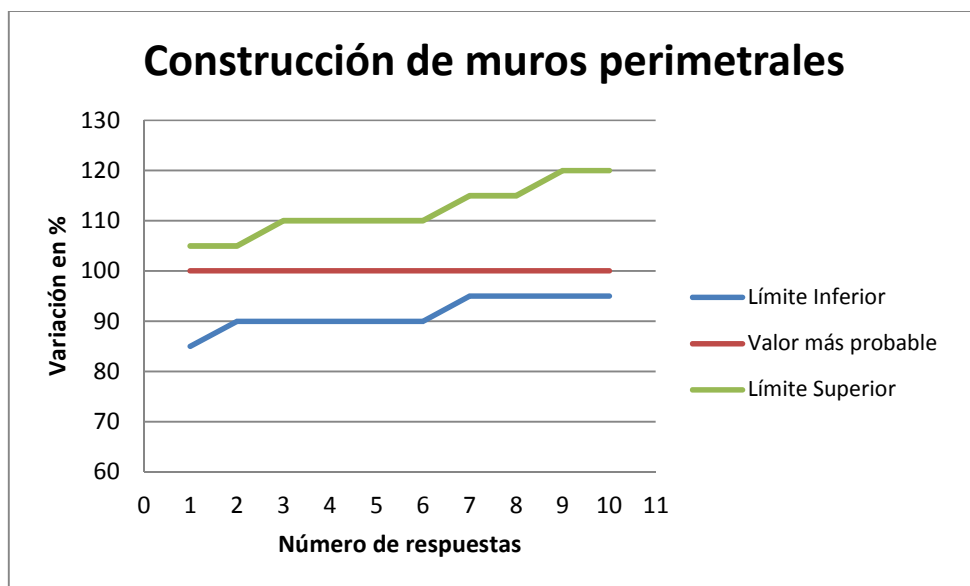


Figura 20: Variación de respuestas actividad: Construcción de muros perimetrales  
Fuente: Propia

Las demás actividades muestran un comportamiento muy parecido y sus medias se encuentran bordeando los 90% en el límite inferior y el 120% el límite superior.

## **4.5 CONCLUSIONES ENCUESTA**

Los resultados de la encuesta se utilizarán de aquí en adelante como variable de entrada para las simulaciones de Monte Carlo aplicadas en el costo y el cronograma de los proyectos en estudio.

Específicamente se aplicará el método de simulación de Monte Carlo al presupuesto del Puente sobre el Canal de Chacao, que se verá en el Capítulo 5. En este capítulo se utilizarán los datos de probabilidad e impacto para los resultados y el cálculo de las contingencias del proyecto. En el cronograma del Puente del Chacao y de un proyecto de construcción de un Centro de Formación Técnica (edificio en altura), que se verá en el Capítulo 6, se utilizarán los datos de estimación de límites en la construcción típica de edificios en altura como variables de entrada para poder simular con datos obtenidos de experiencias profesionales.

La información presentada en este capítulo es valiosa debido a que no se conocen encuestas o no son de dominio público de este tipo en la literatura técnica chilena y aunque los resultados estén basados en pocas respuestas, sienta las bases para poder masificar la encuesta al resto de profesionales que se dediquen al área de la construcción para así poder estudiar con mayor detalle las variaciones en los proyectos debido a diferentes eventos de riesgo.



## 5 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN MONTE CARLO: ANÁLISIS DE COSTO

### 5.1 PUENTE SOBRE EL CANAL DE CHACAO

En este capítulo se analiza el presupuesto del contrato de la obra “Diseño y construcción del puente Chacao, región de Los Lagos” adjudicado por el consorcio OAS-Hyundai-Systra-AAS Jakobsen, compuesto por:

- Constructora OAS S.A.
- Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd.
- Systra S.A.
- Dr. Ing. A. AAS Jakobsen AS.

Esta información fue obtenida a través de la Ley de Transparencia a la Dirección de vialidad a través del Sistema de atención Ciudadana del MOP (Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile) en donde la oferta económica del proyecto adjudicado asciende a los \$360.134.000.000 (equivalente a USD \$650 millones aproximadamente). A continuación se presenta un resumen del documento obtenido mediante la Ley de Transparencia en que se detallan las partidas con las que se trabaja en los acápite siguientes.

Tabla 12: Detalle presupuesto Puente del Chacao

| Identificación | Etapas                                | COLUMNA 1,<br>Porcentaje a pagar respecto del presupuesto total ofertado (%) establecido por el MOP | COLUMNA 2,<br>Porcentaje a pagar respecto del presupuesto total ofertado (%) establecido por el licitante con una variación máxima del 10% por cada etapa, de aquel porcentaje establecido por el MOP en la Columna 1 | Monto de dinero a pagar respecto del presupuesto total ofertado (%) establecido por el licitante con una variación máxima del 10% por cada etapa, de aquel porcentaje establecido por el MOP en la Columna 2 |
|----------------|---------------------------------------|---|---|--|
| 1              | Diseño definitivo                     | 0,9   | 0,99  | 3.565.326.600  |
| 2              | Fundación Estribo Norte y Estribo Sur | 1,5   | 1,65  | 5.942.211.000  |
| 3              | Fundación Pila Norte y Pila Sur       | 7   | 7,7   | 27.730.318.000   |
| 4              | Fundación Pila Central                | 13,1  | 14,4  | 51.859.296.000   |
| 5              | Elevaciones Estribo Norte y Sur       | 1,5   | 1,5   | 5.402.010.000  |

| Identificación | Etapas   | COLUMNA 1,<br>Porcentaje a pagar respecto del presupuesto total ofertado (%) establecido por el MOP | COLUMNA 2,<br>Porcentaje a pagar respecto del presupuesto total ofertado (%) establecido por el licitante con una variación máxima del 10% por cada etapa, de aquel porcentaje establecido por el MOP en la Columna 1 | Monto de dinero a pagar respecto del presupuesto total ofertado (%) establecido por el licitante con una variación máxima del 10% por cada etapa, de aquel porcentaje establecido por el MOP en la Columna 2 |
|----------------|--|---|---|--|
| 6              | Elevaciones Pila Norte   | 1,5   | 1,65  | 5.942.211.000  |
| 7              | Elevaciones Pila Central   | 3,5   | 3,85  | 13.865.159.000   |
| 8              | Elevaciones Pila Sur   | 1,5   | 1,65  | 5.942.211.000  |
| 9              | Macizos de Anclaje Norte   | 2,5   | 2,56  | 9.219.430.400  |
| 10             | Macizos de Anclaje Sur   | 2,5   | 2,5   | 9.003.350.000  |
| 11             | Cable Principal  | 21  | 18,9  | 68.065.326.000   |
| 12             | Sillas, péndolas y abrazaderas   | 4   | 3,6   | 12.964.824.000   |
| 13             | Sistemas de Apoyo Tablero-Amortiguadores   | 3   | 2,7   | 9.723.618.000  |
| 14             | 14a) Tablero Puente y Arriostramientos. Fabricación de piezas, armado de módulos de tablero y transporte   | 18  | 19,6  | 70.586.264.000   |
|                | 14b) Tablero puente y Arriostramientos. Fabricación de piezas, armado y ensamblaje de secciones de tablero (grupo de módulos), izaje, montaje y terminación del tablero. | 10  | 9   | 32.412.060.000   |
| 15             | Edificio de Operación  | 0,5   | 0,5   | 1.800.670.000  |
| 16             | Edificio mirador   | 0,5   | 0,5   | 1.800.670.000  |
| 17             | Equipamiento Edificio de Operación   | 1   | 0,9   | 3.241.206.000  |
| 18             | Equipamiento Área de servicio  | 0,5   | 0,45  | 1.620.603.000  |
| 19             | Obras Viales Accesos inmediatos  | 1   | 0,9   | 3.241.206.000  |
| 20             | Sistemas Eléctricos  | 1   | 0,9   | 3.241.206.000  |
| 21             | Sistemas Mecánicos   | 1   | 0,9   | 3.241.206.000  |
| 22             | Terminaciones del Tablero  | 1   | 0,9   | 3.241.206.000  |
| 23             | Sistema de monitoreo del puente (SMC)  | 2   | 1,8   | 6.482.412.000  |
| 24             | Marcha blanca  | 0   | 0   | 0  |
|                | TOTALES  | 100   | 100   | 360.134.000.000  |

**Nota.** Fuente: Adaptado de "Evaluación propuesta económica y carta oferta" Obra "Diseño y construcción del puente Chacao, región de los lagos" Consorcio OAS-Hundai-Systra-Aas Jacobsen obtenida de la Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile

### 5.1.1 Consideraciones al presupuesto

El presupuesto, corresponde al monto de dinero con que se cuenta para realizar un proyecto. En este sentido los supuestos que se hagan en el presupuesto del proyecto llamado “diseño y construcción del puente Chacao, Región de Los Lagos” son sólo con fines académicos para esta memoria.

Para realizar la simulación de Monte Carlo al presupuesto es necesario contar con el estimado de costos, que para este caso se toma el obtenido de la oferta económica que se mostró en el punto anterior. Éste está agrupado en partidas generales, por lo tanto no existe un nivel de detalle que permita obtener resultados de gran precisión debido a que no se tiene mucha información de las actividades que se llevarán a cabo. Se toman los datos de la columna 2 del presupuesto que corresponde al porcentaje a pagar respecto del presupuesto total ofertado (en %) establecido por el licitante con una variación máxima del 10% por cada etapa, de aquel porcentaje establecido por el MOP en la columna 1 del detalle presupuestario y se multiplica por el total presupuestado.

El total ofertado es: \$360.134.000.000 (Trescientos sesenta mil ciento treinta y cuatro millones de pesos).

Los supuestos que se realizan para la aplicación del método de Monte Carlo son los siguientes:

1. **Se toma el presupuesto ofertado como el estimado de costo del proyecto**, esto significa que se asume que no existe un análisis de riesgo en el total y por lo tanto el monto ofertado es aquel que se obtendría si es que todo sale como estaba planificado. Es decir, se ignora la existencia de un fondo de contingencia, por falta de información sobre su existencia.
2. Se varían todas las partidas del estimado de costo como un **porcentaje del costo más probable**, que es aquel indicado en la Tabla 12.
3. Todas las partidas se varían en el **mismo porcentaje**.
4. Se utilizan las distribuciones **Log-Normal, Uniforme, y Triangular**.
5. Para todas las distribuciones de probabilidad se varía el límite superior (valor pesimista) del costo de las partidas en un **5%, 15% 30% y 50% del valor más probable**.
6. Para todas las partidas, se considera que el límite inferior (valor optimista) de la estimación de costos es un **90% del valor más probable**.
7. No se considera correlación entre actividades, es decir, **actividades independientes**. Éste es el supuesto básico de la simulación Monte Carlo.

Lo que finalmente se quiere mostrar es un análisis comparativo del estimado de costo para distintos niveles de variación de las partidas que lo conforman y para las distintas distribuciones de probabilidad mencionadas anteriormente.

### 5.1.2 Desarrollo metodológico para el presupuesto

Lo primero que se debe hacer es construir el estimado de costo del proyecto en un archivo de Microsoft Excel. En este caso, consta de 24 partidas tal como lo muestra el la Tabla 12. A partir del estimado de costo es posible definir la distribución de probabilidad para cada actividad, que para el programa corresponde a las variables de entrada.

De este modo es posible configurar cada actividad para que se comporte como una distribución de probabilidad triangular utilizando valores mínimos, más probables y máximos (ver Figura 21), una distribución Log-Normal, utilizando los valores medios y la desviación estándar (ver Figura 22) o cualquier tipo de distribución. Ver capítulo 3.5

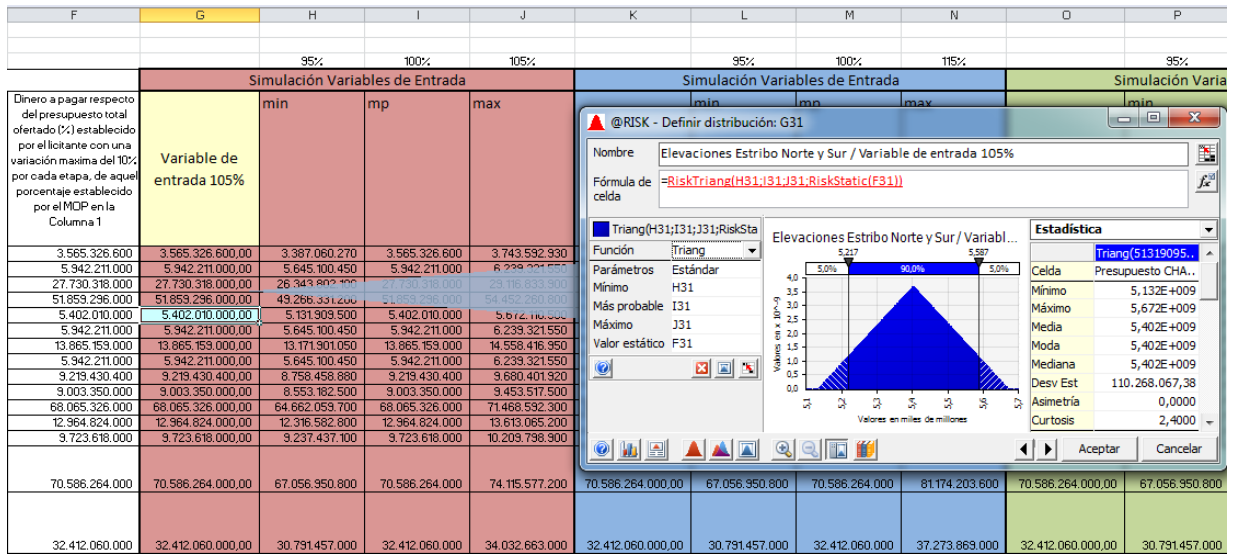


Figura 21: Ingreso variables de entrada, Distribución triangular  
Fuente: Propia

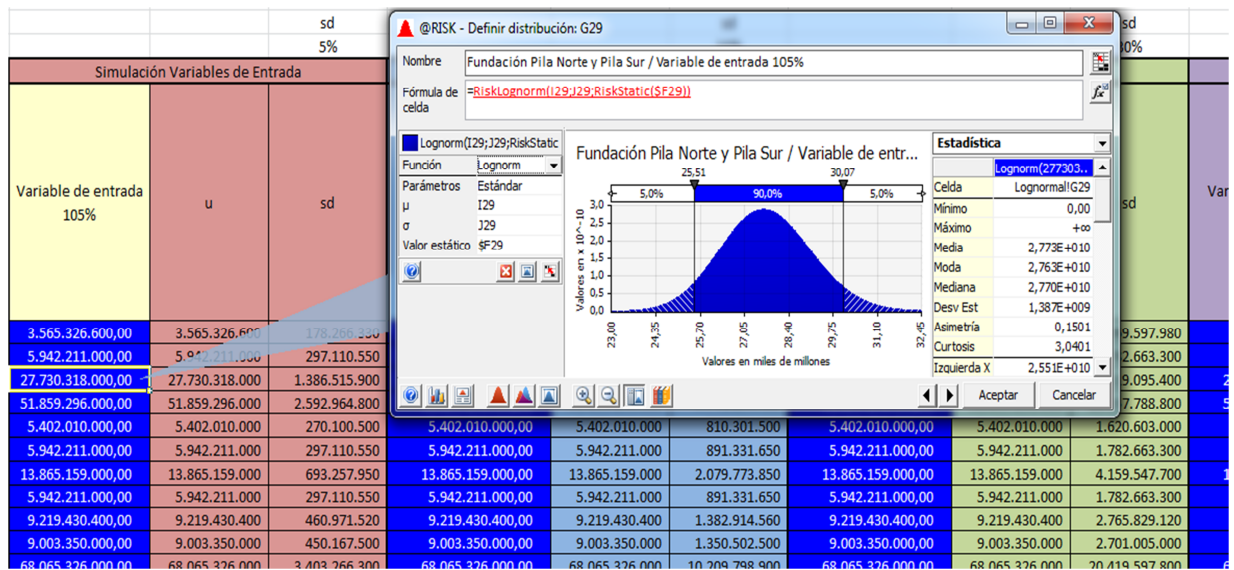


Figura 22: Ingreso variables de entrada, distribución Log-Normal  
Fuente: Propia

De esta manera se hará un barrido de los distintos niveles de sobrecostos en 5%, 15%, 30% y 50% para distintas distribuciones de probabilidad (Log-Normal, Uniforme y Triangular).

Continuando con la metodología, se debe añadir la celda objetivo, que corresponde aquella celda en la cual se quiere obtener los resultados. En el caso del estimado de costo, es la suma de los costos de todas las partidas. Tal como lo muestra la Figura 23.

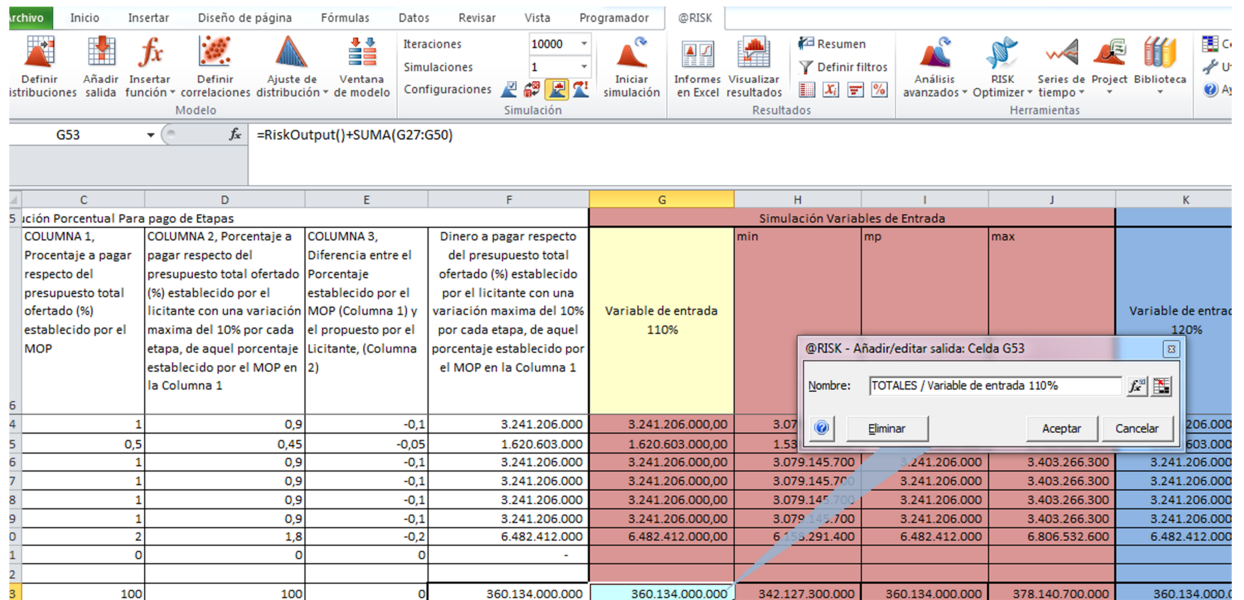


Figura 23: Variables de salida  
Fuente: Propia

Finalmente se hace correr la simulación como lo muestra la Figura 24. En este caso son 10.000 iteraciones. Como la formulación es simple (sólo sumas) el programa no se demora mucho tiempo (30 segundos).

