

EFFECTOS DE LA INCERTIDUMBRE EN LA PROGRAMACIÓN DE
PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE PUENTES CON
MUROS EN TIERRA ARMADA

JUAN SEBASTIÁN HERRERA LOAIZA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI
2018

EFFECTOS DE LA INCERTIDUMBRE EN LA PROGRAMACIÓN DE
PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE PUENTES CON
MUROS EN TIERRA ARMADA

JUAN SEBASTIÁN HERRERA LOAIZA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
INGENIERO CIVIL

Director:
ARMANDO OROBIO QUIÑONES. PhD

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI

FEBRERO DE 2018

RESUMEN

En el medio colombiano los proyectos de construcción de infraestructura vial recurrentemente conllevan retrasos y sobrecostos, debido en cierta medida a las deficiencias presentes en los procesos de planeación, como la estructuración de la programación de obra. Una de dichas deficiencias presentes es la no inclusión de la incertidumbre en los escenarios planteados, partiendo de supuestos determinísticos que usualmente no son acordes a la realidad de la ejecución.

Considerando que los impactos de dichas deficiencias son más notorios en proyectos de mayor envergadura, como son los puentes vehiculares que se planean construir próximamente en la ciudad de Cali, se tomó como caso de estudio un proyecto ejecutado de un puente vehicular con muros en tierra armada. Recreado su programa de obra siguiendo los lineamientos del Método de la Ruta Crítica (CPM), se plantearon dos contextos: un determinístico y otro estocástico. El primero refleja el comportamiento que tuvo el proyecto en la realidad según los datos obtenidos de su ejecución; el segundo muestra los resultados del análisis cuantitativo de riesgos realizado mediante Simulaciones de Monte Carlo (MCS) a partir de registros históricos de otros proyectos.

Comparando los resultados de ambos contextos, se pudo evidenciar que en general el proyecto tuvo un desempeño adecuado, y que las labores de excavaciones y movimientos de tierra pueden influir marcadamente en la consecución de los objetivos, en especial cuando hay presencia de un nivel freático superficial.

Palabras claves: PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE INFRAESTRUCTURA VIAL, RETRASOS, SOBRECOSTOS, INCERTIDUMBRE, PUENTES VEHICULARES, MÉTODO DE LA RUTA CRÍTICA (CPM), SIMULACIÓN MONTE CARLO (MCS), EXCAVACIONES.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2.	OBJETIVOS	3
1.2.1.	OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3.	JUSTIFICACIÓN	4
2.	MARCO DE REFERENCIA	6
2.1.	ANTECEDENTES	6
2.2.	ESTADO DEL ARTE	8
2.2.1.	MUROS EN TIERRA ARMADA	8
2.2.2.	MÉTODO DE LA RUTA CRÍTICA Y TÉCNICA DE EVALUACIÓN Y REVISIÓN DE PROYECTOS – CPM, PERT	9
2.2.3.	PRESUPUESTO DE OBRA	11
2.2.4.	GESTIÓN DEL RIESGO MEDIANTE ANÁLISIS CUANTITATIVO	12
3.	METODOLOGÍA	19
3.1.	CASO DE ESTUDIO	20
3.2.	BASE DE DATOS	22
3.2.1.	RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN HISTÓRICA	23
3.2.2.	TRATAMIENTO DE DATOS	24
3.2.3.	ASIGNACIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD	26
3.3.	MODELO DE DURACIÓN	28
3.3.1.	CONTEXTO DETERMINÍSTICO	29
3.3.2.	CONTEXTO ESTOCÁSTICO	31
3.4.	MODELO DE COSTO DIRECTO	33
3.4.1.	CONTEXTO DETERMINÍSTICO	33
3.4.2.	CONTEXTO ESTOCÁSTICO	34
3.5.	MODELO DE COSTO TOTAL	35
3.5.1.	CONTEXTO DETERMINÍSTICO	36

3.5.2.	CONTEXTO ESTOCÁSTICO	37
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	39
4.1.	DURACIÓN	39
4.1.1.	ANÁLISIS POR FRENTE DE TRABAJO	45
4.1.2.	ANÁLISIS POR ACTIVIDAD	53
4.2.	COSTO DIRECTO.....	56
4.3.	COSTO TOTAL	62
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
6.	REFERENCIAS.....	71

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Muro en tierra armada para puente vehicular en la ciudad de Cali.	4
Ilustración 2: Sistema de muros en tierra armada.	8
Ilustración 3: Diagrama de tornado.	14
Ilustración 4: Diagrama de probabilidad acumulada vs costo total.	15
Ilustración 5: Distribución triangular y sus variaciones.....	16
Ilustración 6: Muestra del agrupamiento por pocas iteraciones.....	17
Ilustración 7: Imagen renderizada aérea de proyecto caso de estudio.	20
Ilustración 8: Clasificación de funciones de probabilidad según AIC.	27
Ilustración 9: Función de distribución de probabilidad Valor Extremo para rendimiento de la actividad.	27
Ilustración 10: Programación de obra bajo un contexto determinístico.	30
Ilustración 11: Distribución de probabilidad asignada para la duración de actividades.	31
Ilustración 12: Modelo de Duración de obra con @Risk.	32
Ilustración 13: Modelo de costos directos, contexto determinístico.....	34
Ilustración 14: Distribución de probabilidad de entrada al modelo de Costo Directo.	35
Ilustración 15: Modelo de costo total, contexto determinístico.....	37
Ilustración 16: Duración Total ajustada a la función Pearson.	38
Ilustración 17: Histograma de probabilidad para la Duración Total del modelo.....	39
Ilustración 18: Diagrama de probabilidad acumulada para la Duración Total del modelo.	40
Ilustración 19: Diagrama de tornado para Duración Total del modelo.....	41
Ilustración 20: Coeficientes de correlación para la Duración Total del modelo.	42
Ilustración 21: Histograma de probabilidad con curva de probabilidad acumulada superpuesta.	46
Ilustración 22: Histograma de probabilidad con curva de probabilidad acumulada superpuesta.....	47
Ilustración 23: Diagrama de tornado para duración del frente de trabajo -EP.	48
Ilustración 24: Coeficientes de correlación para la duración por frente de trabajo.	49
Ilustración 25: Diagrama de tornado para duración del frente de trabajo -RA.	50
Ilustración 26: Coeficientes de correlación para la duración por frente de trabajo.	51
Ilustración 27: Sección del programa de obra bajo el contexto determinístico.	52
Ilustración 28: Diagrama de dispersión Proyecto vs. Actividad.....	54
Ilustración 29: Función Exponencial de distribución de probabilidad para Excavación a máquina.....	55
Ilustración 30: Histograma de probabilidad para el Costo Directo del modelo.....	57
Ilustración 31: Diagrama de probabilidad acumulada para el Costo Directo del modelo.	58
Ilustración 32: Diagrama de tornado para duración total del modelo.....	59