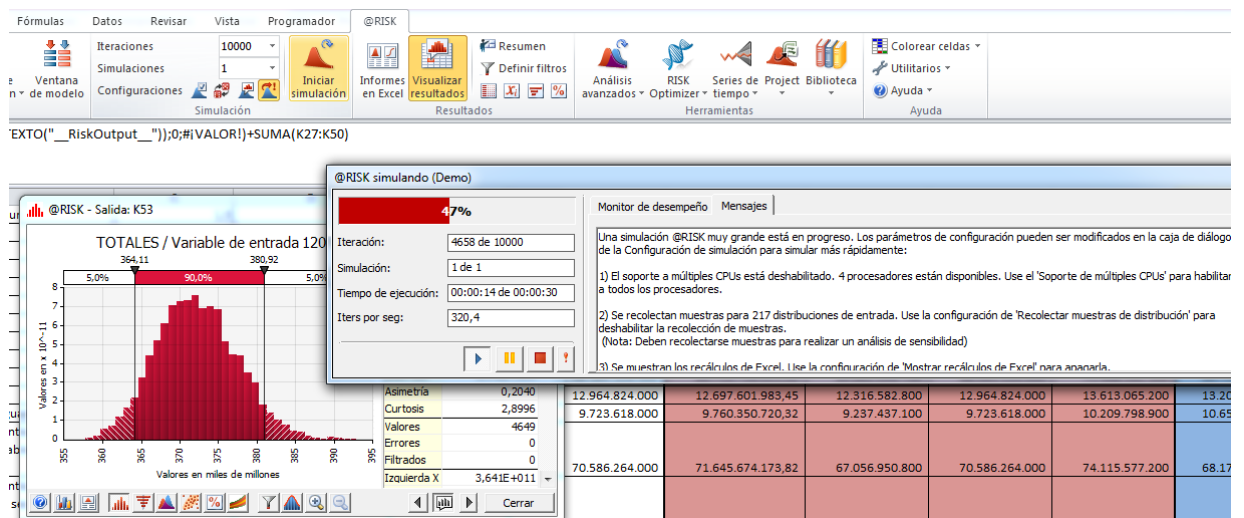


Figura 24: Simulación de Monte Carlo  
Fuente: Propia

### 5.1.3 Resultados Monte Carlo: Presupuesto

A continuación se presenta los resultados obtenidos al realizar una simulación de Monte Carlo al presupuesto de la obra “Diseño y construcción del puente Chacao, región de Los Lagos”. La Figura 25 muestra una comparación de los resultados obtenidos usando distintas distribuciones de probabilidad para cada actividad del estimado de costo manteniendo la variabilidad de cada una de ellas de forma constante ( $\pm 5\%$ ). El gráfico muestra la distribución acumulada y un histograma de distribución para cada tipo de distribución de probabilidad, triangular (rojo), uniforme (verde) y log-normal (azul) del presupuesto completo (estimado de costo + variaciones producida por riesgos).

El uso de los distintos tipos de distribuciones de probabilidad es consecuente con lo descrito en el punto 3.5.5. Dado el conocimiento que se tiene de cada actividad se puede usar una u otra distribución, en este caso se agregó además la distribución Log-Normal como una variante que representa una distribución abierta.

En la figura siguiente se puede observar que la distribución Log-Normal y uniforme, muestran mayor variabilidad que la distribución triangular y para un mismo nivel de confianza superior al 50% que la distribución Triangular. Esto es porque la distribución triangular necesita más información para poder ser utilizada y esto le otorga un poco más de precisión. Por otro lado el caso de la distribución Log-normal tiene una mayor variabilidad en los resultados por el hecho de ser abierta, permitiendo que las actividades tiendan a límites extremos. Esto es más real en las duraciones de los proyectos que en los costos de las partidas, ya que el capital es finito, pero el tiempo no lo es.

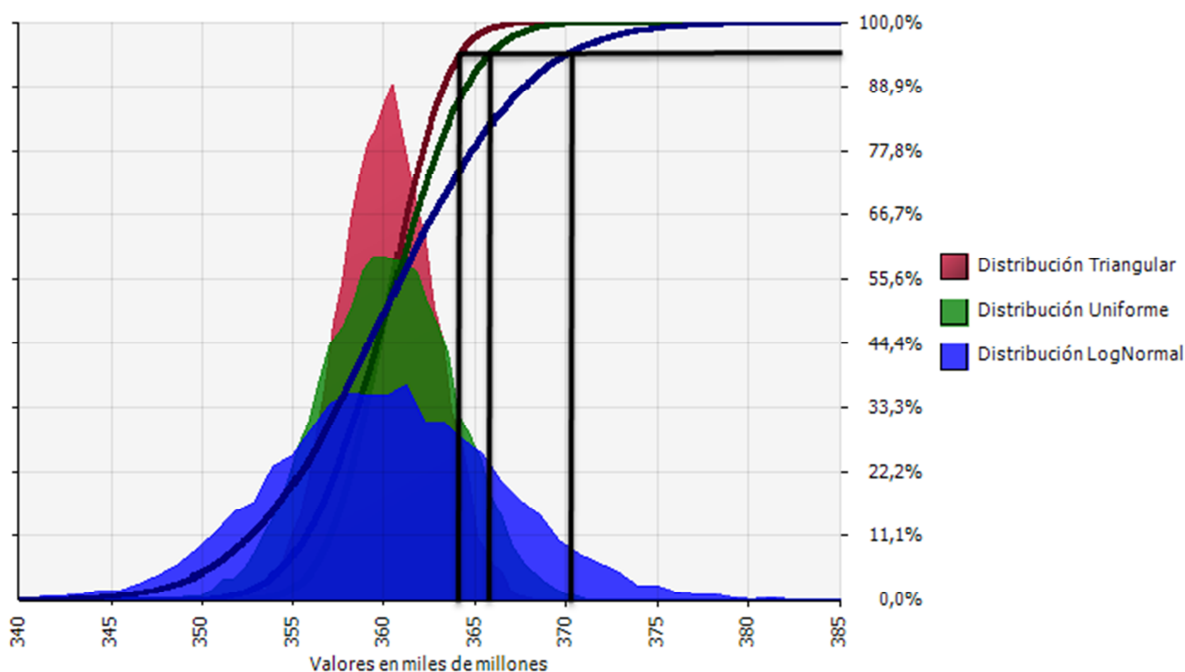


Figura 25: Comparación distribuciones de probabilidad para el presupuesto.  
Fuente: Propia

Para poder leer este gráfico, es necesario saber con qué nivel de confianza queremos usar para obtener un presupuesto. En este caso utilizaremos el valor 95% de nivel de confianza.

Esto quiere decir que para un nivel de confianza del 95% se tiene un presupuesto de:

- \$ 370.285.049.098 para una distribución Log Normal (2,82 % más que el presupuesto original)
- \$ 366.015.199.069 para una distribución Uniforme (1,63% más que el presupuesto original)
- \$ 364.245.082.987 para una distribución Triangular. (1,14% más que el presupuesto original)

La bondad del método de simulación es que muestra los costos del total del proyecto para cada nivel de confianza por lo que en base a la aversión o afecto al riesgo que se quiera tomar se pueden generar distintos montos presupuestarios y no solo un valor como lo muestra un análisis determinista. En este caso se considera un 95% de nivel de confianza para las distintas distribuciones de probabilidad, en que las actividades que conforman el estimado de costo variaron un 5%. No es tan notoria las diferencias en dinero al ser montos tan grandes pero se desprende fácilmente que para un 95% del nivel de confianza las diferencias en el presupuesto entre una distribución uniforme y una distribución triangular varían en \$1.770.117.082 que es lo que costó aproximadamente la Construcción Polideportivo Sector Alto Ovalle<sup>3</sup> en la IV Región de Coquimbo.

Estas variaciones responden a la falta de información que tiene una distribución sobre la otra, en que la distribución triangular posee tres estimadores, mientras que la uniforme solo dos. La distribución Log-Normal por otro lado posee más dispersión. Se puede observar que los histogramas de todas las distribuciones que muestran que los resultados tienden a ser normales, esto es debido al teorema central del límite, que dice que si se tienen muchas variables **independientes con el mismo tipo de distribución**, la **suma de ellas** se distribuye como una **distribución Normal**.

La elección de un tipo de distribución u otra depende principalmente de la disponibilidad de información con la que se cuente. Entonces es posible tener en un mismo estimado de costo actividades representadas con distintos tipos de distribución de probabilidad. No es posible decir cuál es mejor a otra, sin embargo en un caso ideal, lo mejor sería tener la propia distribución de cada actividad.

#### ***5.1.3.1 Distribución Log-Normal***

A continuación se presenta una comparación para una distribución Log-Normal con distintos niveles de variabilidad de las actividades que conforman el estimado de costo. La Figura 26 muestra cómo se va perdiendo precisión a medida que los rangos de valores se amplían. Entendiendo que una distribución Log-Normal NO es simétrica, es no acotada por la derecha y no toma valores negativos. Se observa que la probabilidad de tener valores sobre la media no es la misma que tener valores bajo la media. Gráficamente se puede observar una gran pérdida de precisión en el presupuesto para una desviación estándar mayor, evidente tanto al comparar histogramas como las curvas de distribución acumuladas.

---

<sup>3</sup> Ministerio de Planificación y Cooperación código BIP N°30093642-0

Se observa también que la media varía levemente, desplazándose hacia la izquierda en vez de hacia la derecha como lo hacen las distribuciones siguientes. Si bien es una buena distribución para ver lo que sucede cuando se sobrestiman cada vez más las partidas no representa muy bien la realidad debido que la distribución es muy rígida. Es decir, sobreestima costos de la misma forma en que los subestima. Además este tipo de distribución no es acotada lo que le otorga mayor imprecisión en los resultados. La distribución log normal solo sirve en aquellos casos donde un precio puede crecer mucho sin que se pueda prever límites fijos

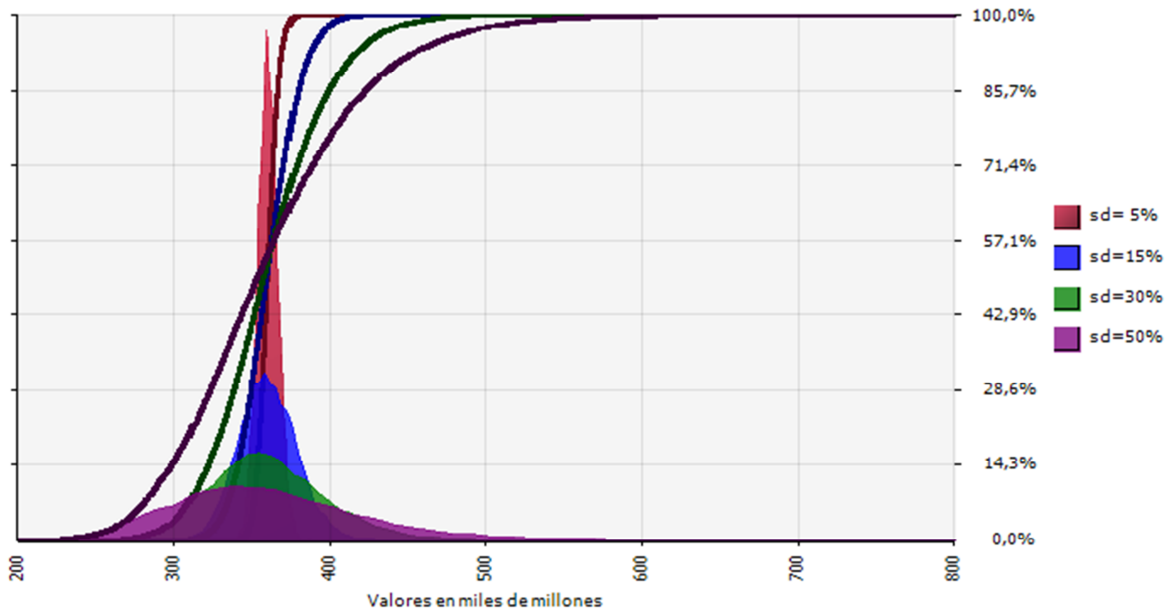


Figura 26: Variabilidad distribución Log-Normal  
Fuente: Propia

### 5.1.3.2 Distribución Uniforme

En la Figura 27 se presenta una comparación, para un mismo tipo distribución (Uniforme), con distintos niveles de variabilidad de las actividades que conforman el estimado de costo.



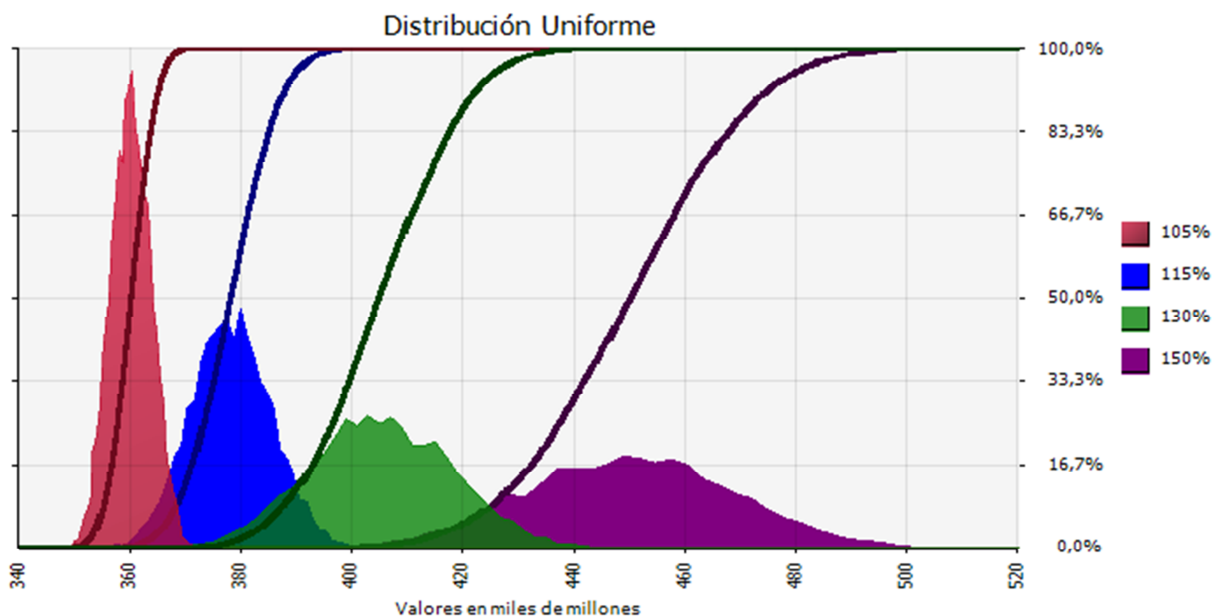


Figura 27: Variabilidad distribución Uniforme  
Fuente: Propia

La distribución uniforme en este caso representa el método de estimar costo cuando se tiene muy poca información sobre la variación que ellos pueden tener. Es por esto que se dan valores mínimos y máximos para todas las partidas como un porcentaje del estimado de costo. Con fines ilustrativos, se mantiene el valor optimista siempre en el 95 % del estimado de costo para todas las actividades.

Se puede observar que a medida que el valor máximo varía en un 5%, 15%, 30% y 50% por sobre el valor más probable, la media se va corriendo hacia la derecha y la curva se va haciendo más ancha, lo que representa una pérdida de precisión en el presupuesto total. Para el 95% de nivel de confianza se tienen los siguientes presupuestos y el porcentaje de sobre costo respecto al valor determinista.

Tabla 13: Totales distribución uniforme con 95% nivel de confianza

|       | Variación 5%      | Variación 15%     | Variación 30%     | Variación 50%     |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Valor | \$366.015.199.069 | \$389.864.632.265 | \$425.933.305.215 | \$479.416.188.389 |
| %     | 1,6               | 8,3               | 18,3              | 33,1              |

Fuente: Propia

### 5.1.3.3 Distribución Triangular

De la misma manera que el punto anterior, la Figura 28 muestra una comparación para distintos niveles de variabilidad en las actividades que conforman el estimado de costo.

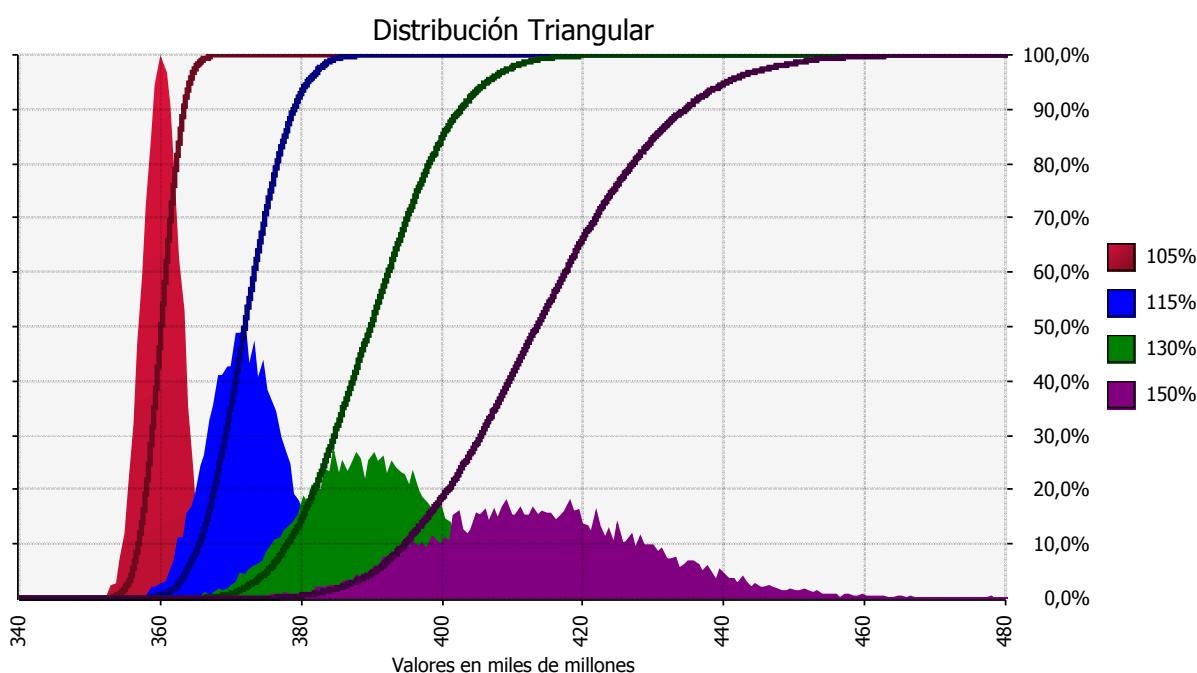


Figura 28: Variabilidad distribución Triangular  
Fuente: Propia

La distribución Triangular en este caso representa el método de estimar costo cuando se tiene un poco más de información sobre la variación de los precios, ya que agrega un tercer punto de estimación; el valor más probable. De esta forma se dan valores mínimos y máximos para todas las partidas como un porcentaje del estimado de costo (valor más probable), manteniendo el valor optimista o límite inferior siempre en el 95 % del estimado de costo para todas las actividades. De la misma forma que la distribución uniforme se puede observar que a medida que el valor máximo varía en un 5%, 15%, 30% y 50%, la media se va corriendo hacia la derecha y la curva de densidad de probabilidad se va haciendo más ancha perdiendo precisión. A continuación se presenta un resumen del presupuesto para cada nivel de variación con un 95% de nivel de confianza.

Tabla 14: Totales distribución uniforme con 95% nivel de confianza

|              | Variación 5%      | Variación 15%     | Variación 30%     | Variación 50%     |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| <b>Valor</b> | \$364.245.082.987 | \$381.063.597.309 | \$406.225.309.278 | \$441.122.243.586 |
| <b>%</b>     | 1,1               | 5,8               | 12,8              | 22,5              |

Fuente: Propia

Lo que quieren representar estas variaciones, son la incapacidad de poder estimar realmente los valores en un presupuesto, es por esto que esta memoria aborda la probabilidad y estadística en la simulación de un proceso. Esta metodología aporta mayor gama de información en base a cuánto quiera arriesgarse el planificador para tomar decisiones tales como: escoger el monto de dinero para presentarse a una propuesta pública. Si bien estos resultados están hechos a partir de información poco detallada, es un punto de partida para poder realizar análisis más detallados de los procesos constructivos que los proyectos de ingeniería civil requieren. Se recalca que la información es importante, y por eso debe ser siempre almacenada y ordenada según los protocolos de cada empresa u organismo público.

### 5.1.4 Estimación del presupuesto de contingencia

La contingencia puede ser definida como el monto de dinero que se dispone para cubrir los sobrecostos que el proyecto podría tener por riesgos identificados en la gestión de riesgos. Este concepto se debe manejar con cuidado debido a que tiene distinto tipo de consecuencias dependiendo de quien lo haga. Como se comentó en el punto 2.4.1, la contingencia o reserva del presupuesto está excluida del estimado de costo, pero se debe agregar al presupuesto tal como lo esquematiza la Figura 29.



Figura 29: Concepto de presupuesto  
Fuente: Propia

De este modo es posible obtener la contingencia como la resta entre el presupuesto y el estimado de costos de un proyecto. Como se asume que el estimado de costos es el presupuesto oficial del puente del Chacao, se tienen los siguientes resultados para las diferentes distribuciones de probabilidad.

#### 5.1.4.1 Distribución Log-Normal

A continuación se presenta una comparación de las contingencias para un mismo tipo distribución Log-Normal pero con distintos niveles de variabilidad del costo de las actividades que conforman el estimado de costo.

Para cada nivel de confianza mostrado en el eje de las ordenadas se puede obtener un valor de dinero que se usa como contingencia para cubrir ciertos eventos de riesgo que el proyecto pueda tener, representado en el eje de las abscisas y a continuación también un porcentaje con respecto al presupuesto oficial ofertado por el consorcio. En este sentido los valores negativos de los gráficos representan la simetría de la distribución Log-Normal y por lo tanto no tienen sentido práctico. Sin embargo podrían producirse valores negativos de contingencia en donde los riesgos positivos ocurren.