Ilustración 33: Coeficientes de correlación jerárquica para el Costo Directo.	60
Ilustración 34: Histogramas de probabilidad sobre puestos para las actividades de mayor impacto.....	61
Ilustración 35: Diagrama de dispersión para costo unitario de la actividad Excavación a máquina.....	62
Ilustración 36: Histograma de probabilidad para el Costo Total del modelo.	63
Ilustración 37: Diagrama de probabilidad acumulada para el Costo Directo del modelo. .	64
Ilustración 38: Diagrama de tornado para duración total del modelo.....	64
Ilustración 39: Coeficientes de correlación jerárquica para el Costo Total.	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Actividades que componen el análisis.	22
Tabla 2: Obtención de duración para sub-actividades.	29
Tabla 3: Valores límite de influencia de cada actividad para el análisis de sensibilidad, Duración Total.	41
Tabla 4: Índice crítico de las actividades del modelo.	44
Tabla 5: Valores de medición del impacto resumido.	44
Tabla 6: Valores límite de influencia de cada actividad para el análisis de sensibilidad, frente Estructura puente –EP.	48
Tabla 7: Valores límite de influencia de cada actividad para el análisis de sensibilidad, frente Estructura puente –EP.	50
Tabla 8: Valores límite de influencia de cada actividad para el análisis de sensibilidad, Costo Directo.	59
Tabla 9: Valores límite de influencia de cada actividad para el análisis de sensibilidad, Costo Total.	65

1. INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Con el auge que ha experimentado el país en materia de proyectos de construcción de obras civiles, se ha evidenciado que una problemática muy recurrente en estos proyectos de infraestructura es la incapacidad de llevar a cabo las obras en el tiempo para el que fueron programadas (*El País. 2012*). La prolongación más allá de la fecha estipulada para la ejecución de los proyectos no repercute únicamente en el costo total del mismo para los actores que están directamente involucrados (entidades estatales contratante y empresas constructoras contratistas), pues en el caso de proyectos de construcción que se encuentren ubicados sobre corredores viales dentro de áreas urbanas, se generan también restricciones en la movilidad que disminuyen los índices de eficiencia global de la ciudad como un aparato productivo.

Dichas demoras en los proyectos pueden ser generadas por muchos factores como la coyuntura política del momento, disputas jurídicas entre partes, licenciamiento ambiental, adquisición de predios, imprecisión o ausencia de diseños, situación económica del país o la región, o retrasos en la ejecución de la obra (*Calzadilla, Awinda, Parkin. 2012*) (*Rafiq, Ali. 2014*). Es en el último aspecto, en la ejecución de la obra física como tal, donde recurrentemente se presentan retrasos respecto al cronograma establecido para dicha ejecución porque la estructuración del programa de obra presenta debilidades desde su concepción.

Para elaborar un programa de obra, se estima la duración a todas las actividades que conlleva el proyecto, y de acuerdo a la relación de dependencia que hay entre ellas se determina la duración total. El problema radica en que esas estimaciones asumen que todo va a salir de acuerdo a lo planeado, pero en la construcción las cosas raramente van de acuerdo a lo planeado debido a la diversidad de factores que inciden en el proceso como lo son el clima, arribo y condiciones de los materiales, y productividad de trabajadores, entre otros factores (*Barry. 2014*). Asignar un único valor de tiempo a la duración de una actividad es asumir que durante el periodo que se ejecute dicha actividad ningún factor interno o externo a la obra va a variar, lo cual no es acorde a la realidad en el caso de la industria de la construcción.

Es por esto que se requiere incluir unos rangos de variación -llámese incertidumbre- al momento de estimar las duraciones de cada actividad de obra proyectada, de manera que se contemple que dichas actividades podrán demorarse no un valor único de tiempo, sino un rango, que cobijara con mayor seguridad el valor que tomara realmente la ejecución; rango en donde unos valores (que representan unas condiciones específicas) tendrán más probabilidades de suceder que otros debido a que hay algunas condiciones, usualmente negativas, que difícilmente ocurran pero debido a que ya han tenido lugar en el pasado demuestra que siguen teniendo una probabilidad no despreciable de ocurrencia. Dado que los costos de las actividades dependen en alguna medida del tiempo que éstas toman para ejecutarse, de las variaciones de precios en el mercado durante el transcurso del proyecto o de condiciones imprevistas para su ejecución, éstos también deben ser representados por un rango de valores generado a partir de los distintos escenarios que se considere puedan llegar a suceder según experiencias pasadas. (*Flanagan, Norman. 1993*).

De esta manera, el tiempo y costo total que se requiere para ejecutar el proyecto no será un valor único sino un rango de valores con distintas probabilidades de ocurrencia, lo que permitirá a los diferentes actores involucrados en la toma de decisiones tener un fundamento confiable y medible para decidir que tanto riesgo se desea correr al decidir uno de los valores como costo o tiempo objetivo que será asignado al proyecto (*Goodpasture. 2004*).

En la industria de la construcción del medio colombiano la inclusión de dicha incertidumbre mediante procesos estructurados y de probada confiabilidad que permitan administrar el riesgo tiene poca o nula acogida a pesar de los beneficios económicos que pueden llegar a generar para proyectos de construcción en las condiciones locales (*Ramírez. 2014*); y es que si bien hay una conciencia del riesgo al que se encuentran sometidos los proyecto y de las repercusiones que puedan tener, sigue prevaleciendo la toma de decisiones mediante procesos cualitativos basados en la intuición, experiencia y criterio de los involucrados. Lo anterior no es necesariamente negativo, ya que la intuición y experiencia suelen ser los únicos medios a disposición en determinados momentos para la toma de decisiones y tienen su origen en el procesamiento interno de información recopilada durante los años por cada persona. Sin embargo, depender exclusivamente de ello no garantiza que se tome la decisión correcta ya que tiene demasiada subjetividad en sus fundamentos, incluso cuando el problema haya sido solucionado como resultado de dicha decisión puede que esta sea inferior o poco eficiente en términos más globales del proyecto. Esta incertidumbre inherente genera grandes variaciones en tiempo y costo para los resultados finales del proyecto, y en algunos casos, repercute en la calidad y el alcance de este; por lo que afecta directamente los objetivos de todo proyecto constructivo: costo, duración, calidad y alcance. (*Flanagan, Norman. 1993*).

La ausencia de metodologías para el análisis y administración del riesgo en la industria de la construcción suele estar basada en el desconocimiento o falta de familiaridad con ellas, el argumento de la complejidad de los métodos y por ende los recursos que consumen, o incluso la creencia que el riesgo no es algo sobre “modelos científicos”. Lo anterior tiene su origen en la falta de educación formal que hay sobre la gestión del riesgo en quienes encabezan las empresas, mostrando una aversión hacia el riesgo que en términos de desempeño puede llegar a ser desastrosa. (Akintoye, MacLeod. 1997). En Colombia sobran los ejemplos en los últimos años sobre proyectos de infraestructura que simplemente no cumplieron ninguno de los objetivos planteados inicialmente, y aunque un argumento podría ser que hay otros factores ajenos a la construcción física que también afectan los proyectos, esto sería solo un sustento más para la necesidad que hay de gestionar el riesgo en la parte constructiva a manera de reducción del riesgo global al que se encuentran sometidos los proyectos en nuestro medio.

La problemática asociada a los sobrecostos y retrasos en proyectos de mayor tamaño suele representarse en grandes cantidades de dinero, por lo que en la medida que los proyectos se vuelven más complejos, es más notoria la necesidad de un mejor análisis de riesgos (Taroun. 2014). Así, mientras en el medio local se continúen ejecutando grandes proyectos que no contaron con un adecuado proceso de planeación que incluya un análisis de riesgos, no solo se estará hablando de una pérdida económica o incluso reputacional, si no que no habrá la posibilidad de retroalimentar los sistemas de gestión de riesgo a partir de los resultados de cada proyecto, y por ende se perderá la oportunidad de afianzar la efectividad de dichos sistemas de acuerdo a las condiciones locales. Lo anterior demuestra la importancia de la inclusión de la incertidumbre como un factor de riesgo y la necesidad que hay para que las metodologías que la consideran empiecen a ser implementadas en el medio nacional.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer los efectos asociados a la incertidumbre en programación (tiempo y costo) de proyectos de puentes vehiculares con muros en tierra armada mediante el análisis de un proyecto caso de estudio de la ciudad de Cali.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Comparar el desempeño en la ejecución del caso de estudio con base en el modelo determinístico, frente a los escenarios de la modelación probabilística, para proyectos de construcción de puentes vehiculares de mediano y gran tamaño.
2. Identificar las actividades que afectan de manera significativa la variabilidad en tiempo y costo para proyectos de características similares.

JUSTIFICACIÓN

Dado que en la ciudad de Cali, como en las principales ciudades del país, la problemática en la movilidad vehicular es cada vez más notoria (*Cali Como Vamos. 2015*), la solución de pasos a desnivel (hundimientos o puentes) viene cobrando cada vez más fuerza como una eficaz respuesta a la movilidad en los puntos donde se interceptan múltiples vías arterias, prevaleciendo las soluciones tipo puentes por sus menores costos asociados (*El Tiempo,*



*Ilustración 1: Muro en tierra armada para puente vehicular en la ciudad de Cali.
Fuente: Empresa Stup Latinoamérica.*

2014). En la ciudad se ha mantenido la tendencia desde los años 90's de realizar estos grandes puentes vehiculares mediante el sistema de muros en tierra armada para sus rampas de aproximación, sistema de gran acogida desde su invención en los años 70's por el ingeniero francés Henry Vidal por las múltiples ventajas, económicas y constructivas, que ofrece frente a otros sistemas tradicionales como los muros en concreto reforzado que requieren grandes cuantías de acero y elementos de cimentación por su comportamiento como mecanismos en voladizo.

En los próximos años en la ciudad serán construidos un conjunto de puentes vehiculares en algunos de sus principales ejes viales que están contemplados dentro del proyecto de las 21 Megaobras (*Secretaria Infraestructura y Valorización (1). 2009*), así como otros planteados desde tiempo atrás como solución a varias de las intersecciones de vías arterias y distintos accesos a la ciudad, lo que tendría sustento en las inversiones establecidas como necesarias por el Gobierno Nacional para el año 2035 en materia de infraestructura para mejorar la

competitividad de las ciudades principales y por ende del país (PMTI. 2015). Es de esperarse que estos grandes puentes vehiculares utilicen el sistema de tierra armada por los motivos previamente mencionados, y que al igual que los demás ya construidos tengan unos precios cercanos a los \$25,000'000,000 a precio del año 2016 (*Secretaria Infraestructura y Valorización* (2). 2009).

El proceso actual para poder llevar a cabo estos proyectos es que la entidad contratante estatal realiza un contrato con una empresa para obtener los estudios, diseños y presupuesto del proyecto futuro, incluido un tiempo estimado de construcción para la obra; y después realiza otro contrato con una empresa constructora que será la encargada de materializar el proyecto. Dado que la primera usualmente no tiene ninguna experiencia en procesos constructivos, es común que el presupuesto y cronograma con los cuales la entidad estatal realiza el segundo contrato sean modificados mediante adiciones de tiempo y dinero en el transcurso de la ejecución, dada la imposibilidad física de poder llevar a cabo el proyecto en los términos iniciales. Este *modus operandi* ya es conocido en el medio local y hace que de entrada las empresas constructoras se enfrenten a una mayor incertidumbre respecto a lo que deben ejecutar, pues seguramente se encontraran con muchos elementos imprevistos en el contrato pactado inicialmente.

Para optimizar los procesos y reducir el riesgo en las labores constructivas de este tipo de proyectos, es clave identificar cuáles de sus etapas son altamente riesgosas desde el punto de vista de la programación de obra, ya sea porque su costo representa una gran fracción respecto al costo total o por la variabilidad de tiempo y costo que puedan presentar en obra y sus efectos en los valores totales. Es por esto que un análisis cuantitativo de riesgos para las duraciones y costos permite tener un panorama más acertado del impacto que produce la incertidumbre en proyectos de características similares, y con esto poder identificar aquellas actividades que representan un alto grado de volatilidad y por ende un potencial riesgo.

Tener definidos los orígenes e impactos de la incertidumbre permite tener tanto en la planificación y programación, como en ejecución de la obra, una poderosa herramienta para la toma de decisiones de acuerdo a los riesgos dispuestos a tomar para ingenieros y demás personal involucrado en los proyectos a desarrollar en el futuro. La ilustración de los beneficios de las metodologías cuantitativas para la gestión de riesgos con un caso local, podría contribuir a una mayor adopción de estas por parte de las empresas de la región, lo que fortalecería y daría mayor competitividad al medio constructor colombiano. Los impactos generados por la incertidumbre en tiempo y costo, y sus repercusiones para proyectos locales de grandes inversiones como lo son los puentes vehiculares interurbanos, es la problemática que este trabajo desea abordar.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. ANTECEDENTES

Utilizando el Método de Programación Linear (LSM) para la modelación de un proyecto de carreteras, se planteó evaluar como un proyecto de construcción es afectado por distintos grados de incertidumbre y determinar si la duración más óptima obtenida con el modelo estocástico varía de la duración final resultante del modelo determinístico. Haciendo uso de software de Palisade (BestFit y @Risk) para la obtención de las distribuciones de probabilidad y realizar la modelación Monte Carlo, se introdujo valores de incertidumbre al modelo. La comparación de los resultados del modelo determinístico y el estocástico, permitió establecer el impacto de la inclusión de la incertidumbre en la duración del proyecto y en tiempo libre de las actividades. Se determinó que en la medida en que las incertidumbres incrementan lo hace también la duración esperada del proyecto, en donde considerar un modelo determinístico subestima la duración real de un proyecto constructivo, y como este es improbable de ser una óptima representación para alcanzar los objetivos de duración de proyectos de carretera (*Trofin. 2004*).