Se puede observar que entre mayor variabilidad de costo tengan las actividades, mayor será el presupuesto y por lo tanto también el porcentaje que se debe tener para cubrir las contingencias del proyecto.

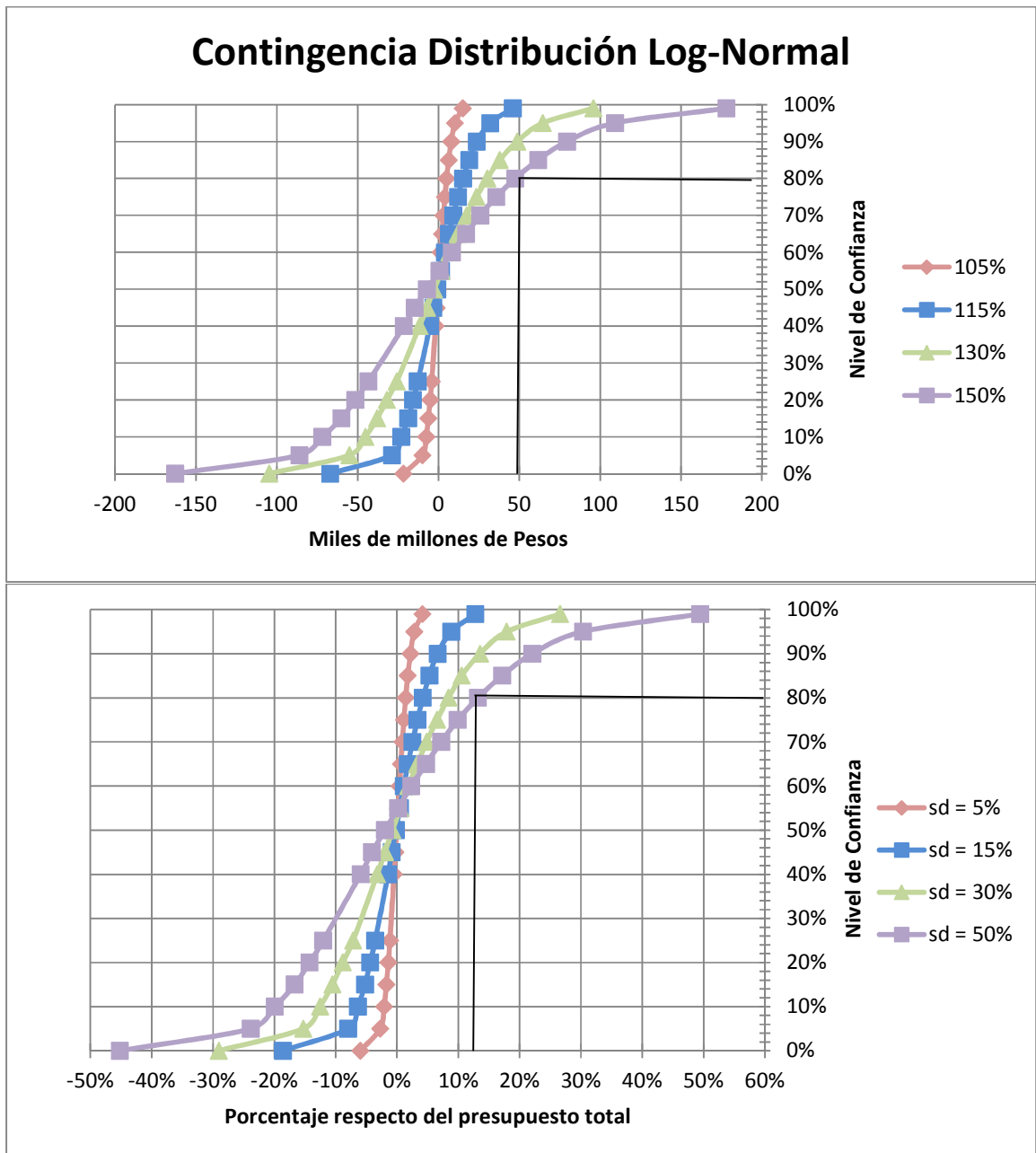


Figura 30, Comparación contingencia distribución Log-Normal  
 Fuente: Propia

La manera de leer el gráfico consiste en fijar en qué nivel de confianza se quiera tener para tener el monto de contingencia asociado a ese nivel y luego tirar una línea recta perpendicular a las abscisas para conocer el monto (parte superior Figura 30) y el porcentaje respecto al presupuesto total (Parte inferior Figura 30). En el ejemplo de la figura anterior se tiene que para un 80% de nivel de confianza se tiene un monto de contingencia equivalente a \$50.000.000.000 equivalente a un 12% aproximadamente variando el límite superior del costo de las actividades en un 50% respecto al valor más probable que aparece en el estimado de costo (presupuesto ofertado por el consorcio)

### 5.1.4.2 Distribución Uniforme

A continuación se presenta una comparación para un mismo tipo distribución Uniforme pero con distintos niveles de variabilidad de las actividades que conforman el estimado de costo.

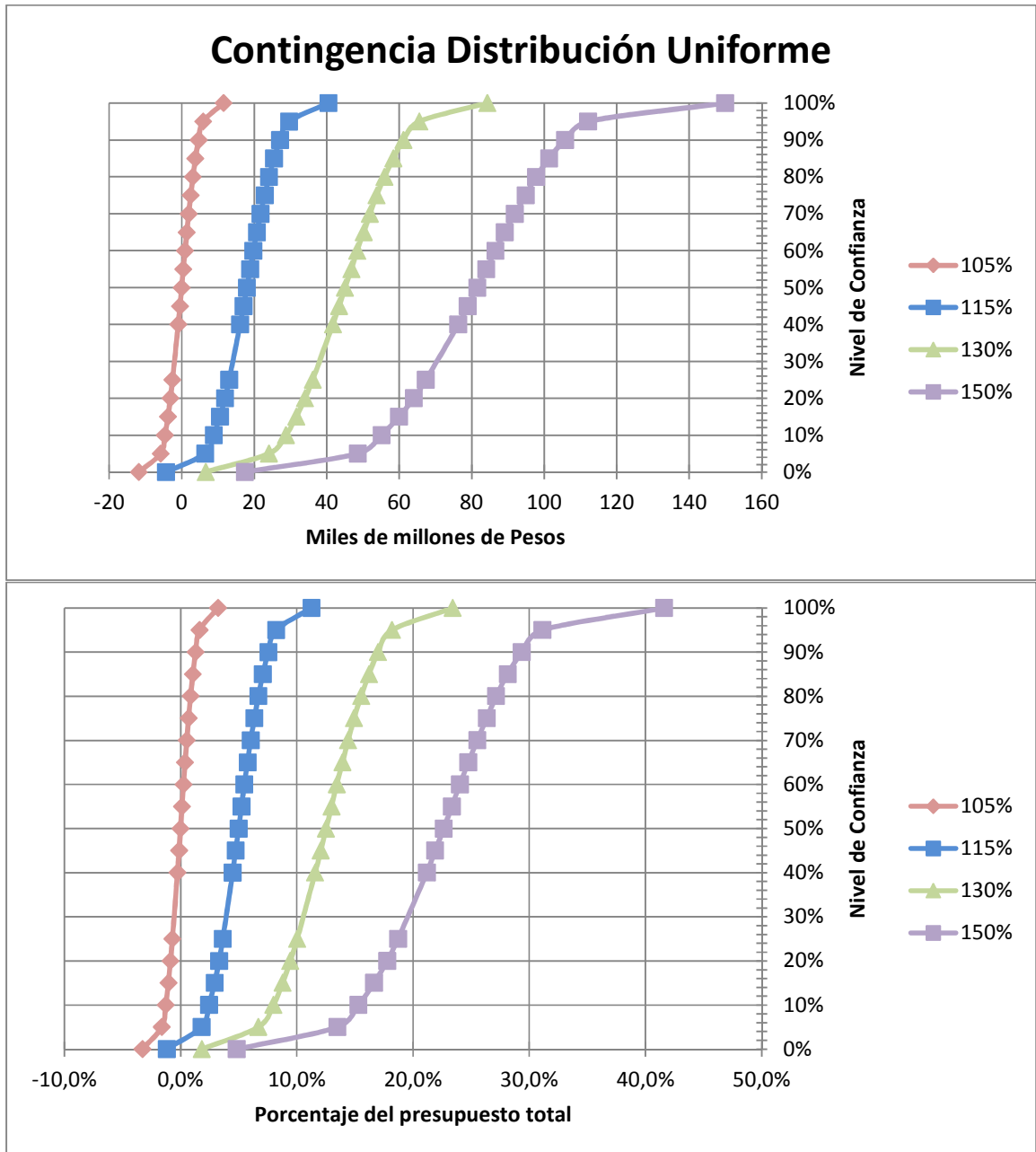


Figura 31: Comparación contingencia distribución Uniforme  
Fuente: Propia

### 5.1.4.3 Distribución Triangular

A continuación se presenta una comparación para un mismo tipo distribución Triangular pero con distintos niveles de variabilidad de las actividades que conforman el estimado de costo.

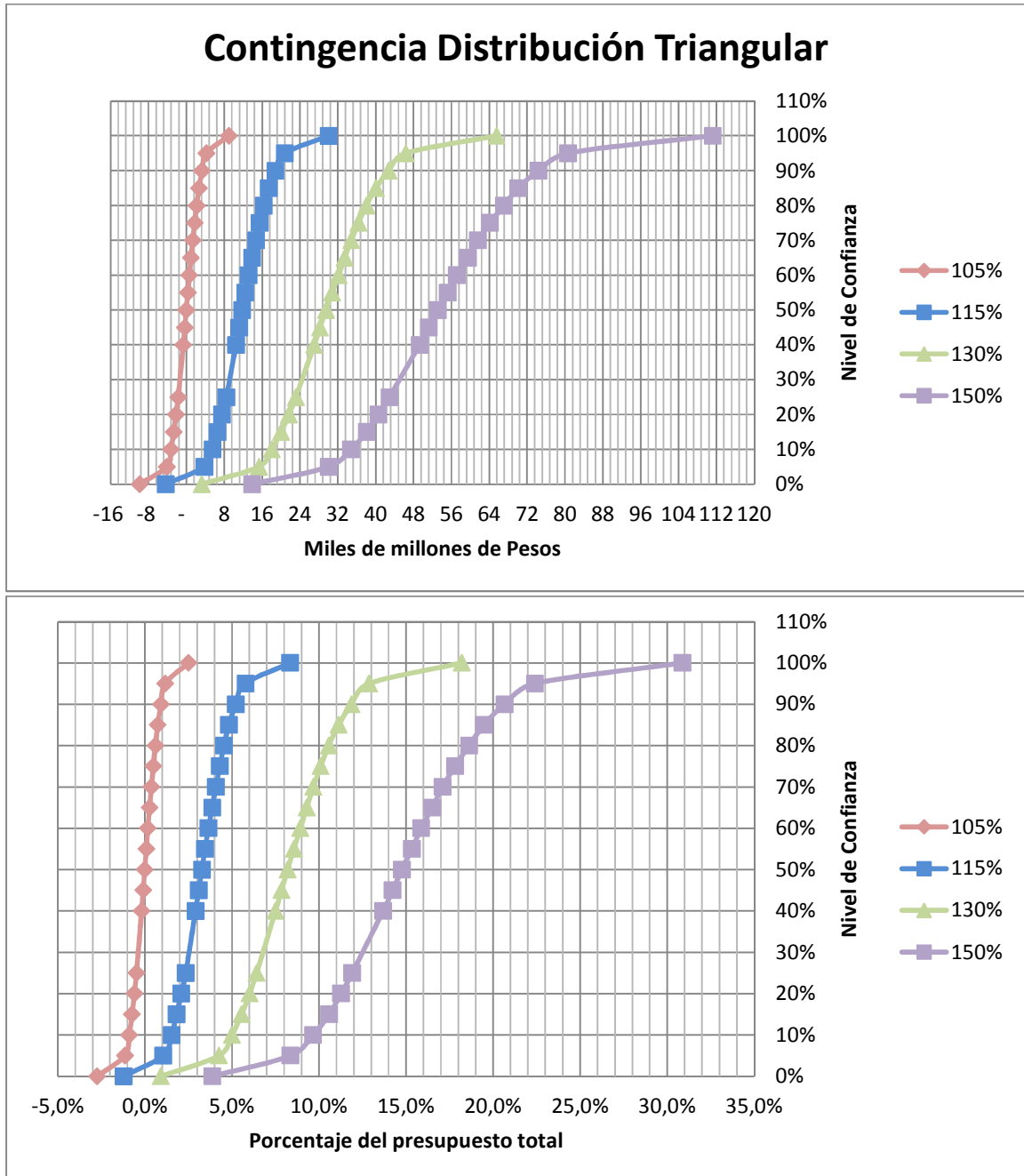


Figura 32: Comparación contingencia distribución Triangular  
Fuente: Propia

De esta manera es posible visualizar gráficamente como varía la contingencia para distintos niveles de confianza utilizando un estimado de costos como variable de entrada. Se han utilizado distintos tipos de distribución de probabilidad debido a la poca información generalmente se tienen en este tipo de proyectos; son largos y complejos. Nueve de cada diez proyectos de infraestructura de transporte tienen sobrecostos y para los proyectos de enlace fijo como túneles y puentes, los costos reales son en promedio 34% más altos que los costos estimados (FLYVBJERG et al., 2002). Tal porcentaje es equivalente a haber variado los costos del proyecto completo en **un 50% sobre el costo determinista con un 95% de nivel de confianza, utilizando una distribución uniforme.**

### 5.1.5 Estimación del presupuesto de contingencia: Análisis detallado

Cuando el proceso de identificación de riesgos es acabado, y se tiene información ya sea por la experiencia de los trabajos realizados o por el juicio de expertos en el tema, se puede hacer una metodología más precisa. La metodología que se presenta a continuación también parte de la base que se tiene un estimado de costos del proyecto completo el cual va ser afectado por riesgos en la construcción. Para este ejemplo se utilizará el mismo proyecto del puente del Chacao, con las mismas consideraciones explicadas anteriormente. En el cálculo de contingencia anterior se mostró el procedimiento para estimar sobre costo a partir del nivel de confianza para un presupuesto según variaciones en todas las partidas de un estimado de costo. Sin embargo se asumió que las partidas variaban de la misma forma. En este punto se revisará como afectan eventos de riesgos puntuales en la contingencia del proyecto teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos y su impacto para el desarrollo de la contingencia.

Para eso, se consideran aquellos riesgos que son considerados más importantes al momento de la construcción y que afectan de manera significativa al tiempo y al costo, durante el ciclo de vida del proyecto. Esta base de datos se construye recolectando eventos de riesgos que más se repiten según papers de (Chan, 1997), (Frimpong et al., 2003), (McCabe, 2003) y (Marchant, 2012) correspondientes a bibliografía nacional e internacional leída y luego trabajados con un análisis cualitativo de riesgo y ordenada de lo más a lo menos importante de acuerdo a la matriz de probabilidad x impacto. Es sabido que todos los proyectos son distintos, sin embargo para esta memoria se considerara un grupo de riesgo que están presentes en la mayoría de los proyectos de construcción. Luego se deben clasificar aquellos que tengan una importancia mayor en el proyecto y marcar a qué actividad(es) afecta(n). De esta manera se toman los eventos de riesgos identificados en el análisis cualitativo de riesgo los cuales se muestran en la tabla siguiente para ejemplificar su uso.

Tabla 15: Probabilidad de ocurrencia riesgos seleccionados

| N | Riesgo  | Probabilidad | Impacto |
|---|---|--------------|---------|
| 1 | Variaciones del proyecto producidas por el cliente                  | 71%          | 28%     |
| 2 | Deficiencias en la planificación y el cronograma                    | 64%          | 27%     |
| 3 | Duraciones de los contratos poco realistas impuestas por el cliente | 61%          | 28%     |
| 4 | Errores y desacuerdos en los documentos de diseño                   | 61%          | 28%     |
| 5 | Deficiencias en las estimaciones de costos entregados               | 62%          | 27%     |
| 6 | Retraso de los subcontratistas                                      | 59%          | 24%     |
| 7 | Inflación   | 41%          | 11%     |

Fuente: Propia

De la misma manera se construye una matriz de interacción, en la cual se identifica las actividades afectadas por cada uno de los eventos de riesgo considerados. La matriz se presenta en la Tabla 17, donde las actividades (1 a 23) corresponden a las actividades especificadas en el presupuesto del puente sobre el canal de Chacao (Tabla 12). La elección de si un evento afecta o no una actividad, fue hecha a criterio del autor de esta memoria.

Tabla 16: Registro de riesgos para cada actividad

| EVENTOS DE RIESGO                                    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14a | 14b | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Error en el diseño definitivo                        | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x  | x  | x  | x  | x   | x   | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  |
| Retrasos en la adquisición y entrega de equipos      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |     | x   |    |    | x  | x  |    |    |    |    |    |
| Inflación  | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x  | x  | x  | x  | x   | x   | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  |
| Huelga, conflictos laborales, paralizaciones de obra |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |     |     |    | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  |
| Condiciones no previstas del terreno                 |   | x | x | x | x | x | x | x | x | x  |    |    |    |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| Deficiencias en las estimaciones de costos           | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x  | x  | x  | x  | x   | x   | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  | x  |
| Vientos y marejadas                                  |   |   |   | x | x | x | x | x | x | x  | x  | x  | x  | x   | x   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

Fuente: Propia

Con los riesgos identificados y visto a qué tipo de partidas afectan se procede a utilizar las funciones del programa @Risk.

RiskDiscrete: Especifica una distribución independiente con un número de resultados igual a N. Cada uno de los resultados tiene un valor X y un coeficiente de probabilidad P, que especifica la probabilidad de que el resultado ocurra. Con esta función es posible saber con qué probabilidad ocurre cada evento de riesgo y se le asigna el valor 1 si aparece y 0 si es que no. Con este procedimiento se puede hacer la pregunta: ¿Se produce el riesgo? Para un 71% de los casos el riesgo “Variaciones del proyecto producidas por el cliente” en la columna 2 de la Tabla 17 Aparecerá la respuesta: Sí

Luego se realiza el mismo procedimiento que en el punto 5.1.2, en este caso solo se utiliza la distribución triangular con el valor más probable igual al valor máximo, para analizar lo que pasa solamente con los sobrecostos y de manera de poder ejemplificar el método.

Tabla 17: Sobrecostos, Iteración 1

| N                       | ¿Se produce? | Más probable      | Máx.              | Sobrecostos      | Sobrecostos añadidos por riesgo Iteración 1 |
|-------------------------|--------------|-------------------|-------------------|------------------|---|
| 1                       | Sí           | \$360.134.000.000 | \$460.971.520.000 | \$2.193.185.270  | \$2.193.185.270                             |
| 2                       | No           | \$37.273.869.000  | \$47.337.813.630  | \$4.662.221.590  | -   |
| 3                       | No           | \$360.134.000.000 | \$460.971.520.000 | \$62.714.014.440 | -   |
| 4                       | Sí           | \$27.910.385.000  | \$35.725.292.800  | \$1.076.264.458  | \$1.076.264.458                             |
| 5                       | No           | \$134.906.196.400 | \$171.330.869.428 | \$11.252.054.705 | -   |
| 6                       | Sí           | \$360.134.000.000 | \$446.566.160.000 | \$16.399.087.126 | \$16.399.087.126                            |
| 7                       | No           | \$294.985.759.400 | \$327.434.192.934 | \$5.979.823.543  | -   |
| Suma Costos por riesgo* |              |                   |                   |                  | \$19.668.536.854                            |
| Percentil 95%           |              |                   |                   |                  | \$155.517.382.851                           |

NOTA: Fuente Propia

En cada iteración se calcula la diferencia entre el costo simulado y el valor más probable, para obtener un valor que se agrega como sobrecostos (columna 5 de la Tabla 17). Finalmente, en la



última columna se muestra el resultado de la multiplicación de la columna 5 con la columna 2 que representa los sobrecostos que se produjeron en esa iteración. De esta forma es posible simular muchas veces para así obtener una distribución de probabilidad de la suma de cada uno de los eventos de riesgos a esta distribución se le llamará presupuesto de contingencia. Para ejemplificar este procedimiento se muestran las dos iteraciones, en la Tabla 17 y Tabla 18 que se muestra a continuación.