A partir de un modelo basado en el Método de la Ruta Critica (CPM) y la Simulación Monte Carlo (MCS), denominado CSRAM, que permite evaluar una red de actividades de construcción bajo incertidumbre e incluyendo el análisis de tomas de decisiones; se modeló la duración de las actividades de un proyecto real de una casa de un piso, ajustado a distribuciones de probabilidad triangular basadas en el método PERT. Usando el software @Risk, integrado a una hoja de cálculo Ms Excel, se simuló tanto el modelo CPM-MCS como el CSRAM (pero este con la inclusión de los factores de riesgo) para obtener las probabilidades de ocurrencia de las diferentes duraciones dadas. Se determinó que el modelo CSRAM, mediante las distribuciones triangulares de probabilidad, si produjo resultados realistas al considerar la correlación entre los factores de riesgo y las duraciones de las actividades (*Ökmen; Öztaş. 2008*).

Por medio de los resultados de encuestas realizadas a 77 personas involucradas en la construcción de puentes vehiculares, donde la mayoría contaban con títulos en ingeniería civil y una experiencia promedio de 16 años en proyectos constructivos, se determinaron los factores que más afectan el desarrollo en la etapa de construcción de proyectos de puentes

vehiculares en Pakistán y la recurrencia de estos. Para esto se eligió como caso de estudio a un proyecto ya desarrollado de un puente de 166 m de largo, y utilizando la Simulación Monte Carlo se recreó el impacto de las distintas áreas de riesgo y sus probabilidades acorde a la información recopilada, sobre el modelo creado para el caso estudio. Después de los problemas de flujo de caja, asociados a la consecución de los recursos para poder desarrollar la obra, los problemas en las etapas de construcción y planificación fueron calificados como aquellos que más impactaban en el desarrollo de este tipo de proyectos. (*Rafiq, Ali. 2014*).

Mediante una revisión y comparación de literatura sobre la incidencia del riesgo y sus efectos en el caso de la creación de presupuestos para proyectos de construcción, se realizan una comparación entre tres métodos de común uso: análisis de regresión, razonamiento basado en casos (Case Based Reasoning CBR) y simulaciones por el método Monte Carlo (Monte Carlo Simulation MCS). Se concluye que a pesar de que MCS requiere un esfuerzo significativo en la recolección de datos históricos que permitan tener una confiabilidad en los resultados de la simulación, el método provee unas ventajas de manipulación que los demás no tienen y además permite conocer de manera más general las interacciones entre las variables. A partir de esto se realiza un modelo de presupuestos mediante un enfoque tradicional determinístico y un modelo a partir de MCS para el proyecto de un edificio en concreto reforzado, mostrando mediante la comparación de los resultados de cada modelo que el modelo estocástico genera un panorama mucho más eficiente para establecer un valor de contingencia que el proceso determinístico donde se asigna un porcentaje del total según el criterio de los involucrados (*Xenidis, Stavrakas. 2013*).

A partir de información recopilada sobre 40 proyectos de infraestructura vial del suroccidente colombiano, se construyó una base de datos que permitió determinar las distribuciones de probabilidad para duración y costo unitario de las distintas actividades. Usando los principios del Método de la Ruta Crítica (CPM) y por medio del software @Risk para Ms Project para la realización de la Simulación Monte Carlo (MCS), se modeló la programación de uno de los proyectos elegido como el caso de estudio, en donde las distribuciones de la duración de cada actividad fueron las variables de entrada y la duración total del proyecto la variable de salida. Análogamente para los costos, haciendo uso de MS Excel se configuró un modelo donde los costos unitarios son las variables de entrada y el costo directo total la variable de salida. Tomando el modelo anterior, se adicionaron los costos administrativos en función del tiempo, para tener los costos totales del proyecto como una tercera variable de salida.

La interpretación de los resultados obtenidos para los tres modelos mencionados permitió la identificación de los impactos de la incertidumbre en el proyecto caso de estudio, así como aquellas actividades que más incidieron en dichos impactos y algunas de las causas que generaron la variabilidad en aquellas actividades relevantes lo que permitió generar algunas

recomendaciones para la ejecución de dichas actividades de manera que se logre minimizar su variación en tiempo y costo (Gómez. 2014).

La mayoría de las investigaciones hechas hasta el momento para el proceso de construcción de puentes vehiculares están asociadas a la seguridad industrial y a la gestión global del riesgo; lo que indica la necesidad que hay de profundizar en el tema de la incertidumbre asociada a la programación de obra.

2.2. ESTADO DEL ARTE

2.2.1. MUROS EN TIERRA ARMADA

El sistema de tierra armada consiste en el uso de tiras metálicas, geomallas o geotextiles, que funcionan como refuerzo al estar extendidas dentro del terraplén que conforma el muro, y que al intercalarse con capas de suelo compactado se genera una fricción por la masa misma del suelo, lo que permite que los refuerzos tensen los elementos exteriores a los que están unidos y estos a su vez confinen la estructura. Aquellos elementos exteriores son prefabricados, en concreto y pueden tener forma de bloques (keystone) o escamas como en la *Ilustración 2*.



Ilustración 2: Sistema de muros en tierra armada. Fuente: Empresa Tierra Armada, Perú.

Si bien este tipo de solución para proyectos viales resulta más costosa que el manejo de terraplenes por su ángulo de rozamiento interno, es de mayor uso ya que en el caso de las

ciudades donde el área disponible para la construcción de estructuras sobre ejes viales es mínima, es clave el uso de muros verticales; y comparando el sistema de tierra armada con los muros tradicionales en concreto reforzado, suele resultar más económico y menos dispendioso el sistema en tierra armada porque dichos muros en concreto reforzado requieren de elementos de cimentación de grandes dimensiones y además funcionan como voladizo por lo requieren de grandes cantidades de acero cuando se trata de muros de alturas considerables (Coreas, Osorio, Rivas. 2009). Por regla general, para muros con alturas mayores a los 3 m, es más económico en términos globales (mano de obra, tiempo, materiales) el uso de sistemas en tierra armada.

2.2.2. MÉTODO DE LA RUTA CRÍTICA Y TÉCNICA DE EVALUACIÓN Y REVISIÓN DE PROYECTOS – CPM, PERT

El Método de la ruta (Critical Path Method - CPM) surgió entre los años 1956 y 1958 en Estados Unidos, cuando la E.I du Pont de Nemours Company construía grandes plantas químicas en el país norteamericano y requería de unos procesos que le permitiera establecer fechas y costos de manera más estructurada y precisa. Este método requiere de unos valores establecidos para el rendimiento con el que se suele desarrollar las actividades que conlleva el proyecto, de manera que relacionando la dimensión de la actividad a desarrollar con el rendimiento esperado se obtiene una estimación del tiempo que tomará para llevarla a cabo, y con este su costo asociado. Dentro del grupo de actividades habrá unos subgrupos o rutas en donde las actividades están relacionadas entre sí por las dependencias que tienen unas de otras, por lo que cada subgrupo o cadena de actividades tendrá un tiempo total. Es la diferencia entre estos tiempos totales de las cadenas o rutas lo que da origen a la ruta crítica, que es aquella cadena o subgrupo de actividades que posee una mayor duración debido a la secuencia y duraciones que hay entre sus actividades. Dicha mayor duración determina la duración del proyecto, debido que a una vez terminados los otros subgrupos el proyecto continúa en marcha por la no finalización de la cadena crítica.