Tabla 18: Sobrecostos, Iteración 2

| N                       | ¿Se produce? | Más probable      | Máx.              | Sobrecostos      | Sobrecostos añadidos por riesgo Iteración 2 |
|-------------------------|--------------|-------------------|-------------------|------------------|---|
| 1                       | No           | \$360.134.000.000 | \$460.971.520.000 | \$2.115.812.137  | -   |
| 2                       | No           | \$37.273.869.000  | \$47.337.813.630  | \$3.550.951.867  | -   |
| 3                       | Sí           | \$360.134.000.000 | \$460.971.520.000 | \$35.146.944.310 | \$35.146.944.310                            |
| 4                       | Sí           | \$27.910.385.000  | \$35.725.292.800  | \$120.179.511    | \$120.179.511                               |
| 5                       | Sí           | \$134.906.196.400 | \$171.330.869.428 | \$835.843.226    | \$835.843.226                               |
| 6                       | Sí           | \$360.134.000.000 | \$446.566.160.000 | \$64.574.516.287 | \$64.574.516.287                            |
| 7                       | No           | \$294.985.759.400 | \$327.434.192.934 | \$2.257.558.507  | -   |
| Suma Costos por riesgo* |              |                   |                   |                  | \$100.677.483.335                           |
| Percentil 95%           |              |                   |                   |                  | \$155.517.382.851                           |

Fuente: Propia

Las dos iteraciones son parte de una distribución de probabilidad, por eso el percentil del 95% tiene el mismo valor. Sin embargo la suma de costos por concepto de riesgo, varía en cada iteración ya que depende de la probabilidad con que cada evento de riesgo aparece. El grafico que se presenta a continuación muestra la distribución acumulada de los costos que se tienen por concepto de riesgo para esta modelación de los eventos de riesgos. En este caso los sobrecostos alcanzan el 57%. Este valor es exagerado y depende de cómo se define la matriz asociada a los eventos de riesgo y a las actividades afectadas por ellos y también a la probabilidad e impacto con que estos eventos ocurren.

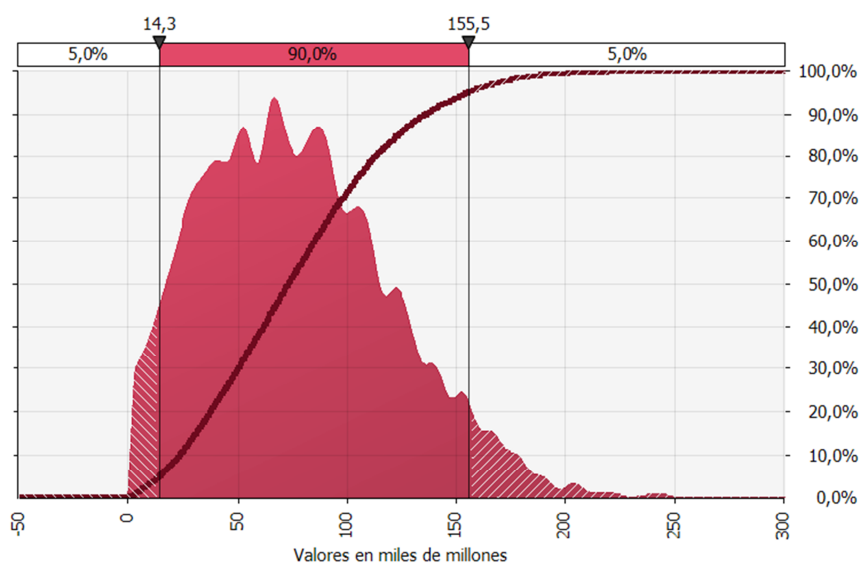


Figura 33: Contingencia  
Fuente Propia

## 6 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN MONTE CARLO: ANÁLISIS DE CRONOGRAMA

En este capítulo se analiza el cronograma de dos proyectos. El primero corresponde a la obra “Diseño y construcción del puente Chacao, región de Los Lagos” adjudicado por el consorcio OAS-Hyundai-Systra-AAS Jakobsen, solicitado por la Ley de Transparencia a la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas del Gobierno de Chile. El segundo proyecto corresponde a un edificio típico en altura, un Centro de Formación Técnica modificado para efectos de esta memoria debido a derecho de privacidad. De la misma forma que en el capítulo anterior, se analiza los efectos que eventos de riesgos pueden inducir en el desarrollo normal de una obra de construcción comparando los resultados del análisis con la duración determinista del proyecto en cada caso.

### 6.1 PUENTE SOBRE EL CANAL DE CHACAO

#### 6.1.1 Consideraciones al Cronograma

Todos los supuestos que se hacen en el cronograma del proyecto llamado “diseño y construcción del puente Chacao, Región de Los Lagos” son sólo con fines académicos para esta memoria. Para realizar la simulación de Monte Carlo al cronograma es necesario contar con la carta Gantt, que para este caso se toma del cronograma de trabajo presentado en la adjudicación del proyecto (ANEXO B) que se obtuvo a través de la Ley de Transparencia 20.285. El cronograma está agrupado en partidas generales, por lo tanto no existe un nivel de detalle que permita obtener resultados cercanos a la realidad ya que no se tiene mucha información de las actividades que se llevarán a cabo.

Para el desarrollo de la carta Gantt presentada en este trabajo (ANEXO B), se utilizó la carta Gantt recibida del MOP (recibida de forma física por correo), que tenía claramente identificadas las duraciones de las actividades, pero fue necesario inferir las relaciones de precedencia que existían entre actividades, pues la carta Gantt recibida no era clara en la ubicación de flechas de precedencia. Es por esto que no se garantiza una perfecta réplica de la carta Gantt original, sin embargo es 100% utilizable para los fines que esta memoria tiene.

El Plazo total ofertado es de 2.379 días corridos.

Los supuestos que se realizan para la aplicación del método de Monte Carlo son los siguientes:

1. **Se toma la duración de las actividades como la duración más probable del proyecto**, esto significa que se asume que no existe un análisis de riesgo en el total y por lo tanto el tiempo de ejecución del proyecto es aquel que se obtendría si es que todo sale como estaba planificado.
2. Se varían todas las actividades de la carta Gantt como **porcentaje del valor más probable**.
3. Para cada simulación **todas** las actividades se varían en el **mismo porcentaje**, con el objetivo de unificar criterios para analizar las distintas distribuciones de probabilidad y porque no se tiene más información para variar una u otra en distintas proporciones.

4. Se utilizan las distribuciones **Beta-Pert, Triangular y Uniforme.**
5. Para todas las distribuciones de probabilidad se varía el límite superior (valor pesimista) del costo de las partidas en un **5%, 15% 30% y 50% del valor más probable.**
6. Para todas las partidas, se considera que el límite inferior (valor optimista) de la estimación de costos es un **90% del valor más probable.**
7. No se considera correlación entre actividades, **actividades independientes.**
8. Calendario adecuado al chileno con horarios de trabajo de 8 horas diarias y meses de 20 días hábiles.

Lo que finalmente se quiere mostrar es un análisis comparativo para distintos niveles de variación en el estimado de costos y para las distintas distribuciones de probabilidad mencionadas anteriormente.

### 6.1.2 Desarrollo metodológico para el Cronograma

Lo primero que se debe hacer, es construir la carta Gantt del proyecto en un archivo de Microsoft Excel (el complemento @Risk permite exportar los archivos de Microsoft Project para ser utilizados como un archivo .xls). En este caso, el cronograma consta de 120 actividades principales tal como lo muestra el ANEXO B. A partir de la carta Gantt es posible definir una distribución de probabilidad para cada actividad, que para el programa corresponde a las variables de entrada. De este modo es posible configurar cada actividad para que se comporte como una distribución de probabilidad triangular utilizando valores mínimos, más probables y máximos (ver Figura 34) o cualquier tipo de distribución de probabilidad deseada. Basado en la bibliografía nacional e internacional, se estudian 3 tipos de distribución; Log-Normal (Graves, 2001), Triangular (Walls, 1998) y Beta (Abourizk, 1992). Esta última distribución se utiliza modificada en base a los parámetros de forma  $\alpha$  y  $\beta$  que tomaron los desarrolladores del método PERT, La función se llama Beta-Pert.

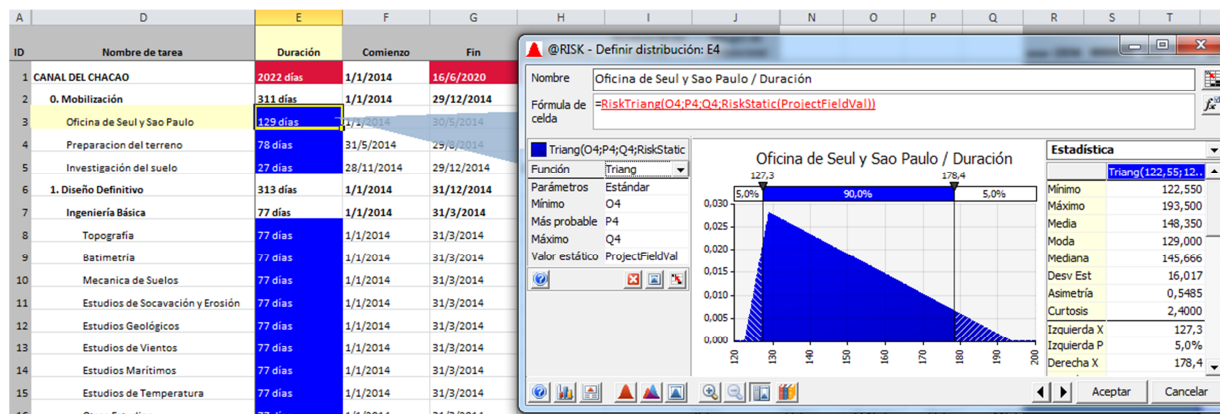


Figura 34: Variables de entrada para el cronograma distribución Triangular  
Fuente: Propia

De esta manera se hace un barrido de los distintos niveles de sobretiempos en 5%, 15%, 30% y 50% para las distintas distribuciones de probabilidad (Beta-Pert, Triangular y Uniforme). Luego se debe añadir la celda objetivo, que en el caso del cronograma se utilizarán dos; la fecha de término del proyecto y la duración del proyecto. Ver Figura 35 y Figura 36.

De la misma forma que en el presupuesto, el supuesto consiste en que los riesgos que se producen en la construcción del proyecto afectan con un 100% de probabilidad todas las actividades que varían cada vez en porcentajes mayores. Esto no es realista, pero es un primer acercamiento a los efectos que pueden producir eventos de riesgo, haciendo variar la duración de las actividades. Finalmente se hace correr la simulación.

| ID | Nombre de tarea             | Duración  | Comienzo   | Fin        | Predecesoras | Nombres de los recursos | Margen de demora total |
|----|-----------------------------|-----------|------------|------------|--------------|-------------------------|------------------------|
| 1  | CANAL DEL CHACAO            | 2022 días | 1/1/2014   | 16/6/2020  |              |                         | 0 días                 |
| 2  | 0. Mobilización             | 311 días  | 1/1/2014   | 29/12/2014 |              |                         | 2 días                 |
| 3  | Oficina de Seul y Sao Paulo | 129 días  | 1/1/2014   | 30/5/2014  |              |                         |                        |
| 4  | Preparación del terreno     | 78 días   | 31/5/2014  | 29/8/2014  |              |                         |                        |
| 5  | Investigación del suelo     | 27 días   | 28/11/2014 | 29/12/2014 |              |                         |                        |
| 6  | 1. Diseño Definitivo        | 313 días  | 1/1/2014   | 31/12/2014 |              |                         |                        |
| 7  | Ingeniería Básica           | 77 días   | 1/1/2014   | 31/3/2014  |              |                         |                        |
| 8  | Topografía                  | 77 días   | 1/1/2014   | 31/3/2014  |              |                         | 0 días                 |

Figura 35: Variable de salida 1, cronograma  
Fuente: Propia

Figura 36: Variable de salida 2, cronograma  
Fuente: Propia

Finalizada la entrada de los datos, se realizan 10.000 iteraciones, los resultados se presentan a continuación

### 6.1.3 Resultados Monte Carlo: Cronograma

#### 6.1.3.1 Distribución Beta-Pert

A continuación se presentan los resultados para el cronograma del proyecto del puente del Chacao utilizando una distribución tipo Beta-Pert para distintos niveles de variación en los límites superiores de la duración de actividades en 105%, 115%, 130% y 150%. La Figura 34 muestra la función de probabilidad acumulada de que el proyecto termine en menos de un número específico de días con cierto nivel de confianza.

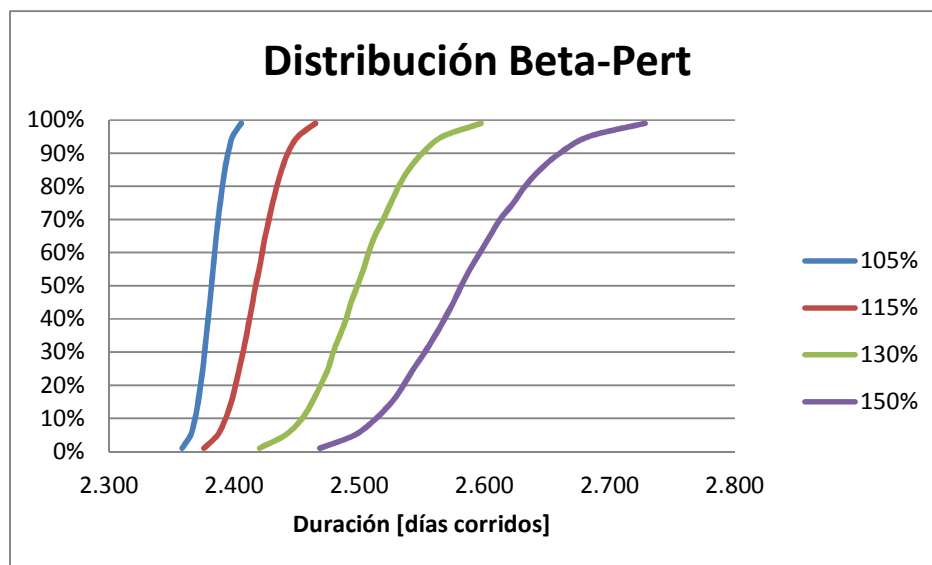


Figura 37: Duración total del proyecto, Distribución Beta-Pert.  
Fuente: Propia

Esta distribución permite “moldear” las actividades de forma menos sesgada que las distribuciones que se presentan después debido a que la distribución beta es suavizada, en cambio la distribución triangular es muy sesgada hacia el valor más probable. Muchos autores revisados en la literatura internacional mencionan que las actividades son representadas de mejor manera por este tipo de distribución. (Kwak, 2007). Se puede observar en el gráfico, que a medida que la variabilidad en la duración de las actividades aumenta la curva se va corriendo hacia la derecha, es decir, que la media se desplaza y además, la curva comienza a disminuir su pendiente. La duración determinista se ubica rodeando el 50% del nivel de confianza en el tramo simétrico que corresponde a aquel tramo que tiene una variabilidad de 5% tanto el límite pesimista como el optimista de la duración de cada actividad.

#### 6.1.3.2 Distribución Triangular

A continuación se presenta los resultados para el cronograma del proyecto del puente del Chacao utilizando una distribución tipo Triangular para distintos niveles de variación en los límites de la duración de actividades. Este tipo de distribución tiene una alta densidad de valores en torno al valor más probable, y por lo tanto es una distribución con menos varianza que, por ejemplo, la distribución uniforme. (McCabe, 2003) propone la distribución triangular para

modelar la duración de actividades debido a su simplicidad y a su parecido con la distribución Beta.

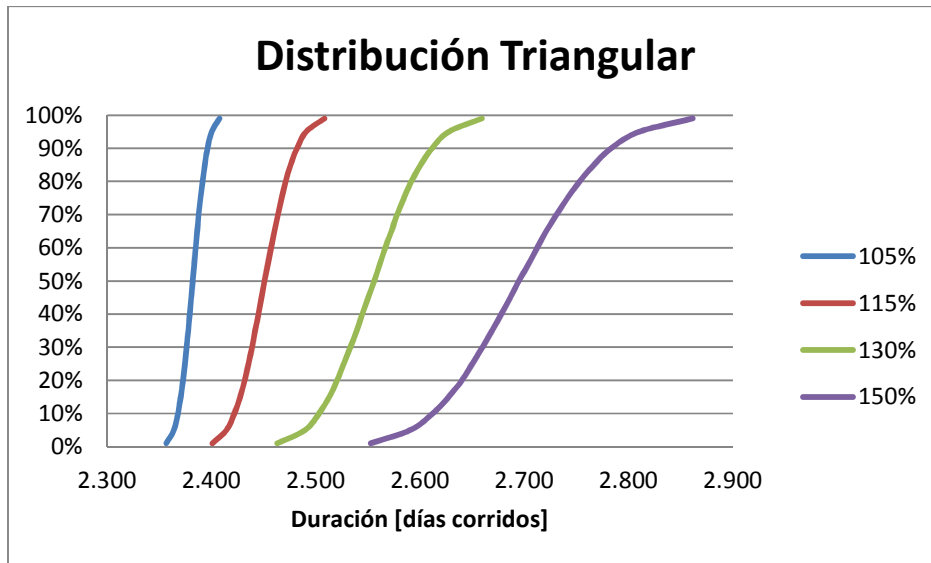


Figura 38: Duración total del proyecto, Distribución Triangular  
Fuente: Propia

Se puede observar una clara pérdida de precisión en los valores a medida que la variabilidad en que las actividades cambian aumenta, es decir, un aumento de la variabilidad en la duración de las actividades no solo aumenta la duración esperada del proyecto, sino que también hace que la duración sea menos previsible.

### 6.1.3.3 Distribución Uniforme

A continuación se presentan los resultados para el cronograma del proyecto del puente del Chacao utilizando una distribución tipo Uniforme para distintos niveles de variación en los límites de la duración de actividades.

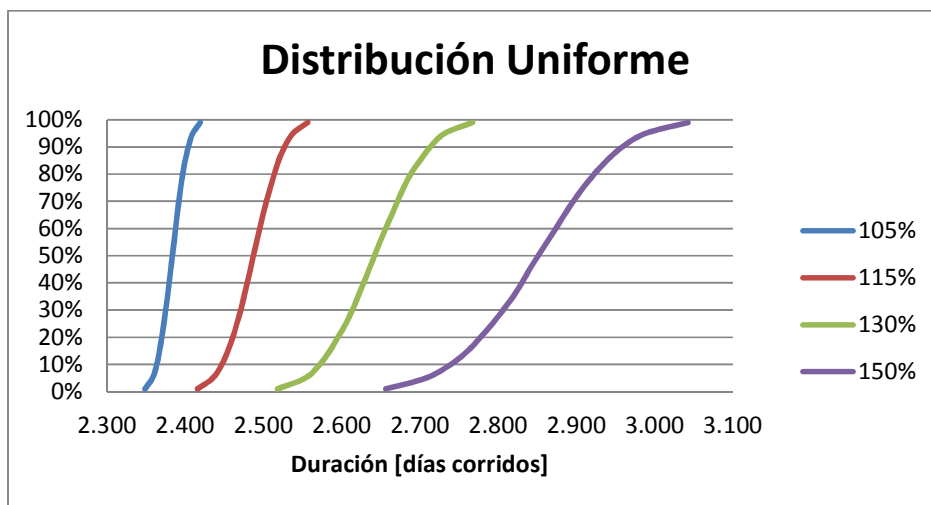


Figura 39: Duración total del proyecto, Distribución uniforme.  
Fuente: Propia

La distribución uniforme muestra una clara pérdida de exactitud en la estimación de la duración total del proyecto debido a que solo estima en base a un valor mínimo y un valor máximo y todas las iteraciones que se usan para generar la distribución acumulada son igualmente probables. Es por eso que la distribución uniforme se utiliza solo cuando no tenemos conocimiento acabado de una distribución de probabilidad para las duraciones de las actividades.

De esta forma, para un nivel de confianza del 95% es posible obtener los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 19, en que se compara las tres distribuciones de probabilidad asumidas.

Tabla 19: Resumen duración y fecha de término para el puente del Chacao, 95% nivel de confianza

|            | Variación (%) | Duración | Fecha de término  |
|------------|---------------|----------|-------------------|
| Beta-Pert  | 105           | 2.398    | <b>28/07/2020</b> |
|            | 115           | 2.450    | 18/09/2020        |
|            | 130           | 2.566    | 11/01/2021        |
|            | 150           | 2.683    | 08/05/2021        |
| Triangular | 105           | 2.400    | 29/07/2020        |
|            | 115           | 2.490    | 28/10/2020        |
|            | 130           | 2.627    | 13/03/2021        |
|            | 150           | 2.810    | 12/09/2021        |
| Uniforme   | 105           | 2.409    | 07/08/2020        |
|            | 115           | 2.537    | 14/12/2020        |
|            | 130           | 2.731    | 25/06/2021        |
|            | 150           | 2.988    | <b>09/03/2022</b> |

Fuente: Propia

La fecha determinista y contractual que tiene el cronograma del puente del Chacao es el 16/06/2020, en este caso con un 95% de confianza en los valores de la duración de las actividades y del proyecto, la fecha que más se le acerca es la que se obtiene con una distribución Beta-Pert y con una variabilidad del 5% en la duración de las actividades y es de cerca de 1 mes y 1 semana. Y la que más se aleja es la de una distribución de probabilidad Uniforme con una variabilidad del 50% en la duración de sus actividades, con la cual la fecha de término anterior al 9 de marzo de 2022 con un 95% de probabilidad.

#### 6.1.3.4 Comparación Distribuciones 105%

A continuación se presentan los resultados para el cronograma del proyecto utilizando una distribución Beta-Pert, Triangular y Uniforme. El gráfico de la Figura 40 muestra las posibles duraciones del proyecto tomando como optimista un 95% de la duración de las actividades y pesimista con un 105% de la duración de las actividades. Como se explicó en los puntos anteriores es posible observar la similitud que poseen las curvas acumuladas de las distribuciones Beta-Pert y Triangular. Como todas las distribuciones son simétricas, el valor más probable coincide con la media, sin embargo esto no pasa en los gráficos subsiguientes que presentan distribuciones asimétricas.

Se puede observar también cómo la curva de distribución acumulada de la distribución uniforme disminuye su pendiente reflejando una clara diferencia con las otras dos.

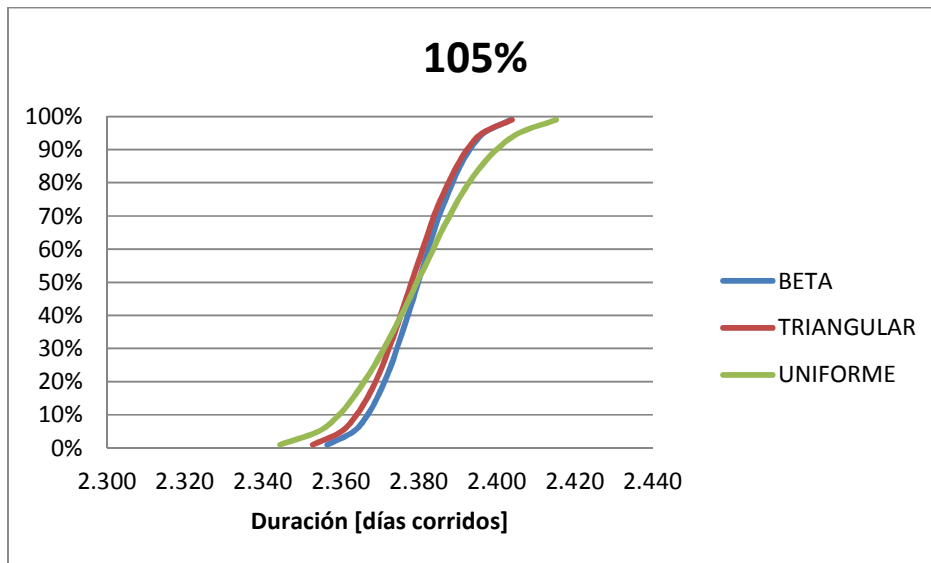


Figura 40: Duración total del proyecto, variabilidad máx. 5%  
Fuente: Propia

### 6.1.3.5 Comparación Distribuciones 115%

La Figura 41 muestra la duración total en días del proyecto para una variabilidad de un 15% en el desarrollo de las actividades.

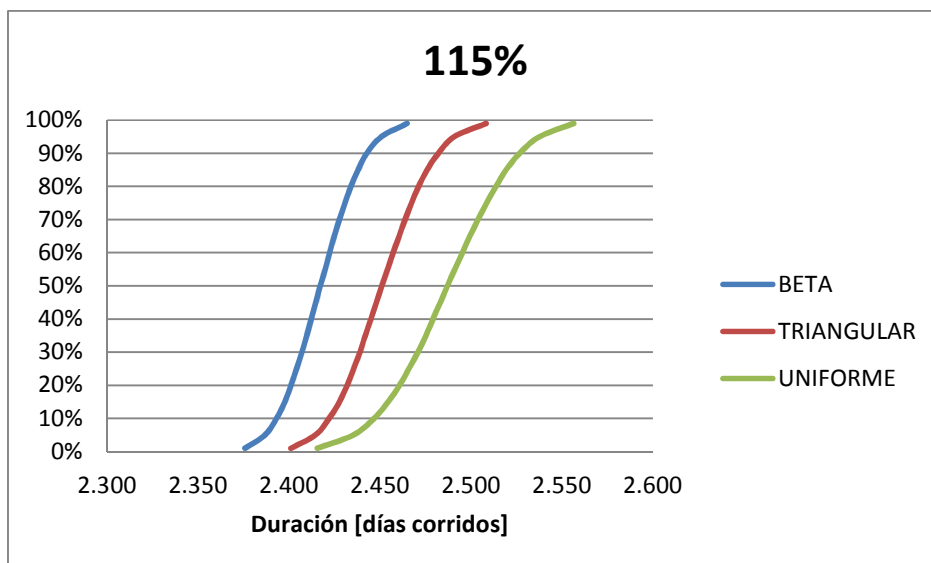


Figura 41: Duración total del proyecto, variabilidad máx. 15%  
Fuente: Propia

Aquí queda claro que con este supuesto, la distribución triangular y uniforme movieron la media hacia la derecha con respecto a la distribución beta (la distribución beta también se movió), algo que no pasaba cuando las distribuciones eran simétricas.



### 6.1.3.6 Comparación Distribuciones 130%

La Figura 42 muestra la duración total en días del proyecto para una variabilidad de un 30% en el desarrollo de las actividades.

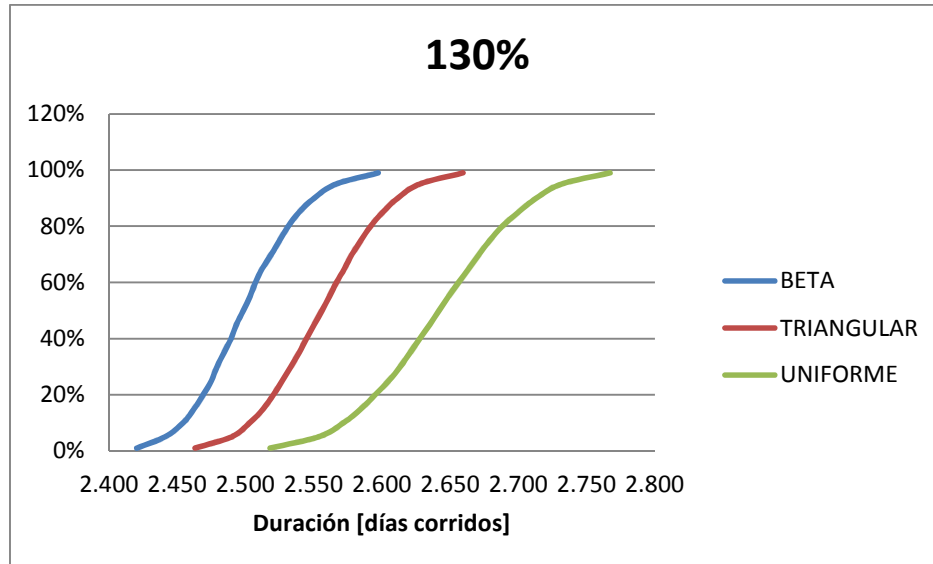


Figura 42: Duración total del proyecto, variabilidad máx. 30%  
Fuente: Propia

### 6.1.3.7 Comparación Distribuciones 150%

La Figura 43 muestra la duración total en días del proyecto para una variabilidad de un 50% en el desarrollo de las actividades.

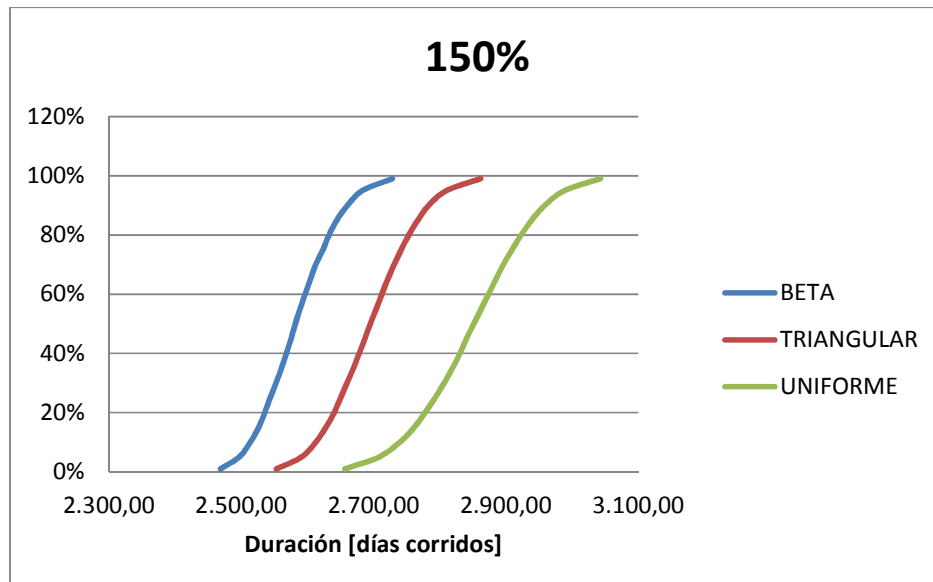


Figura 43: Duración total del proyecto, variabilidad máx. 50%  
Fuente: Propia

#### **6.1.4 Conclusiones para el Cronograma: Puente sobre el canal de Chacao**

Los resultados del análisis del cronograma para el puente sobre el canal de Chacao muestran claras diferencias para cada una de las distribuciones de probabilidad usadas. La distribución que muestra más retraso en la duración total del proyecto es la Uniforme, seguido por la distribución Triangular y luego por la Beta-Pert. La diferencia entre la primera y las dos últimas es la cantidad de información que se necesita para definir el rango de valores de cada una de ellas. La distribución Uniforme necesita menos información y por lo tanto los valores totales son menos precisos. La diferencia entre la distribución Triangular y Beta-Pert, radica en que ésta última es suavizada y representa de mejor manera la duración real de las actividades (Ahuja, 1994). Sin embargo los resultados muestran duraciones totales similares, que se van acentuando a medida que los límites superiores van aumentando.

En el Tabla 19 se puede observar una clara diferencia de lo anteriormente comentado. Para un nivel de variación de las actividades de un 105% en el límite superior, la diferencia de la duración del total del proyecto entre una distribución Triangular y Beta-Pert, es apenas de dos días. En cambio para una variación de las actividades de un 115% la variación de la duración del total del proyecto aumenta a 10 días.

Por otra parte, para una variabilidad simétrica como lo es la del 105%, los valores totales se distribuyen en torno al valor más probable, coincidiendo con la media. Sin embargo para las distribuciones con una mayor variabilidad del límite superior, los resultados muestran que la duración del proyecto se mueve hacia la derecha. Y es así como lo muestran la Figura 41, Figura 42 y Figura 43.

El aporte más notorio que posee Monte Carlo y los métodos de simulación, es que no se tiene un solo valor para la duración del proyecto completo, sino que se cuenta con una gama de valores para representar la duración con distintos niveles de confianza.

Atrasos considerables no son raros para este tipo de proyectos donde la complejidad en su construcción depende de muchos factores difíciles de ser considerados en las etapas previas tales como las fundaciones en lugares extremos, sistemas constructivos innovadores y otros factores que retrasen la construcción del proyecto. Sin embargo, simular eventos que puedan causar el retraso de la obra completa ayuda a comprender de mejor manera los procesos que se llevan a cabo durante el ciclo de vida del proyecto. De esta forma poder actuar más rápida y eficientemente ante la precedencia de un evento de riesgo.

A continuación se presenta la metodología y los resultados para el desarrollo del cronograma de una edificación en altura correspondiente a un Centro de Formación Técnica.

## 6.2 EDIFICIO CONSTRUCCIÓN EN ALTURA: CENTRO DE FORMACIÓN TÉCNICA

### 6.2.1 Consideraciones al Cronograma

Para realizar la simulación de Monte Carlo al cronograma del Centro de Formación Técnica (CFT) es necesario construir la carta Gantt del proyecto. El archivo con que se cuenta está bien trabajado, las partidas están bien ordenadas y todas las actividades están relacionadas con actividades predecesoras y/o sucesoras. La duración determinista para la construcción del centro de formación técnica es de **242 días**. El número de actividades que tiene el proyecto es de 657, por lo que el tiempo de computación de la malla es un poco mayor que en las simulaciones realizadas anteriormente, debido a la complejidad de la carta Gantt.

En este caso se cuenta con mayor información dado que se puede utilizar la encuesta que se realizó a profesionales del área de la planificación de proyectos, ver Capítulo 4. El CFT es un edificio de construcción en altura de 6 pisos, las preguntas realizadas apuntaban a tener información para realizar simulación a este tipo de obras y acercar más a la realidad práctica el uso de simulación en la planificación de proyectos.

De la misma forma que el presupuesto del diseño y construcción del puente Chacao, Región de Los Lagos, los supuestos que se realizan para la aplicación del método de Monte Carlo son los siguientes:

1. **Se toma la duración de las actividades como la duración más probable del proyecto**, esto significa que se asume que no existe un análisis de riesgo en el total y por lo tanto el tiempo de ejecución del proyecto es aquel que se obtendría si es que todo sale como estaba planificado.
2. Se varían todas las actividades de la carta Gantt como **porcentaje del valor más probable, representado como el valor determinista que se extrae de la carta Gantt presentada**.
3. Las actividades se varían en **porcentaje de acuerdo a los resultados de la encuesta**.
4. Se utilizan las distribuciones **Beta-Pert, Triangular y Uniforme**.
5. La única correlación de actividades que existen es la relación de dependencia de actividades en base a las vistas en el punto 2.5.2
6. Calendario adecuado al chileno con horarios de trabajo de 8 horas diarias y meses de 20 días hábiles.

### 6.2.2 Desarrollo metodológico para Cronograma

De la misma manera que el punto anterior lo primero que se debe hacer, es construir la carta Gantt del proyecto en un archivo de Microsoft Excel importando los archivos de Microsoft Project para ser utilizados como un archivo .xls. Las actividades tal como lo muestra la Figura 44 son importadas a Excel y a partir de la misma, es posible definir la distribución de probabilidad para cada actividad, que para el programa corresponde a las variables de entrada. De este modo

es posible configurar cada actividad para que se comporte como una distribución de probabilidad Triangular, BetaPert y Uniforme. Se itera 10.000 veces.


|  | Nombre de tarea   | Duración |
|---|---|----------|
|   | <input type="checkbox"/> Edificio CFT                       | 242 días |
|   | <input type="checkbox"/> Obra Gruesa                        | 129 días |
|   | <input type="checkbox"/> Segundo Subterráneo                | 82 días  |
|   | <input type="checkbox"/> Primer Subterráneo                 | 29 días  |
|   | <input type="checkbox"/> Zócalo                             | 27 días  |
|   | <input type="checkbox"/> Primer Piso                        | 25 días  |
|   | <input type="checkbox"/> Segundo Piso                       | 22 días  |
|   | <input type="checkbox"/> Tercer Piso                        | 24 días  |
|   | <input type="checkbox"/> Cuarto Piso                        | 22 días  |
|   | <input type="checkbox"/> Pilares                            | 4 días   |
|   | <input type="checkbox"/> Muros interiores                   | 5 días   |
|   | <input type="checkbox"/> Losas y Vigas                      | 20 días  |
|   | <input type="checkbox"/> Quinto Piso                        | 22 días  |
|   | <input type="checkbox"/> Pilares                            | 4 días   |
|   | <input type="checkbox"/> Muros interiores                   | 5 días   |
|   | <input type="checkbox"/> Losas y Vigas                      | 20 días  |
|   | <input type="checkbox"/> Sexto Piso                         | 22 días  |
|   | <input type="checkbox"/> Estructura de Cubierta             | 238 días |
|   | <input type="checkbox"/> Terminaciones                      | 103 días |
|   | <input type="checkbox"/> Estructura de Metálica de ascensor | 60 días  |
|   | <input type="checkbox"/> Instalaciones                      | 164 días |
|   | Aseo y limpieza   | 15 días  |
|   | Entrega (No se incluye ascensores)                          | 0 días   |

Figura 44: Duración de actividades carta Gantt CFT  
Fuente: Propia

Se puede observar que gran parte de la duración del proyecto se las llevan las actividades de terminaciones, instalaciones y estructura metálica del ascensor que son a su vez las partidas que tienen mayor variabilidad en los límites que asignaron los profesionales dedicados a la planificación de proyectos que respondieron el cuestionario del capítulo 4. Esto es una indicación de la relevancia de la encuesta realizada para analizar riesgo en este tipo de proyectos. A continuación se presentan los resultados del cronograma para el CFT.

### 6.2.3 Resultados Monte Carlo: Cronograma

A cada una de las actividades que conforman el proyecto del CFT, le correspondió un valor de la Tabla 10 y la Tabla 11 mostradas en el acápite 4.4.2 para la duración mínima y máxima de cada actividad en relación al valor determinista que se considera como el valor más probable correspondiente al valor ingresado en la carta Gantt del CFT. Se hace correr el programa para distintos tipos de distribución al igual que en el proyecto del diseño y construcción del puente del Chacao, tal como lo muestra el gráfico siguiente.

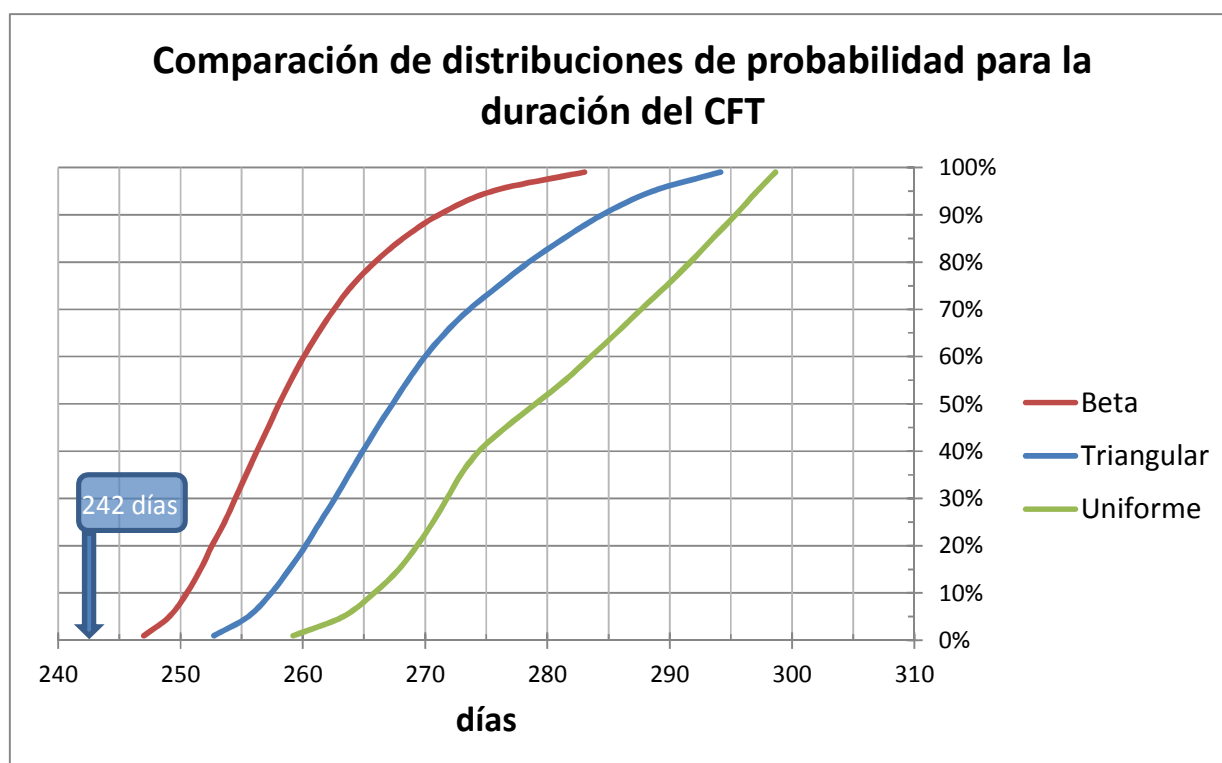


Figura 45: Resultados simulación CFT  
Fuente: Propia

Se puede observar que en todas las distribuciones superan el valor determinista del proyecto, esto se explica porque las variaciones del límite superior son mayores (120% en promedio) que las variaciones del límite inferior (91% en promedio) y porque al tener una relación de dependencia, las actividades deben respetarlas, lo que hace que el proyecto se atrase en una mayor proporción.