Establecida la ruta crítica, si hay medios disponibles para hacerlo el paso a seguir es comprimir o reducir la duración de aquellas actividades que estén dentro de la ruta crítica, denominadas actividades críticas, de manera que la duración del proyecto se reduzca hasta el punto en que la ruta crítica ya tiene la misma duración que otra de las rutas o cadenas y por ende una mayor reducción en tiempo en esa ruta cambiaría su estado a no crítica, por lo que habría que analizar el nuevo escenario donde la ruta crítica es un nuevo grupo de actividades. La anterior es la esencia del método, ya que permite hacer un buen seguimiento al desempeño del proyecto en su ejecución mediante la constante vigilancia de que la ruta crítica siga los parámetros programados.

Este método representa una gran herramienta para la programación de proyectos complejos, en donde el número de distintas actividades es grande y es crucial mantener el desarrollo dentro de la ruta crítica. Para proyectos de características lineales, donde hay pocas actividades que se repiten un gran número de veces a medida que avanza el desarrollo del proyecto, como la construcción de una línea de gas o una vía férrea, el método puede no ser la herramienta ideal debido a que las actividades tienen que ser segmentadas creando complicaciones de cálculo y se recomienda hacer uso del método de la Línea de Balance (LOB). Un ejemplo de proyectos donde el CPM puede mostrar sus bondades es en puentes de gran tamaño. (Yamin, Harmelink. 2001) (Antill, Woodhead. 2002).

Los procesos de planeación y programación de proyectos por CPM consisten en (Sears. 2010):

1. Determinación del enfoque general del proyecto
2. Desglosar el proyecto en fases o actividades a ser ejecutadas (Work Breakdown Structure WBS).
3. Determinación y comprobación de las relaciones secuenciales entre dichas actividades.
4. Representación gráfica, de la información de planeación, en forma de red.
5. Estimación del tiempo requerido para realizar cada actividad de la red.
6. Calcular la duración total del proyecto usando dichas estimaciones.
7. Establecer los intervalos de tiempo de cada actividad.
8. Identificar las actividades críticas.
9. Reducir la duración del proyecto al menor costo posible.
10. Registrar los supuestos y las restricciones, que serán, un aspecto integral de la línea base de programación del proyecto.

Paralelamente en la misma época en que se desarrolló el CPM, la U.S Navy (Marina de EE.UU) necesitaba una nueva metodología que le permitiera llevar a cabo su programa de cohetes Polaris, que requería la manufactura de unas partes que no habían sido hechas anteriormente y por lo tanto no se tenían unos valores precisos del rendimiento de las operaciones. Lo anterior describe la incertidumbre que había para la estimación de las duraciones, variable que si fue considerada en la denominada Técnica de Evaluación y Revisión de Programas (Program Evaluation and Review Technique - PERT) a diferencia del CPM.

La metodología consiste básicamente en la estimación de tres duraciones, en donde una es la mínima posible u optimista (ta), otra es un valor medio o más probable de ocurrencia (tm) y otra es el valor máximo esperado o el pesimista (tb). El valor de tiempo esperado (te) para cada actividad a la que se la han definido sus tres duraciones viene definido por

$$te = \frac{ta + 4tm + tb}{6}$$

Al igual que el CPM, el método PERT utiliza los diagramas de redes para representar la distribución del proyecto, así como los distintos tiempos de inicio y terminación de las actividades. La similitud entre estos dos métodos y el hecho de que sean ampliamente respaldados y utilizados (PMI. 2013), ha hecho que en la actualidad se tienda a usarlos de manera combinada en los llamados sistemas CPM/PERT.

Es tal la aceptación de estos métodos en el medio local, que en la actualidad todo proyecto constructivo en su etapa de contratación por entidades estatales en Colombia, solicita a las empresas constructoras que presenten como parte de sus ofertas una programación de obra y su tiempo de ejecución, establecidos mediante el CPM con la identificación de las actividades críticas.

2.2.3. PRESUPUESTO DE OBRA

Un proyecto de construcción, a pesar de sus grandes dimensiones, no difiere mucho en su objetivo de otro tipo de proyectos industriales, pues tiene como objetivo transformar, colocar o ensamblar materiales o elementos transformados para obtener un producto terminado, sea un edificio o una carretera. En general, los costos que se tiene que asumir para poder llevar a cabo dichos procesos, se dividen en dos grupos: directos e indirectos.

- 2.2.3.1. Costo directo: es aquel que representa la suma de la mano de obra, materiales y equipos, herramientas o maquinarias necesarias para la materialización del producto. Se suelen representar mediante los Análisis de Precios Unitario (APU), que permite apreciar cuánto cuesta producir una unidad del producto o actividad objetivo.
- 2.2.3.2. Costo indirecto: se compone por los gastos necesarios para que la organización pueda ejecutar los trabajos, sin incluir los costos directos. En el medio local se suelen dividir en tres grupos: Administrativo, que son los salarios de profesionales que coordinan el proyecto, personal administrativo, instalaciones físicas, personal auxiliar, gastos varios de oficina; Impuestos, que son las tasas impositivas relacionadas a la actividad constructora y pueden variar dependiendo de quién sea la entidad estatal contratante si la hay; y Utilidades, que sería la ganancia obtenida por la organización que ejecuta el proyecto, pero que para la entidad estatal contratante cuenta como un gasto adicional.

2.2.4. GESTIÓN DEL RIESGO MEDIANTE ANÁLISIS CUANTITATIVO

El riesgo se define como la probabilidad de que suceda un evento con sus respectivas consecuencias, positivas o negativas; por lo que el riesgo supone entonces la variación de resultados para una misma acción. Viendo en perspectiva, cualquier acción cotidiana como cruzar la calle podría ser catalogada como una acción arriesgada. Sin embargo, el término se reserva para acciones que pueden tener una variedad más significativa de resultados, pues al cruzar la calle lo más probable es que no suceda nada malo; aunque la misma acción de cruzar la calle esta vez con los ojos vendados sin duda asigna más probabilidades a los resultados negativos, que en el primer caso era casi seguro no iban a suceder y ahora si se podría hablar de riesgo.

Siendo así, el riesgo de un proyecto es una condición incierta, que si se llega a producir tendrá un efecto sobre uno o varios de los objetivos del proyecto mismo, sean estos el costo, el cronograma, el alcance y la calidad. Este riesgo puede tener múltiples causas, y de igual manera múltiples impactos. Es por eso que el termino incertidumbre, que es básicamente la falta de certeza o seguridad sobre algo, es la base del concepto de riesgo toda vez que la toma de decisiones es orientada hacia el futuro, futuro que por naturaleza es desconocido e incierto.