Como era de esperar la distribución Beta es la que tiene una menor dispersión de los datos, seguida por la triangular y luego por la distribución uniforme. Para un 95% de nivel de confianza la duración de la construcción del centro de formación técnica es como lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 20: Resultados cronograma CFT para un 95% de nivel de confianza

| Beta-Pert  | Triangular | Uniforme   |
|------------|------------|------------|
| 275,5 días | 288,6 días | 297,1 días |

Fuente: Propia

Los decimales se explican porque la variación en las simulaciones no se hace con números enteros ya que son un porcentaje del valor más probable. Los decimales significan que la duración termina en la fracción del día siguiente entre el horario trabajable que es de 8:00 a 18:00 horas. De la misma manera que en el presupuesto se elabora un gráfico con las contingencias de días para cada tipo de distribución de probabilidad la cual se muestra a continuación. Esto se elabora restando para cada nivel de confianza el valor determinista de la duración del proyecto.

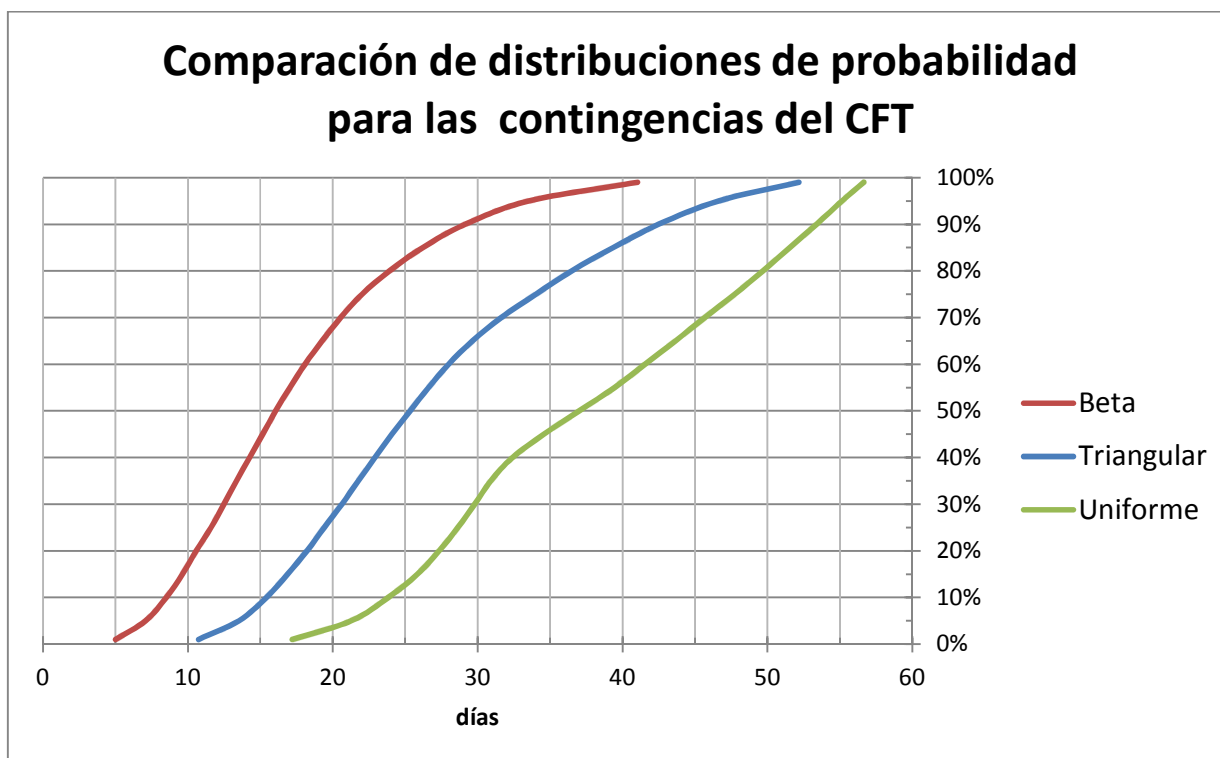


Figura 46: Contingencia simulación CFT  
Fuente: Propia

En el mejor de los casos el proyecto terminará 5 días después del tiempo oficial, y en el peor de los casos terminará casi dos meses después del tiempo oficial, utilizando las percepciones de riesgo de acuerdo a la experiencia de quienes respondieron la encuesta. Para la distribución Beta-Pert se presentan los resultados obtenidos por el programa mostrando los porcentajes de índice críticos para cada actividad, análisis que no se podría obtener en un gráfico Gantt determinista. Los índices críticos representan con qué porcentaje una actividad crítica dentro del proyecto, y puede variar dependiendo de los supuestos que se hagan al cronograma.

Tabla 21: Índices Críticos

| Pilares                                   | 12/9/2011 | 20/9/2011 | Índice Crítico |
|---|-----------|-----------|----------------|
| Fierro Grupo 1 (11 un) ejes I1-M / 4a-7   | 12/9/2011 | 12/9/2011 | 23,66%         |
| Moldaje Grupo 1 (11 un) ejes I1-M / 4a-7  | 13/9/2011 | 13/9/2011 | 23,66%         |
| Hormigón Grupo 1 (11 un) ejes I1-M / 4a-7 | 14/9/2011 | 14/9/2011 | 23,66%         |
| Fierro Grupo 2 (10 un) ejes N-P / 4a-7    | 16/9/2011 | 16/9/2011 | 4,85%          |
| Moldaje Grupo 2 (10 un) ejes N-P / 4a-7   | 17/9/2011 | 17/9/2011 | 4,85%          |
| Hormigón Grupo 2 (10 un) ejes N-P / 4a-7  | 20/9/2011 | 20/9/2011 | 4,85%          |

Fuente: Propia

En tanto para la distribución triangular se tienen los siguientes informes que presenta el mismo programa en la cual se muestra un diagrama de tornado con las partidas que más influyen en la duración del CFT, se pueden observar que son las mismas que se comentaron anteriormente, es decir, aquellas que corresponden a terminaciones e instalaciones.

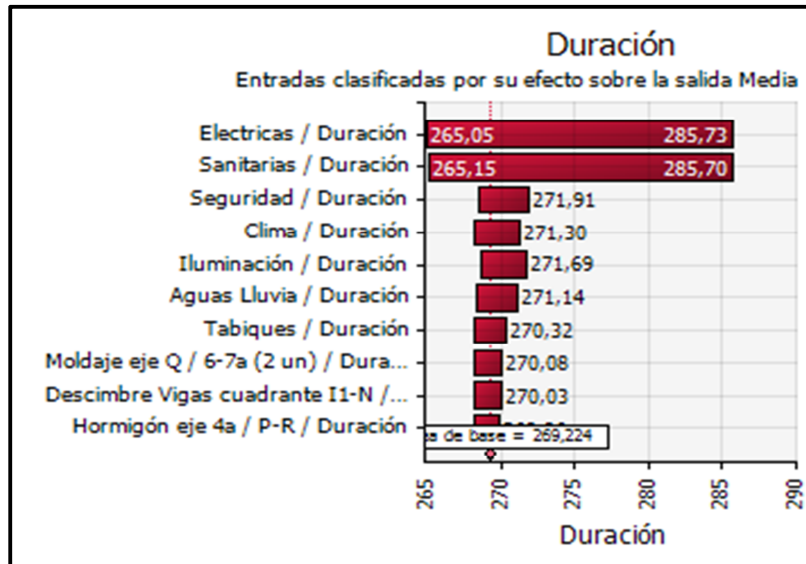


Figura 47: Diagrama Tornado, Informe @Risk  
Fuente: Propia

Por otra parte para la distribución triangular se presenta la distribución acumulada y el histograma de distribuciones para el proyecto completo, se puede observar que el histograma de distribución no toma una forma de curva de una distribución normal, sino que tiene una cola más larga hacia la derecha.

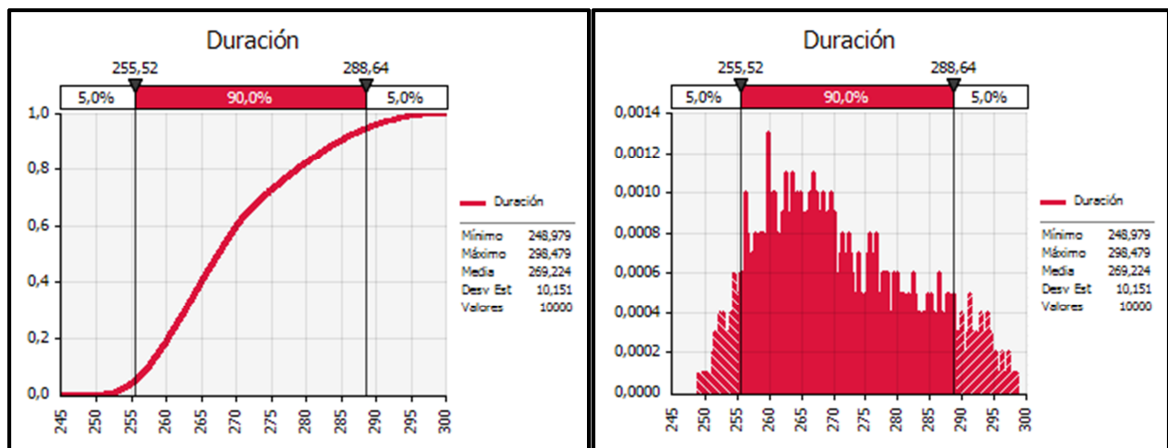


Figura 48: Informes @Risk  
Fuente: Propia

## **7 CONCLUSIONES**

### **7.1 USO DEL MÉTODO**

Las herramientas de simulación son cada vez más utilizadas en las ciencias hoy en día, debido a que permiten representar de mejor manera diferentes escenarios posibles de una realidad incierta, como es el caso de la evolución de un proyecto de ingeniería civil en el tiempo. Esto permite anticipar los efectos de posibles fallas antes que una obra de construcción esté siendo ejecutada y así poder poner en marcha planes de respuesta ante los distintos eventos que se vayan presentando durante el ciclo de vida de un proyecto. Es en este sentido que este trabajo intenta de acercar a los profesionales de la ingeniería civil y de la planificación de proyectos, los elementos de simulación básicos que se pueden usar en la planificación de proyectos, y los incentiva a afrontar de manera cuantitativa los eventos de riesgo que existen en la construcción de proyectos con una metodología sencilla y útil que puede ser utilizada por cualquier entidad pública o privada que trabaje con proyectos sujetos a riesgo

La simulación de Monte Carlo es utilizada como método para calcular escenarios distintos en un proyecto, en este caso se crearon 10.000 posibles escenarios para cada proyecto analizado a lo largo de esta memoria, utilizando distintos supuestos de modelación en cada caso. Es un método estadístico porque usa distribuciones de probabilidad de las variables que se quieren modelar, en este caso el tiempo y el costo para así obtener la duración y el presupuesto de un proyecto completo, tanto en sus valores esperados como en la probabilidad de tener cierto valor deseado. La simulación de Monte Carlo es simple de ocupar y el manejo de datos no requiere un alto conocimiento computacional, sin embargo la búsqueda de información es vital para que los resultados sean coherentes.

### **7.2 RESUMEN Y RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN**

Es por este motivo, que se hace hincapié a que los profesionales sean conscientes de que la falta de información es un problema que debe ser abordado y que se debe crear un registro para cada proyecto, para cada actividad, y para cada evento de riesgo que se puede producir en los proyectos. ¿Será posible obtener esta información sin esperar a que ocurran eventos de riesgo? Para superar la falta de información sobre los niveles de aleatoriedad que caracterizan la duración y el costo de las actividades en proyectos de ingeniería civil, se realiza una encuesta a profesionales del área de la planificación de proyectos, preguntándoles en base a su experiencia en proyectos y en eventos de riesgo que hacen que los proyectos se retrasen o cuesten más. Y aunque la muestra es pequeña comparada con todos los profesionales que se dedican al área de la planificación de proyectos en el país, los resultados son coherentes y representan de alguna manera la realidad de la construcción chilena.

El problema es que en general, es difícil contar con esta información de forma gratuita. La encuesta fue respondida por cuarenta y seis personas, en una primera parte y su análisis entrega elementos valiosos sobre el tipo de actividades que más están sujetas a riesgo, y sobre los límites superior e inferior de las duraciones de actividades que son más frecuentes de encontrar en la práctica. Académicamente hablando, sería interesante abordar en este tema e investigar cómo piensan los planificadores de proyectos, los contratistas, consultores, capataces y obreros en cuanto a la percepción que ellos tienen de la variabilidad de los procesos constructivos. Los



resultados muestran que, en tanto costo como duraciones, se sobredimensiona un 20% aproximadamente siendo los casos más críticos en el inicio y en el término de una obra de construcción en altura: fundaciones, terminaciones, instalaciones, etc. En cuanto a este trabajo, se presenta la metodología a seguir para hacer un acabado análisis cualitativo de riesgos, que además se convierte en una variable de entrada para cuantificar sus efectos haciendo simulaciones. La mayoría de estos riesgos identificados son coherentes con estudios de sobre costos y retrasos en proyectos de construcción tales como los trabajos de (Frimpong, 2003) y (Chan, 1997) los cuales hacen consultas a las empresas, consultores y dueños de proyectos para ver que eventos son la causa del retraso y sobre costo de los proyectos.

El análisis del puente del Chacao es un caso interesante de mencionar, debido al impacto político que éste tiene, el cual fue declarado no rentable socialmente el año 2006, sin embargo el proyecto fue retomado en los años 2012 y 2013, cuando fue anunciado como viable; su construcción fue recientemente adjudicada. Disminuyendo costos de construcción el puente se volvió socialmente rentable, a pesar de que en la literatura se ha mostrado que nueve de cada diez proyectos de infraestructura de transporte tienen sobre costos (Flyvbjerg, 2003) y que los proyectos como túneles y puentes sufren en promedio un 33% de sobre costos en la fase constructiva. En este trabajo se obtuvo que tal 33% de sobre costo es equivalente a al variar el límite superior de todas las actividades un 50% más sobre el valor ofertado por el consorcio que se adjudicó el proyecto, asumiendo una distribución uniforme para los costos. Este análisis no quiere decir que es eso lo que le va a ocurrir al puente del Chacao, pero si las duraciones no incluyeron holguras suficientes para considerar los riesgos, existe una alta probabilidad que así sea. De la misma forma se tienen los plazos de ejecución para la construcción del puente. Es sabido que los proyectos más largos son más riesgosos. Esto sucede porque entre medio pasan una serie de acontecimientos que van cambiando la dinámica de la obra y hacen que las actividades se atrasen. Una fase de seguimiento y control de obras es absolutamente necesaria para mantener el rumbo del proyecto, especialmente de aquellos que son complejos.

Es cierto que para presentar un proyecto, los contratistas tienen que dar un valor único, el cual se representa en la oferta económica de los proyectos, sin embargo antes de poner ese valor sobre la mesa es recomendable utilizar los métodos de simulación para tener una visión más amplia del costo total proyecto y no solo centrarse en un valor determinista, especialmente en proyectos de alto riesgo como el Puente sobre el Canal de Chacao. Sin embargo hacer este tipo de análisis puede perjudicar a la empresa que lo haga, debido a que el sistema que generalmente se utiliza para la adjudicación de contratos públicos es la de suma alzada, los cuales no siempre exigen el análisis de riesgo en los contratos. Una empresa que no realice un análisis de riesgo para su presupuesto puede adjudicarse el contrato (por haber ofertado un monto más bajo) en vez de una que si considere los riesgos e incluya contingencias, pero; ¿Qué pasa si ocurren esos eventos de riesgo y la empresa no los consideró en su presupuesto? ¿Quién paga? La correcta relación mandante-contratista es vital para que estos problemas se resuelvan en buenos términos, pero también lo es exigir en las construcciones planes de riesgos y montos de dinero que cubran esas falencias dentro del mismo contrato.

De la misma forma que es difícil encontrar los valores límites en el cual varía la duración de cada actividad o partida de un presupuesto, tema que los resultados de la encuesta ayuda a resolver, lo es también encontrar la distribución de probabilidad adecuada para cada una de ellas. En la literatura se habla que en las duraciones lo mejor es modelar una actividad con una distribución Beta (Ahuja et al., 1994) debido a que la duración de actividades toma esa forma. En este trabajo

se compara los resultados de asumir distribuciones beta, triangular y uniforme. Para el costo, se comparan las distribuciones; triangular, log-normal y uniforme. Los resultados presentados consideran todo un espectro de posibilidades en términos de presupuesto y plazos para cada proyecto, además muestra la información (también de forma gráfica) para poder tomar la decisión con el nivel de confianza que más represente el nivel de precisión buscado por las personas a cargo del proyecto en el contexto en el cual se esté en ese momento.

### 7.3 EFECTO DE LAS DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

Se presenta una comparación de distintas distribuciones de probabilidad ocupadas, para simular tanto el costo como la duración de las actividades, y también las distintas variaciones en los valores mínimos y máximos de cada una de ellas. Los resultados para el presupuesto del puente del Chacao muestran que para la misma variación en los porcentajes de los límites del costo las distribuciones se ordenan como: Triangular, Uniforme y Log-normal de menor a mayor dispersión en el costo total del proyecto. Era de esperar este orden debido a la cantidad de información y los supuestos restrictivos de cada una de ellas (ver Figura 49), sin embargo elegir una de estas u otra, equivale a miles de millones de pesos de diferencia. Lo mismo ocurre con la duración del proyecto, para este caso se ordenan de la siguiente manera: beta, triangular y uniforme. En la duración del proyecto ocurre el mismo fenómeno que para el presupuesto y se explica por la misma razón.

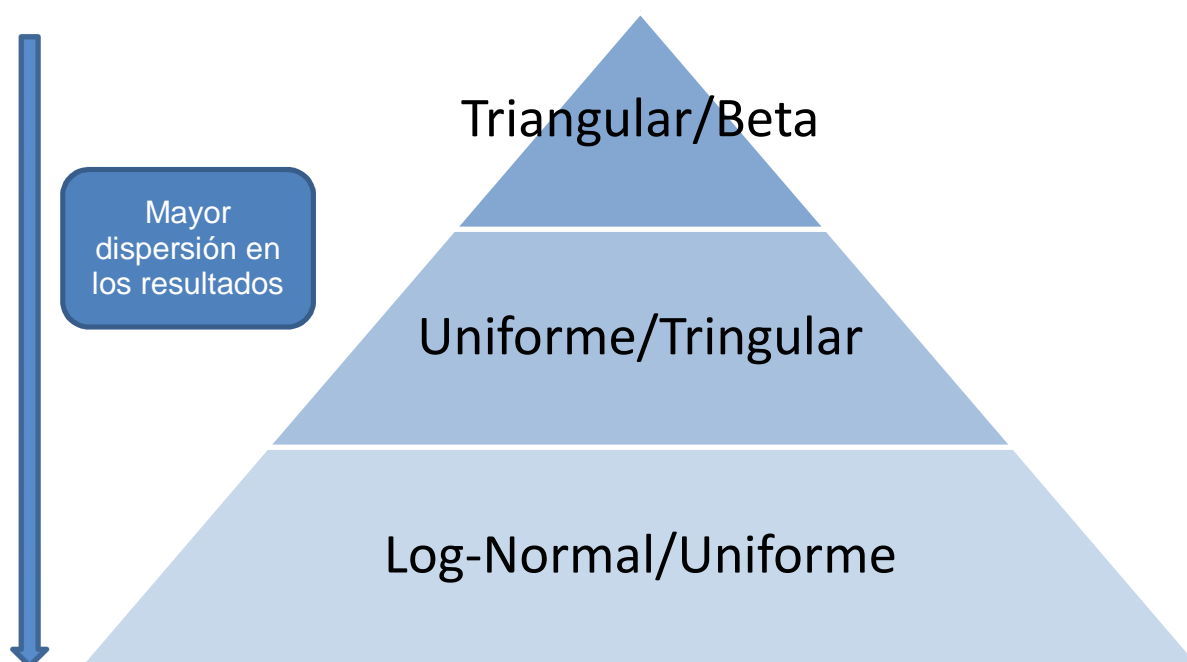


Figura 49: Dispersión de los resultados usando cada distribución de probabilidad (costo/duración)  
Fuente: Propia

En el caso del CFT se consigue información externa por medio de la encuesta realizada a profesionales del área de la planificación de proyectos, lo que le más da exactitud a los datos y por lo tanto los resultados de la simulación numérica deberían ser más acordes a la realidad. El proyecto podría demorarse más de lo planeado, las rutas críticas siguen siendo las mismas pero se suman rutas posiblemente críticas con un porcentaje de criticidad que el programa entrega dada

las variaciones en las actividades y según la distribución de probabilidad que se ocupa. En general, los resultados muestran que que entre mayor información se tenga de la distribución de probabilidad de la duración y costo de las actividades y de los límites en que ellas varían, menor será la variación de costos y duraciones del proyecto completo.