Aceptar que el futuro es sinónimo de incertidumbre es clave para la toma de decisiones, pues así se acepta que hay un riesgo latente para los proyectos y se ve la necesidad de estimar el impacto que dicho riesgo pueda tener. Esta estimación se logra mediante procesos de gestión del riesgo, los cuales permiten identificar y cuantificar el riesgo latente y a partir de esto realizar una toma de decisiones. Las etapas generales de un sistema de gestión de riesgo son:

- Identificación del riesgo.
- Clasificación del riesgo
- Análisis del riesgo.
- Respuesta al riesgo.

Es la tercera etapa, el análisis, la que permite estimar el impacto que tendrá el riesgo latente en el proyecto, y a partir de sus resultados y la actitud de los responsables respecto al riesgo, tomar una decisión o respuesta que se dará frente a cada situación específica. Dicho análisis puede realizarse mediante una gran variedad de métodos, cualitativos o cuantitativos o una mezcla de ambos. El primer tipo suele tener un carácter más subjetivo, ya que se apoya principalmente en el juicio, experiencia e intuición para sus distintas técnicas o herramientas y es considerado un método más rápido y económico para definir respuestas frente al riesgo. El segundo tipo se basa en la utilización de datos para crear modelos que tengan como salida unos valores numéricos que permiten clasificar el riesgo que representa para los distintos objetivos; este proceso suele tener lugar después de haber realizado el análisis cualitativo, pues su mayor complejidad y profundización permite tener un panorama más claro de los impactos de los riesgos que aquejan al proyecto.

Dentro de las herramientas o técnicas que se utilizan para realizar un análisis cuantitativo de riesgo resaltan las siguientes: análisis de sensibilidad, análisis de valor monetario esperado (EMV), modelado y simulación, y juicio de expertos.

Para el caso del análisis de sensibilidad, permite evaluar el grado en que la incertidumbre de cada elemento afecta al costo o tiempo a partir de la variación que tiene desde su línea base o valor correspondiente a la media del proyecto. Usualmente se utilizan los diagramas de tornado como el mostrado en la *Ilustración 3*, que mediante la jerarquización de las amplitudes de variación que generan los impactos de los elementos individuales del proyecto, como el impacto que tiene un elemento más volátil versus el impacto que genera otro elemento más estable. Con esto se puede establecer que elementos, procesos o actividades generan mediante el impacto de su incertidumbre una mayor variación en los distintos objetivos del proyecto.

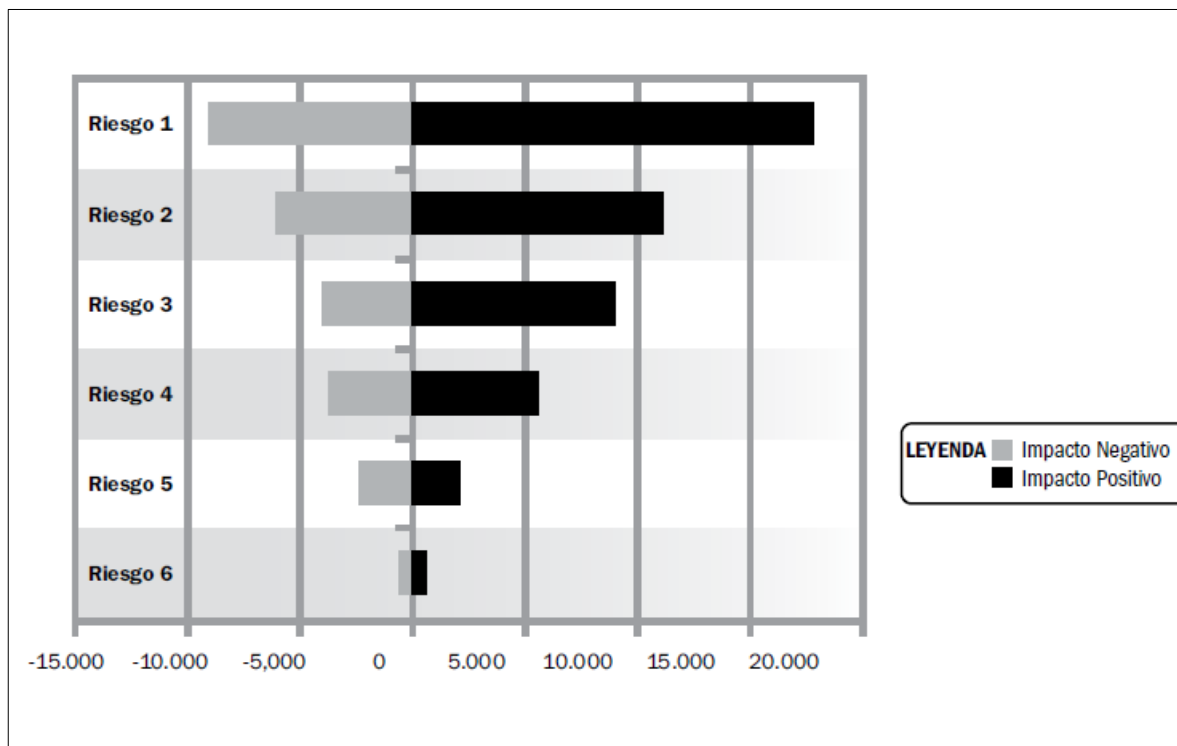


Ilustración 3: Diagrama de tornado. Fuente: (PMI. 2013).

La modelación y simulación consiste en el análisis de múltiples escenarios posibles, habitualmente mediante el método Monte Carlo, considerando distintos resultados del modelo mediante iteración a partir de la toma aleatoria de valores de entrada que están dispuestos en distribuciones de probabilidad definidas para los distintos elementos que conforman el proyecto. Como resultado se puede obtener un histograma y una curva de probabilidad acumulada para el objetivo del proyecto que se esté analizando a partir de los distintos valores considerados en la entrada del modelo. La *Ilustración 4* muestra una curva de probabilidad acumulada vs el costo que puede llegar a tener un proyecto, mostrando como hay una probabilidad del 50% de obtener un costo de USD \$46.7 millones.