#### 7.4 EVENTO DE RIESGOS PRINCIPALES

Los eventos de riesgos principales, son aquellos que más se repiten en la literatura consultada para la realización de la encuesta, ver Tabla 5. Sin embargo los más importantes son aquellos que tienen una mayor probabilidad y un mayor impacto (ver Tabla 22). Estos eventos de riesgos **deben ser considerados en la simulación** debido a que son los que representan en mayor proporción los sobrecostos y retrasos en un proyecto.

Tabla 22: Resumen eventos de riesgo principales

| Eventos de riesgo principales                                       |
|---|
| Variaciones del proyecto producidas por el cliente                  |
| Deficiencias en las estimaciones de costos entregados               |
| Errores y desacuerdos en los documentos de diseño                   |
| Duraciones de los contratos poco realistas impuestas por el cliente |
| Deficiencias en la planificación y el cronograma                    |
| Retraso de los subcontratistas                                      |
| Retraso en la adquisición y entrega de materiales                   |
| Retraso en la aprobación de planos                                  |

Fuente: Propia

Estos eventos de riesgo están directamente relacionados con la planificación de los proyectos y la información con que se cuenta para realizarlos. Se puede observar que el primer evento de riesgo tiene directa relación con el alcance del proyecto, y más allá de un problema técnico (cosa que puede ocurrir) pareciera ser que se trata más un problema contractual y de comunicación entre ambas partes (Mandante –Contratista). Otros eventos de riesgos que fueron realizados como comentarios por los encuestados fueron los siguientes: el trato con las comunidades y la dificultad de llegar a acuerdos para la realización de un proyecto, los accidentes laborales, las disposiciones de la autoridad, el cambio de personal clave para la ejecución de los proyectos y las condiciones contractuales.

#### 7.5 RECOMENDACIONES Y BUENAS PRÁCTICAS

Elaborar un sistema ordenado de planificación es clave para un buen seguimiento y buen control posterior de las obras, y si bien en esta memoria no se toma en consideración estas dos etapas posteriores son importantes para una buena finalización del proyecto. La planificación de proyectos no sólo se debe hacer al comienzo de una obra de construcción sino que durante todo el ciclo de vida de éste, de esta forma se pueden tomar acciones correctivas para volver al plan original si el proyecto toma un rumbo que no es el deseado, o cambiar la planificación si ésta prueba no ser realista en la práctica. Para que un proyecto pueda ser seguido de acorde al plan es necesario que las personas que trabajen para conseguir esos objetivos sean capaces de moldearse a las situaciones que el proyecto requiera, por eso contar con personal capacitado para el cargo en la dirección del proyecto es de suma importancia. Así como el personal es importante, también es la comunicación dentro de la empresa, de esta manera los proyectos se realizarán de forma

conjunta involucrando a todas las especialidades para concebir un proyecto de forma integral, en donde los problemas se vayan previendo y no encontrándose con ellos en el camino. Para esto es esencial empezar a contar con herramientas que permitan este tipo de diseño de forma integral tales como las herramientas Building Information Modelling (BIM).

En general no es necesario considerar todos los elementos que constituyen riesgo en un proyecto, sino que solo aquellos que sean más importantes y que tengan un efecto más notorio en los objetivos del proyecto, pues son los que tienen más masa dentro de una partida presupuestaria o en la duración del proyecto completo. Pero una vez que se identifiquen es necesario analizarlos con sumo cuidado porque es en estos elementos donde el proyecto va a tener fallas que hagan cumplir o no los objetivos a tiempo. En este contexto, la encuesta ejecutada revela que las actividades de fundaciones, terminaciones, instalaciones y la estructura de los ascensores son las que más incertidumbre tiene asociadas a la estimación de su duración en proyectos de edificios en Chile. Recabar la mayor cantidad de información de proyectos similares para la elaboración de nuevos proyectos es una buena forma de adquirir variables de entrada para la modelación de presupuestos y cronogramas de un proyecto. Ordenar esa información es una labor importante que pasa desapercibida debido a que no se piensa que se puede ocupar en el futuro y cuando se necesita, no se encuentra. Tener una base de datos de fácil acceso es fundamental para la precisión de resultados en proyectos futuros.

Para los proyectos grandes (Mayores a US \$500 Millones) se debe tener especial cuidado en la planificación del cronograma, debido a que a medida que los proyectos son más largos, son más costos por todo lo que involucra (tipo de cambio, economía del país, economía internacional, problemas políticos, etc.) Los métodos de simulación deberían hacerse durante todo el ciclo de vida del proyecto y no solo al inicio de éste, de esta manera ayuda al proceso de control de una obra y se pueden tomar acciones correctivas con mayor conocimiento. Para los proyectos medianos y pequeños (Menores a US \$500 Millones) se debe tener especial cuidado en qué variables simular, debido a que no todas representan un gran impacto al proyecto total y simular todas las variables es una tarea que toma tiempo. Para hacer una buena simulación a estos proyectos es clave contar con la información necesaria para poder generar las distribuciones de las actividades. Es por esto que se recomienda hacer entrevistas a los propios trabajadores, y aunque sea una tarea que tome tiempo y sea costosa ayudará de gran manera a todos los proyectos venideros. Es cierto que adquirir este tipo de Software comercial es de alto costo para una empresa que no está acostumbrada a hacer estos gastos, pero dependiendo del tipo de proyecto podría ser necesario adquirirlo o emularlo con herramientas más simples como las de Microsoft Excel.

De la misma manera que es importante considerar eventos de riesgo en la fase misma de la construcción de obras, también lo es para las fases previas, es muy común que las etapas de diseño de proyectos públicos no se ejecuten por falta de financiamiento incluso si habían sido aprobados anteriormente o problemas que las consultoras tienen para realizar sus diseños retrasen las etapas de construcción de las mismas. Por lo que si bien esta memoria muestra ejemplos de la aplicación del método de Monte Carlo para la planificación de proyectos de construcción, esta metodología es aplicable también para las etapas previas de diseño. Si bien este método es conocido en varias disciplinas de las ciencias la mayoría de los profesionales del área de la construcción no lo conoce ya que no es masivo en el rubro, y por lo tanto, el aporte que puede hacer mostrar la metodología con ejemplos simples ayuda a incentivar a utilizarlo en el futuro. Este es el objetivo principal de esta memoria de título.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- AACE INTERNATIONAL. (2011). Recommended Practice No. 57R-09: Integrated Cost and Schedule Risk Analysis Using Monte-Carlo Simulation of a CPM Model, Morgantown, WV.
- ABOURIZK, S. M., & HALPIN, D. W. (1992). Statistical properties of construction duration data. *Journal of Construction Engineering and Management*, 118(3), 525-544.
- AHUJA, H. N., DOZZI, S. P., & ABOURIZK, S. (1994). *Project management : techniques in planning and controlling construction projects* (2nd ed.). New York: John Wiley and Sons.
- BARRETO, H., & HOWLAND, F. M. (2006). *Introductory econometrics : using Monte Carlo simulation with Microsoft Excel*. Cambridge: Cambridge University Press.
- CHAN, D., & KUMARASWAMY, M. (1997). A comparative study of causes of time overruns in Hong Kong construction projects. 15(1), 55–63.
- COOPER, N. G., ECKHARDT, R., & SHERA, N. (1989). *From cardinals to chaos: Reflections on the life and legacy of Stanislaw Ulam*. CUP Archive.
- COSTA, J. D., & CUBELA, J. M. (2014). *Análisis de Riesgos en la Evaluación de Proyectos de Transportes*. Paper presented at the En: XVIII CONGRESO PANAMERICANO de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística (PANAM 2014); 11,12 y 13 de Junio de 2014, Santander, España, Universidad de Cantabria.
- CÓRDOVA, E. I. C. (2008). Análisis y medición de incertidumbre en redes de actividades. *Ingenierías*, 11(39), 6.
- DIEKMANN, J. E., & THRUSH, K. B. (1986). *Project control in design engineering*. Construction Industry Institute.
- FLYVBJERG, B., HOLM, M. S., & BUHL, S. (2002). Underestimating costs in public works projects: Error or lie? *Journal of the American planning association*, 68(3), 279-295.
- FLYVBJERG, B., HOLM, M. S., & BUHL, S. (2004). What causes cost overrun in transport infrastructure projects? *Transport Reviews*, 24(1), 3-18.
- FRIMPONG, Y., OLUWOYE, J., & CRAWFORD, L. (2003). Causes of delay and cost overruns in construction of groundwater projects in a developing countries; Ghana as a case study. *International Journal of Project Management*, 21(5), 321–326.

- GILCHRIST, A., ALLOUCHE, E., & COWAN, D. (2003). Prediction and Mitigation of Construction Noise in an Urban Environment. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(4), p. 659.
- GRAVES, R. (2001). Open and closed: The Monte Carlo model. *PM Network*, 15(12), 49-52.
- GRUBBS, F. E. (1962). Letter to the Editor—Attempts to Validate Certain PERT Statistics or “Picking on PERT” (Vol. 10, pp. 912-915): INFORMS.
- KWAK, Y. H., & INGALL, L. (2007). Exploring Monte Carlo Simulation Applications for Project Management. *Risk Management*, 44-57.
- LAPEYRE, B., PARDOUX, E., SENTIS, R., CRAIG, A., & CRAIG, F. (2003). *Introduction to Monte Carlo methods for transport and diffusion equations*. Oxford ; New York: Oxford University Press.
- LAPIN, L. L. (1983). *Probability and statistics for modern engineering*: Brooks/Cole Engineering Division Monterey, CA.
- LIU, J. S., & CHEN, R. (1998). Sequential Monte Carlo methods for dynamic systems. *Journal of the American statistical association*, 93(443), 1032-1044.
- MALCOLM, D. G., ROSEBOOM, J. H., CLARK, C. E., & FAZAR, W. (1959). Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation. *Operations Research*, 7(5), 646-669.
- MARCHANT SILVA, A. (2012). *Desarrollo de guía de recomendaciones para la gestión del riesgo en proyectos de construcción, utilizando la metodología PMBOK*. (Ingeniero Civil), Universidad de Chile.
- McCABE, B. (2003). *Construction engineering and project management III: monte carlo simulation for schedule risks*. Paper presented at the Proceedings of the 35th conference on Winter simulation: driving innovation, New Orleans, Louisiana.
- MUÑIZ, L. (2009). *CONTROL PRESUPUESTARIO: Planificación, elaboración, implantación y seguimiento del presupuesto*: Profit Editorial.
- PICH, M., LOCH, C. H., & MEYER, A. D. (2002). On uncertainty, ambiguity, and complexity in project management. *Management science*, 48(8), 1008-1023.
- PRITSKER, A. A. B. (1966). GERT: Graphical Evaluation And Review Technique.
- PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. (2013). *A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK guide)* (5th ed.). Newtown Square, Pa.: Project Management Institute.

SERPELL, A., & ALARCÓN, L. F. (2012). *Planificación y control de proyectos*. Santiago: Ediciones Universidad Católica de Chile, Cuarta Edición.

VON NEUMANN, J. (1951). Various techniques used in connection with random digits. *Applied Math Series*, 12(36-38), 1.

WALLS, J., & SMITH, M. R. (1998). *Life-cycle cost analysis in pavement design in search of better investment decisions*. Washington, DC: U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration.

WILLIAMS, T. (2003). The contribution of mathematical modelling to the practice of project management. *IMA Journal of Management Mathematics*, 14(1), 3-30.

## 9 ANEXO A

La encuesta se detalla a continuación:

1. **¿En cuál(es) de los siguientes rubros se desempeña Ud. actualmente? (\*)**
  - Electricidad, Gas, Agua
  - Construcción
  - Consultorías
  - Transportes-Comunicaciones
  - Minería
  - Manufactura
  - Otro (Especifique)
  
2. **¿De qué tamaño es la empresa en que trabaja actualmente? (\*)**
  - Grande (200 trabajadores o más)
  - Mediana (50 a 199 trabajadores)
  - Pequeña-micro (menor a 50 trabajadores)
  
3. **¿Qué cargo posee Ud. actualmente? (\*)**
  
4. **¿Cuántos años de experiencia posee en su cargo? (\*)**
  
5. **¿En qué tipo de proyectos trabaja mayoritariamente? Entendiendo la diferenciación en el tipo de mandante que lo contrata. (\*)**
  - Público
  - Privado
  - Ambos



**6. Según su experiencia ¿Cuál es la probabilidad de ocurrencia de los siguientes eventos de riesgo en los proyectos de ingeniería civil en los que ha trabajado?**

|   | Improbable (<10%)                | 20%                   | 30%                   | 40%                   | 50%                   | 60%                   | 70%                   | 80%                   | 90%                   | Muy Probable >90%     |
|---|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Dificultad de los pagos por parte del mandante                      | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Retraso en la adquisición y entrega de materiales                   | <input checked="" type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Retraso en la adquisición y entrega de equipos                      | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Retraso en la aprobación para empezar a trabajar                    | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Retraso en la aprobación de planos                                  | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Retrasos en la inspección técnica de obras                          | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Retraso de los subcontratistas                                      | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Retrasos en toma de muestras y pruebas                              | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Aumento de precios de los materiales                                | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Inflación   | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Deficiencias en la planificación y el cronograma                    | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Deficiencias en las estimaciones de costos entregados               | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Escasez de personal directivo y de supervisión                      | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Escasez de personal técnico   | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Escasez de mano de obra   | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Lenta toma de decisiones  | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Variaciones del proyecto producidas por el cliente                  | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Duraciones de los contratos poco realistas impuestas por el cliente | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Errores y desacuerdos en los documentos de diseño                   | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Huelgas, conflictos laborales, paralizaciones de obra               | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Posibilidad de insolvencia económica del mandante                   | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Posibilidad de insolvencia económica del contratista                | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Condiciones no previstas del terreno                                | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Mal tiempo  | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |
| Desastres naturales   | <input type="radio"/>            | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> |

**7. Según su experiencia ¿Cuál es el impacto de los siguientes eventos de riesgo en los proyectos de ingeniería civil en los que ha trabajado? Responda según las siguientes características:**

- Menor: Genera incrementos bajos en costos y plazos.
- Moderado: Incremento moderado en costos y plazos, pero los requerimientos aún pueden lograrse.
- Serio: Incremento severo en costos y plazos, los requerimientos secundarios probablemente no se alcancen.
- Crítico: Fallas en el proyecto e incumplimiento de los requerimientos mínimos aceptables

|   | Menor (+-5%)             | Moderado (+-15%)         | Serio (+-30%)            | Crítico (+-50%)          |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dificultad de los pagos por parte del mandante                      | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Retraso en la adquisición y entrega de materiales                   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Retraso en la adquisición y entrega de equipos                      | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Retraso en la aprobación para empezar a trabajar                    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Retraso en la aprobación de planos                                  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Retrasos en la inspección técnica de obras                          | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Retraso de los subcontratistas                                      | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Retrasos en toma de muestras y pruebas                              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Aumento de precios de los materiales                                | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Inflación   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Deficiencias en la planificación y el cronograma                    | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Deficiencias en las estimaciones de costos entregados               | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Escasez de personal directivo y de supervisión                      | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Escasez de personal técnico   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Escasez de mano de obra   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Lenta toma de decisiones  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Variaciones del proyecto producidas por el cliente                  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Duraciones de los contratos poco realistas impuestas por el cliente | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Errores y desacuerdos en los documentos de diseño                   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Huelgas, conflictos laborales, paralizaciones de obra               | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Posibilidad de insolvencia económica del mandante                   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Posibilidad de insolvencia económica del contratista                | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Condiciones no previstas del terreno                                | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Mal tiempo  | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Desastres naturales   | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Las siguientes preguntas buscan conocer rangos de variación usuales en la duración y el costo de un conjunto de actividades comunes en la construcción de edificios. Se le pide estimar los valores mínimos y máximos que la duración y el costo de una actividad pueden tener, como porcentaje del valor usado en la planificación inicial, que corresponde al 100%. A continuación se presenta un ejemplo de cómo proceder.

Ej: Hormigonado (100%).

Valor mínimo: 90

Valor máximo: 115

\*Donde el valor más probable siempre es 100%

Esto significa que el plazo real de completar la tarea de hormigonado está entre el 90% (mejor escenario) y el 115% (peor escenario) del plazo más probable (100%).

**Responda sólo si tiene experiencia trabajando en proyectos de edificios.**

**8. Indique en porcentaje el valor mínimo y máximo para el rango de estimación de la DURACIÓN de cada actividad.**

|                                    | Valor mín (%)        | Valor más probable | Valor máx (%)        |
|------------------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| Excavaciones                       | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Limpieza del terreno               | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Instalación de Faena               | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Fundaciones                        | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Instalación de grúa torre          | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Colocación de moldajes             | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Enfierradura                       | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Hormigonado                        | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Construcción de muros perimetrales | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Construcción de pilares            | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Construcción de muros              | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Construcción de vigas              | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Construcción de losas              | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Cubierta                           | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Terminaciones                      | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Instalaciones                      | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Estructura ascensor                | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |

**9. Indique en porcentaje el valor mínimo y máximo para el rango de estimación de COSTO de cada actividad.**

|                                    | Valor mín (%)        | Valor más probable | Valor máx (%)        |
|------------------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| Excavaciones                       | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Limpieza del terreno               | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Instalación de Faena               | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Fundaciones                        | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Instalación de grúa torre          | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Colocación de moldajes             | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Enfierradura                       | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Hormigonado                        | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Construcción de muros perimetrales | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Construcción de pilares            | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Construcción de muros              | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Construcción de vigas              | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Construcción de losas              | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Cubierta                           | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Terminaciones                      | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Instalaciones                      | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |
| Estructura ascensor                | <input type="text"/> | 100                | <input type="text"/> |