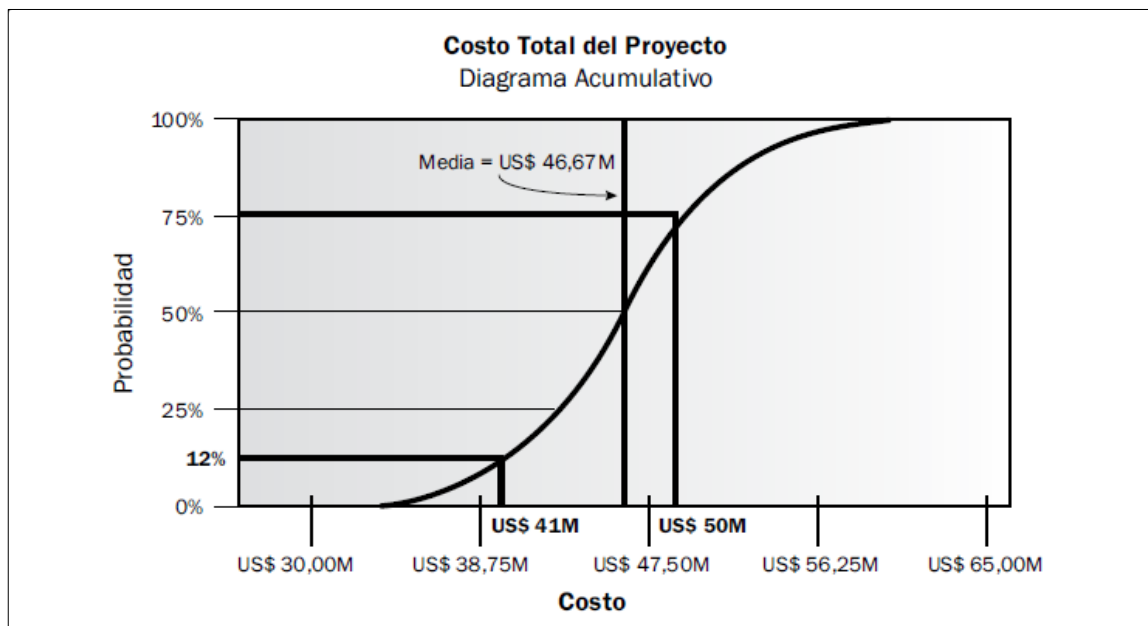


Ilustración 4: Diagrama de probabilidad acumulada vs costo total. Fuente:(PMI. 2013).

Este resultado puede definirse como un análisis probabilístico del proyecto, donde se enumeran los diferentes escenarios que hay para el cronograma y costos del proyecto, relacionando cada uno con su nivel de confianza asociado según la probabilidad que tenga de ocurrir dicho escenario. Con este resultado y el nivel de tolerancia al riesgo establecido para el proyecto según las personas encargadas de la toma de decisiones, se permite establecer los valores establecidos para cada objetivo y la cuantificación de las reservas para contingencias de costo y tiempo, si tienen lugar (PMI. 2013).

2.2.4.1. SIMULACIÓN MONTE CARLO – MCS

La Simulación Monte Carlo es una técnica matemática, utilizado en una gran variedad de áreas del conocimiento para la estimación de resultados a partir de múltiples entradas variables, que mediante la selección aleatoria de valores para dichas variables de entrada permite obtener una representación de todos los posibles resultados, replicando los comportamientos propios de un sistema real. Esto se representa mediante el uso de distribuciones de probabilidad como variables de entrada, para las cuales la modelación toma valores aleatorios para cada una y debido a la gran cantidad de iteraciones que realiza logra representar de manera realista todos los escenarios posibles y con ellos todos los resultados posibles. Estos resultados posibles son representados mediante curvas de distribución de probabilidad, lo que permite conocer cuáles son los escenarios más probables y los menos probables.

La Simulación Monte Carlo admite distintos tipos de distribuciones de probabilidad como variables de entrada, en donde las más comunes son (Palisdale. 2014):

- Normal (Curva de campana): se define simplemente la media y la desviación estándar, generando una curva simétrica con forma de campana.
- Lognormal: los valores muestran una clara desviación, no son simétricos y representa aquellos que no caerán en cero y tienen potencial positivo ilimitado.
- Uniforme: se define el mínimo y el máximo, y todos los valores tendrán la misma probabilidad de producirse.
- PERT-Beta: se define el valor mínimo, más probable y máximo, en donde los valores ubicados entre el más probable y los extremos están representados por una curva convexa, diferenciándolo de la triangular.
- Triangular: se define un valor mínimo, más probable y máximo; en donde los valores cercanos al valor más probable tienen mayor posibilidad de producirse. La distribución puede presentar de tres maneras como lo muestra la Ilustración 5: simétrica, donde la media se encuentra en el centro del área y concuerda con la mediana; o con tendencia positiva o negativa, en donde el valor probable definido está más cercano hacia uno de los extremos que el otro.

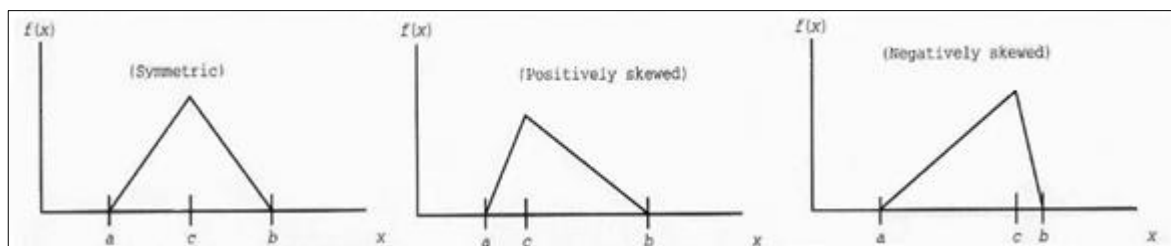


Ilustración 5: Distribución triangular y sus variaciones. Fuente: (Fiorito. 2006)

Esta distribución es ampliamente usada por su facilidad de representar una buena aproximación de otro tipo de distribuciones o ante la ausencia de datos; resaltando que ha sido demostrada como una buena opción frente a la distribución tipo PERT-Beta (Hajdu; Bokor. 2014). Considerando las características que son frecuentes en la industria de la construcción, donde las cosas que pueden afectar mayormente un valor de ejecución son el resultado de distintas condiciones específicas ocurriendo al mismo tiempo, que por ende tienen menor probabilidad de ocurrir, se ha demostrado que un comportamiento más acercado a la realidad es cuando la distribución tiene un sesgo positivo (hacia la derecha

de la media) como el caso mostrado en el centro de la *Ilustración 5*. (Fente; Schexnayder; Knutson. 2000).

Considerando que el principio de la MCS es la toma aleatoria de valores desde una distribución de probabilidad definida como su entrada, una consecuencia de un número bajo de iteraciones, es la agrupación de resultados. Esto se debe a que, si bien la toma de valores es aleatoria, las muestras tienen más probabilidad de pertenecer a las zonas de mayor probabilidad para cada distribución definida en la entrada, por lo que es más probable, que un valor tomado aleatoriamente de una distribución triangular simétrica, esté más cerca al centro (que es la media), que a uno de sus extremos. Se toma a consideración un caso donde solo haya cinco iteraciones y por ende cinco escenarios de salida, y que al comparar con una gráfica de probabilidad acumulada del mismo modelo, pero con muchas más iteraciones, estos cinco valores de salida tendrán una probabilidad del 41, 48, 52, 57 y 65% respecto a la gráfica de distribución total que se tendría mediante muchas más iteraciones como lo muestra la *Ilustración 6*.