## 10 ANEXO B

| Id | Modo de | Nombre de tarea                                  | Duración  | Comienzo | Fin      | Predecesoras    | Nombres de los recursos | 01/2015 | 01/2015 | 01/2015 | 01/2015 | 01/2015 | 01/2015 | 01/2015 | 01/2015 | 01/2015 |
|----|---------|--|-----------|----------|----------|-----------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1  |         | CANAL DEL CHACAO                                 | 2022 días | 01/01/14 | 16/06/20 |                 |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 2  |         | 0. Mobilización                                  | 311 días  | 01/01/14 | 29/12/14 |                 |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 3  |         | Oficina de Seul y Sao Paulo                      | 129 días  | 01/01/14 | 30/05/14 |                 |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 4  |         | Preparacion del terreno                          | 78 días   | 31/05/14 | 29/08/14 | 3               |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 5  |         | Investigación del suelo                          | 27 días   | 28/11/14 | 29/12/14 | 23              |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 6  |         | 1. Diseño Definitivo                             | 313 días  | 01/01/14 | 31/12/14 |                 |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 7  |         | Ingeniería Básica                                | 77 días   | 01/01/14 | 31/03/14 |                 |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 17 |         | Ingeniería Definitiva                            | 236 días  | 01/04/14 | 31/12/14 |                 |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 18 |         | Puente del Canal del Chacao                      | 236 días  | 01/04/14 | 31/12/14 | 8;9;10;11;12;13 |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 19 |         | Accesos Inmediatos                               | 158 días  | 01/07/14 | 31/12/14 | 8;9;10;11;12;13 |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 20 |         | Área de Servicios                                | 158 días  | 01/07/14 | 31/12/14 | 8;9;10;11;12;13 |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 21 |         | 2. Fundación Estribo Norte y estribo             | 737 días  | 30/08/14 | 05/01/17 |                 |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 22 |         | Ingeniería de Construcción (Estructura Temporal) | 155 días  | 01/01/15 | 30/06/15 | 18;5            |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 23 |         | Puente Temporal Norte                            | 77 días   | 30/08/14 | 27/11/14 | 4               |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 24 |         | Puente de Aproximación Norte                     | 306 días  | 15/01/16 | 05/01/17 |                 |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 25 |         | Pilote   | 100 días  | 15/01/16 | 10/05/16 | 33FC+80 días    |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 26 |         | Preparación del Terreno (PC. Moldaje)            | 52 días   | 11/05/16 | 09/07/16 | 25;34           |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 27 |         | Encepado   | 154 días  | 11/07/16 | 05/01/17 | 26              |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 28 |         | Fundación del Puente de Aproximación Sur         | 52 días   | 14/06/16 | 12/08/16 | 26FC-23 días    |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 29 |         | Fundación del estribo Norte                      | 25 días   | 14/09/16 | 12/10/16 | 30              |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| 30 |         | Fundación del estribo Sur                        | 27 días   | 13/08/16 | 13/09/16 | 28              |                         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |

|   |                      |  |                           |  |                  |  |
|---|----------------------|--|---------------------------|--|------------------|--|
| Proyecto: Gantt Puente del Chaca<br>Fecha: 03/09/14 | Tarea                |  | Tarea inactiva            |  | Sólo el comienzo |  |
|   | División             |  | Hito inactivo             |  | Sólo fin         |  |
|   | Hito                 |  | Resumen inactivo          |  | Fecha límite     |  |
|   | Resumen              |  | Tarea manual              |  | Tareas críticas  |  |
|   | Resumen del proyecto |  | Sólo duración             |  | División crítica |  |
|   | Tareas externas      |  | Informe de resumen manual |  | Progreso         |  |
|   | Hito externo         |  | Resumen manual            |  |                  |  |

| Id | Modo de | Nombre de tarea                              | Duración | Comienzo | Fin      | Predecesoras        | Nombres de los recursos | Gantt Chart Timeline |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
|----|---------|--|----------|----------|----------|---------------------|-------------------------|----------------------|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|--|--|--|
|    |         |  |          |          |          |                     |                         | 01                   | 201 | 01 | 201 | 01 | 201 | 01 | 201 | 01 | 201 | 01 | 201 |  |  |  |
| 31 |         | 3. Fundación Pila Norte y Pila Sur           | 206 días | 01/07/15 | 25/02/16 |                     |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 32 |         | Pila Norte                                   | 206 días | 01/07/15 | 25/02/16 |                     |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 33 |         | Pilote                                       | 90 días  | 01/07/15 | 13/10/15 | 22                  |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 34 |         | Preparación del Terreno (PC. Moldaje)        | 52 días  | 14/08/15 | 13/10/15 | 33FF                |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 35 |         | Encepado                                     | 116 días | 14/10/15 | 25/02/16 | 33                  |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 36 |         | Fundación Pila Sur                           | 78 días  | 09/09/15 | 08/12/15 | 34FC-30 días        |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 37 |         | 4. Fundación Pila Central                    | 540 días | 31/03/15 | 19/12/16 |                     |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 38 |         | Aplanado de Roca Remolinos                   | 78 días  | 31/03/15 | 29/06/15 | 22FF-1 día          |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 39 |         | Plataforma de Trabajo Central                | 49 días  | 01/07/15 | 26/08/15 | 22                  |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 40 |         | Pilote                                       | 288 días | 27/08/15 | 27/07/16 | 39                  |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 41 |         | Preparación del Terreno (PC. Moldaje)        | 104 días | 01/01/16 | 30/04/16 | 36FC+20 días        |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 42 |         | Encepado                                     | 124 días | 28/07/16 | 19/12/16 | 40,41               |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 43 |         | 5. Elevaciones Estribo Norte y Sur           | 324 días | 12/12/17 | 24/12/18 |                     |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 44 |         | Elevaciones del Puente de Aproximación Sur   | 77 días  | 12/12/17 | 10/03/18 | 29FC+17 mss;27FC+14 |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 45 |         | Estribo Sur                                  | 52 días  | 12/03/18 | 10/05/18 | 44                  |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 46 |         | Elevaciones del Puente de Aproximación Norte | 195 días | 12/03/18 | 24/10/18 | 45CC                |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 47 |         | Estribo Norte                                | 52 días  | 25/10/18 | 24/12/18 | 45,46               |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 48 |         | 6. Elevaciones Pila Norte                    | 549 días | 26/02/16 | 27/11/17 |                     |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 49 |         | Construcción de Piernas (ACS)                | 304 días | 26/02/16 | 14/02/17 | 35                  |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 50 |         | Construcción de Travesaño Bajo               | 78 días  | 30/05/17 | 28/08/17 | 82FC+2 mss;60       |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |
| 51 |         | Construcción de Travesaño Superior           | 78 días  | 29/08/17 | 27/11/17 | 50                  |                         |                      |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |  |  |  |

|   |                      |  |                           |  |                  |  |
|---|----------------------|--|---------------------------|--|------------------|--|
| Proyecto: Gantt Puente del Chaca<br>Fecha: 03/09/14 | Tarea                |  | Tarea inactiva            |  | Sólo el comienzo |  |
|   | División             |  | Hito inactivo             |  | Sólo fin         |  |
|   | Hito                 |  | Resumen inactivo          |  | Fecha límite     |  |
|   | Resumen              |  | Tarea manual              |  | Tareas críticas  |  |
|   | Resumen del proyecto |  | Sólo duración             |  | División crítica |  |
|   | Tareas externas      |  | Informe de resumen manual |  | Progreso         |  |
|   | Hito externo         |  | Resumen manual            |  |                  |  |

| Id | Modo de | Nombre de tarea                    | Duración | Comienzo | Fin      | Predecesoras    | Nombres de los recursos | Gantt Chart |     |     |     |     |     |     |
|----|---------|------------------------------------|----------|----------|----------|-----------------|-------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|    |         |                                    |          |          |          |                 |                         | 01          | 201 | 201 | 201 | 201 | 201 | 201 |
| 52 |         | 7. Elevaciones Pila Central        | 543 días | 20/12/16 | 13/09/18 |                 |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 53 |         | Pierna Baja (ACS)                  | 190 días | 20/12/16 | 28/07/17 | 42,58           |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 54 |         | Pierna Superior (ACS)              | 190 días | 29/07/17 | 07/03/18 | 53              |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 55 |         | Construcción de Travesaño Bajo     | 156 días | 29/08/17 | 26/02/18 | 50              |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 56 |         | Construcción de Travesaño Superior | 78 días  | 15/06/18 | 13/09/18 | 55FC+93 días    |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 57 |         | 8. Elevaciones Pila Sur            | 446 días | 09/12/15 | 11/05/17 |                 |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 58 |         | Construcción de Piernas (ACS)      | 226 días | 09/12/15 | 27/08/16 | 36              |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 59 |         | Construcción de Travesaño Bajo     | 78 días  | 11/11/16 | 09/02/17 | 84              |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 60 |         | Construcción de Travesaño Superior | 78 días  | 10/02/17 | 11/05/17 | 59              |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 61 |         | 9. Macizo de Anclaje Norte         | 897 días | 30/01/16 | 11/12/18 |                 |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 62 |         | Excavación                         | 25 días  | 30/01/16 | 27/02/16 | 25CC+13 días    |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 63 |         | Macizo de Anclaje                  | 327 días | 29/02/16 | 15/03/17 | 62              |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 64 |         | 1ro Relleno                        | 25 días  | 16/03/17 | 13/04/17 | 63              |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 65 |         | Hormigonado                        | 25 días  | 15/10/18 | 12/11/18 | 63,85FC+87 día  |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 66 |         | 2do Relleno                        | 25 días  | 13/11/18 | 11/12/18 | 65              |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 67 |         | 10. Macizo de Anclaje Sur          | 812 días | 07/06/16 | 09/01/19 |                 |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 68 |         | Excavación                         | 40 días  | 07/06/16 | 22/07/16 | 62FC+17 sem.    |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 69 |         | Macizo de Anclaje                  | 231 días | 23/07/16 | 18/04/17 | 68              |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 70 |         | 1ro Relleno                        | 40 días  | 19/04/17 | 03/06/17 | 69              |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 71 |         | Hormigonado                        | 25 días  | 13/11/18 | 11/12/18 | 70,85FC+112 día |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 72 |         | 2do Relleno                        | 25 días  | 12/12/18 | 09/01/19 | 71              |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 73 |         | 11. Cable Principal                | 699 días | 20/07/17 | 12/10/19 |                 |                         |             |     |     |     |     |     |     |
| 74 |         | Fabricación y Entrega              | 392 días | 20/07/17 | 19/10/18 | 70FC+39 días    |                         |             |     |     |     |     |     |     |

|   |                      |  |                           |  |                  |  |
|---|----------------------|--|---------------------------|--|------------------|--|
| Proyecto: Gantt Puente del Chaca<br>Fecha: 03/09/14 | Tarea                |  | Tarea inactiva            |  | Sólo el comienzo |  |
|   | División             |  | Hito inactivo             |  | Sólo fin         |  |
|   | Hito                 |  | Resumen inactivo          |  | Fecha límite     |  |
|   | Resumen              |  | Tarea manual              |  | Tareas críticas  |  |
|   | Resumen del proyecto |  | Sólo duración             |  | División crítica |  |
|   | Tareas externas      |  | Informe de resumen manual |  | Progreso         |  |
|   | Hito externo         |  | Resumen manual            |  |                  |  |

| Id | Modo de | Nombre de tarea  | Duración | Comienzo | Fin      | Predecesoras | Nombres de los recursos | Gantt Chart |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
|----|---------|--|----------|----------|----------|--------------|-------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|--|--|
|    |         |  |          |          |          |              |                         | 01          | 201 | 201 | 201 | 201 | 201 | 201 | 201 | 201 | 201 | 201 | 202 |  |  |  |  |
| 75 | →       | Montaje de Cuerda Piloto                                     | 10 días  | 04/05/18 | 15/05/18 | 83           |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 76 | →       | Instalación de Sistema de Tracción                           | 29 días  | 16/05/18 | 18/06/18 | 75           |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 77 | →       | Instalación de Sistema de Pasarela                           | 37 días  | 19/06/18 | 31/07/18 | 76           |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 78 | →       | Montaje de cables de suspensión (PPWS)                       | 80 días  | 01/08/18 | 01/11/18 | 77           |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 79 | →       | Compactación de Cables                                       | 29 días  | 02/11/18 | 05/12/18 | 78           |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 80 | →       | Envoltura, Desmantelar, Cubierta de Silla, Deshumedificación | 162 días | 08/04/19 | 12/10/19 | 51;95CC      |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 81 | →       | 12. Sillas, Péndolas y abrazaderas                           | 801 días | 15/09/16 | 06/04/19 |              |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 82 | →       | Silla de Pila Norte  | 49 días  | 15/02/17 | 12/04/17 | 49           |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 83 | →       | Silla de Pila Central  | 49 días  | 08/03/18 | 03/05/18 | 54           |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 84 | →       | Silla de Pila Sur  | 49 días  | 15/09/16 | 10/11/16 | 58FC+3 sem.  |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 85 | →       | Montura Biselada (AN1, AN2)                                  | 78 días  | 05/04/18 | 04/07/18 | 83FC-5 sem.  |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 86 | →       | Péndolas y abrazaderas                                       | 105 días | 06/12/18 | 06/04/19 | 79           |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 87 | →       | 13. Sistemas de Apoyo<br>Tablero-Amortiguadores              | 234 días | 04/05/18 | 31/01/19 |              |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 88 | →       | Instalación de Apoyos y Amortiguadores en Estribo Norte      | 39 días  | 04/05/18 | 18/06/18 | 85CC+5 sem.  |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 89 | →       | Instalación de Apoyos y Amortiguadores en Estribo Sur        | 39 días  | 19/06/18 | 02/08/18 | 88           |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 90 | →       | Instalación de Apoyos y Amortiguadores en Pila Norte         | 52 días  | 03/08/18 | 02/10/18 | 89           |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |
| 91 | →       | Instalación de Apoyos y Amortiguadores en Pila Sur           | 52 días  | 03/10/18 | 01/12/18 | 90           |                         |             |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |  |  |  |  |

|  |                      |  |                           |  |                  |  |
|--|----------------------|--|---------------------------|--|------------------|--|
| <b>Proyecto: Gantt Puente del Chaca</b><br>Fecha: 03/09/14 | Tarea                |  | Tarea inactiva            |  | Sólo el comienzo |  |
|  | División             |  | Hito inactivo             |  | Sólo fin         |  |
|  | Hito                 |  | Resumen inactivo          |  | Fecha límite     |  |
|  | Resumen              |  | Tarea manual              |  | Tareas críticas  |  |
|  | Resumen del proyecto |  | Sólo duración             |  | División crítica |  |
|  | Tareas externas      |  | Informe de resumen manual |  | Progreso         |  |
|  | Hito externo         |  | Resumen manual            |  |                  |  |



| Id  | Modo de | Nombre de tarea  | Duración  | Comienzo | Fin      | Predecesoras   | Nombres de los recursos | 01 | 201 | 201 | 201 | 201 | 201 | 201 | 202 |    |
|-----|---------|--|-----------|----------|----------|----------------|-------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
|     |         |  |           |          |          |                |                         | 5  | 15  | 25  | 15  | 25  | 15  | 25  | 15  | 25 |
| 92  |         | Instalación de Apoyos y Amortiguadores en Pila Central | 52 días   | 03/12/18 | 31/01/19 | 91             |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 93  |         | 14. Tablero Puente y arriostramiento                   | 686 días  | 01/09/17 | 09/11/19 |                |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 94  |         | Fabricación y Entrega                                  | 546 días  | 01/09/17 | 30/05/19 | 74CC+37 días   |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 95  |         | Instalación de Dispositivos de Elevación (4 sets)      | 20 días   | 08/04/19 | 30/04/19 | 92FC+56 días   |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 96  |         | Montaje del Tablero                                    | 34 días   | 01/05/19 | 08/06/19 | 95             |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 97  |         | Soldadura del Tablero                                  | 60 días   | 10/06/19 | 17/08/19 | 96             |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 98  |         | Desmantelar y Pintura                                  | 60 días   | 19/08/19 | 26/10/19 | 97             |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 99  |         | Tablero del Puente de Aproximación                     | 100 días  | 17/07/19 | 09/11/19 | 100            |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 100 |         | Tablero del Puente de Aproximación Norte               | 175 días  | 25/12/18 | 16/07/19 | 47;66          |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 101 |         | 15. Edificio de Operación                              | 964 días  | 01/07/15 | 28/07/18 |                |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 102 |         | Edificio de Operación                                  | 499 días  | 01/07/15 | 28/07/18 | 20FC+31 sem.   |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 103 |         | 16. Edificio Mirador                                   | 182 días  | 01/02/18 | 31/08/18 |                |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 104 |         | Edificio Mirador                                       | 182 días  | 01/02/18 | 31/08/18 | 102FC-153 días |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 105 |         | 17. Equipamiento Edificio de Operación                 | 78 días   | 01/06/18 | 30/08/18 |                |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 106 |         | Equipamiento Edificio de Operación                     | 78 días   | 01/06/18 | 30/08/18 | 104FC-79 días  |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 107 |         | 18. Equipamiento Área de Servicio                      | 78 días   | 01/06/18 | 30/08/18 |                |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 108 |         | Equipamiento Área de Servicio                          | 78 días   | 01/06/18 | 30/08/18 | 104FC-79 días  |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 109 |         | 19. Obras Viales de accesos Inmediato                  | 1541 días | 02/03/15 | 31/01/20 |                |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 110 |         | Obras Viales de accesos Inmediato                      | 314 días  | 02/03/15 | 31/01/20 | 19FC+51 días   |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 111 |         | 20. Sistemas Eléctricos                                | 104 días  | 05/03/19 | 03/07/19 |                |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |
| 112 |         | Sistemas Eléctricos                                    | 104 días  | 05/03/19 | 03/07/19 | 106FC+159 días |                         |    |     |     |     |     |     |     |     |    |

|  |                      |  |                           |  |                  |  |
|--|----------------------|--|---------------------------|--|------------------|--|
| <b>Proyecto: Gantt Puente del Chaca</b><br>Fecha: 03/09/14 | Tarea                |  | Tarea inactiva            |  | Sólo el comienzo |  |
|  | División             |  | Hito inactivo             |  | Sólo fin         |  |
|  | Hito                 |  | Resumen inactivo          |  | Fecha límite     |  |
|  | Resumen              |  | Tarea manual              |  | Tareas críticas  |  |
|  | Resumen del proyecto |  | Sólo duración             |  | División crítica |  |
|  | Tareas externas      |  | Informe de resumen manual |  | Progreso         |  |
|  | Hito externo         |  | Resumen manual            |  |                  |  |

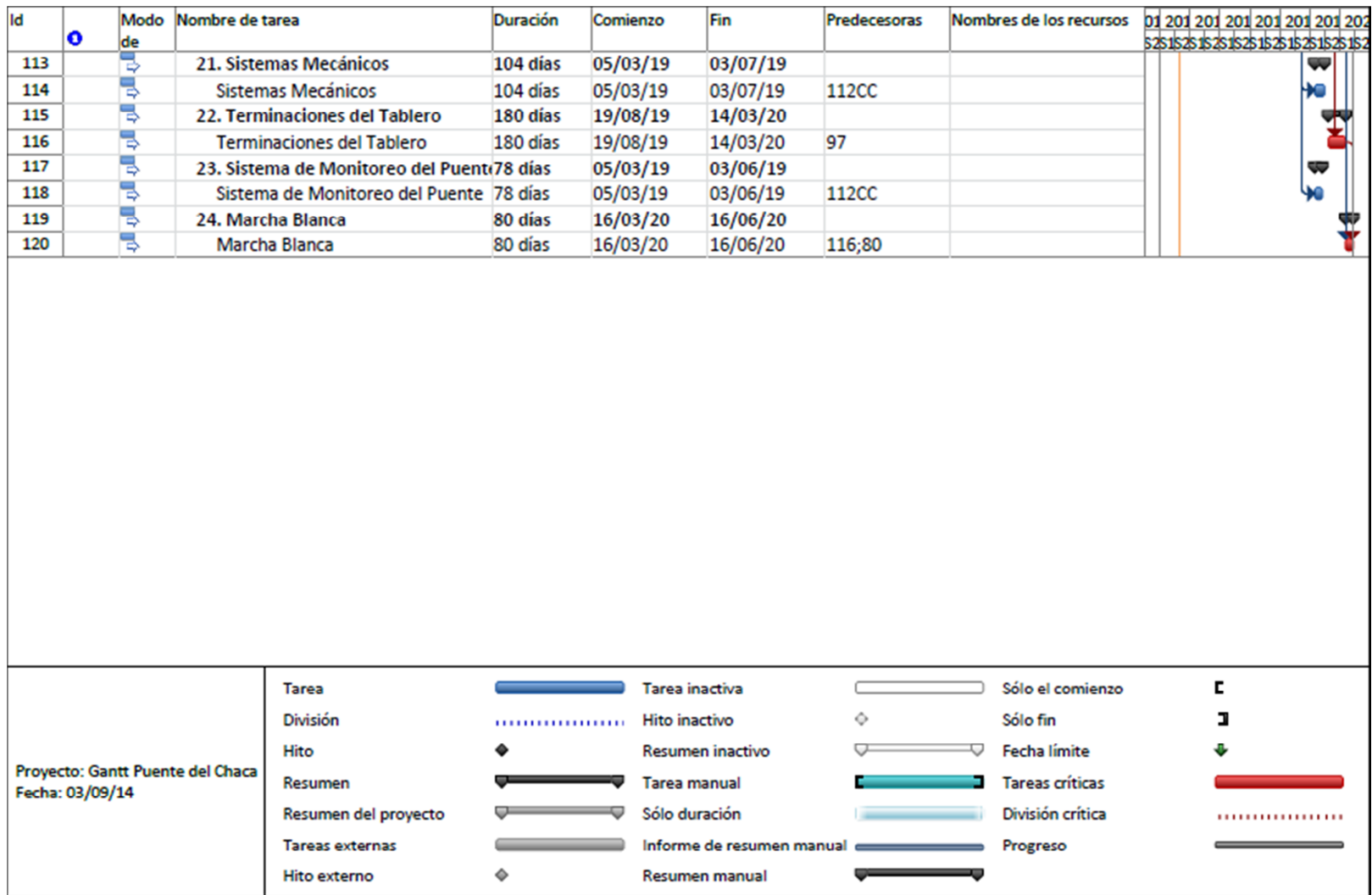


Figura 50: Carta Gantt Puente del Chacao

**Nota.** Fuente: Adaptado de carta Gantt Obra “Diseño y construcción del puente Chacao, región de los lagos” Consorcio OAS-Hundai-Systra-Aas Jacobsen obtenida de la Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.