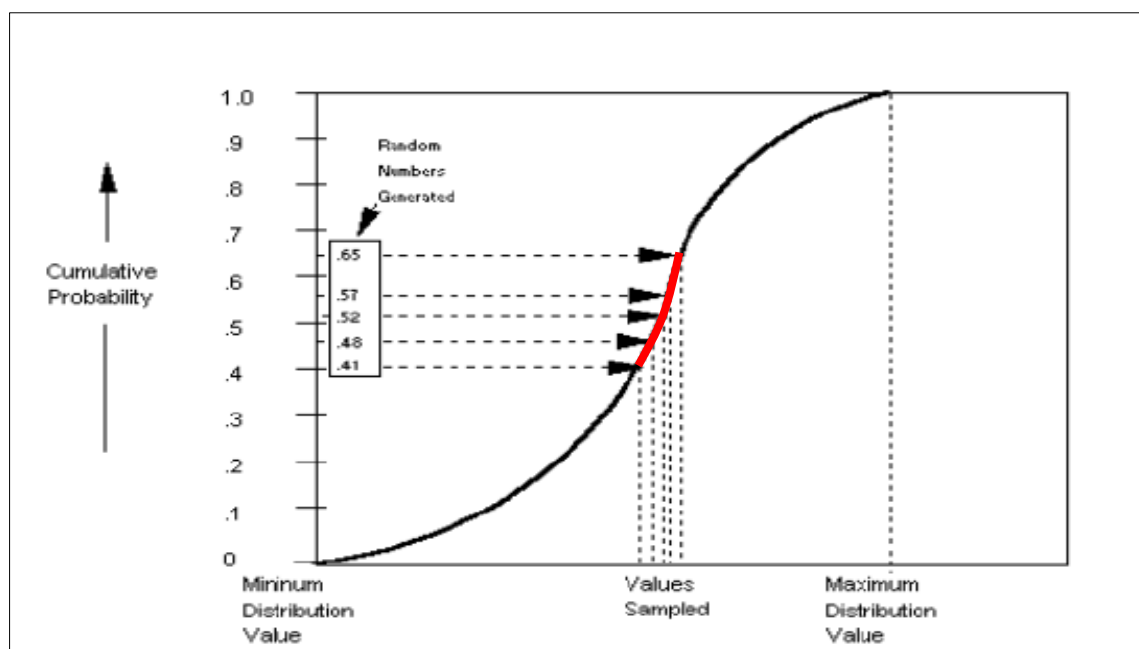


Ilustración 6: Muestra del agrupamiento por pocas iteraciones. Fuente: Palisade, 2016.

Si se realizara un análisis a partir del resultado de esa simulación que tuvo cinco iteraciones, solo se consideraría una fracción de los resultados posibles para las entradas con las que se hizo dicho modelo, ya que mostraría una curva de probabilidad acumulada entre los valores de 41 y 65%, solo un 24% de lo que sería la curva total (representado por la curva roja) y

omitiría el 76% de los escenarios restantes. Este agrupamiento se torna mayor cuando la distribución de probabilidad de entrada tiene una cola muy pronunciada, debido a la presencia de valores con muy baja probabilidad, lo que podría llevar a omitir escenarios de gran importancia en el caso que dichos valores omitidos en los extremos de la distribución de entrada, sean los que mayor impacto tienen sobre los resultados finales. Esto demuestra la importancia de que los procesos que se realicen bajo MCS tengan un número considerable de iteraciones para poder reflejar fielmente el comportamiento del sistema.

Debido a que la cantidad de iteraciones necesarias para poder representar todos los resultados posibles y sin sesgo, es muy grande, la simulación se consideraba un método muy pesado computacionalmente y poco eficiente; pero con el avance de la tecnología en los ordenadores en las últimas dos décadas el problema de la carga computacional ha sido resuelto en gran medida, permitiendo una masificación de su uso y la apropiación de él en las metodologías de gestión de riesgos con enfoque cuantitativo.

3. METODOLOGÍA

Este trabajo se desarrolló tomando como caso de estudio un proyecto de infraestructura vial, realizado en la ciudad de Cali en el año 2016, del que se tuvo acceso a la información de su planeación y ejecución por parte de la empresa constructora que lo materializó, y a partir de la cual se configuraron tres modelos para homologar su programación, considerando dos contextos de operación: determinístico y estocástico.

Tomando como base las actividades que compusieron el caso de estudio, y que se utilizaron en los modelos, se recopiló información de costos y rendimientos de obra para crear una base de datos, que permitiera generar distribuciones de probabilidad, las cuales fueron los valores de entrada para hacer factible el funcionamiento del entorno estocástico. Esta base de datos contenía también los valores obtenidos para el caso de estudio, valores que fueron utilizados como datos de entrada para los modelos operando bajo el entorno determinístico, el cual representa el desempeño real que tuvo la ejecución del proyecto caso de estudio.

Los modelos determinísticos se realizaron utilizando MS Excel y MS Project, obteniendo unos valores estáticos como resultado, mientras que los modelos estocásticos requirieron el uso del programa @Risk como complemento de MS Excel y MS Project, para poder operar bajo la multiplicidad de escenarios posibles de un entorno estocástico. La confrontación de los resultados de cada modelo, en su respectivo contexto de operación, permitió comparar el comportamiento del entorno determinístico frente a los posibles escenarios mostrados por el entorno estocástico, y cuáles fueron las variables de entrada que más influyeron en la generación de los distintos escenarios. Para cada contexto de operación, determinístico y estocástico, se crearon tres modelos:

- Tiempo.
- Costo directo.
- Costo total.

Debido a que no fue posible acceder a los análisis de costos internos de la empresa que realizó el caso de estudio, y de la empresa que suministró la información de los proyectos adicionales, los modelos de Costo abordan el proyecto desde la perspectiva de la entidad contratante, ya que estos se realizaron con base en los precios unitarios establecidos en el

proceso contractual, los cuales no necesariamente reflejan el costo real en que tiene que incurrir el contratista, al momento de ejecutar los trabajos.

3.1. CASO DE ESTUDIO

Siguiendo la línea de lo planteado en **1.3.**, respecto a la relevancia que tienen los proyectos de puentes vehiculares, con sus rampas de aproximación construidas mediante el sistema de tierra armada, se tomó como caso de estudio la construcción de un puente vehicular en la intercepción de dos importantes vías primarias de la ciudad de Cali. El puente consiste en una losa de concreto reforzado, con 6 carriles vehiculares, apoyada sobre cinco líneas de vigas de acero, que a su vez reposan sobre dos estribos y dos vigas en concreto reforzado, modulando así tres luces o vanos. Cada viga en concreto reforzado está apoyada sobre dos pilas o columnas circulares de gran sección y se encuentran ubicadas dentro de la rotonda (round point) que yace bajo la estructura del puente, la cual recibe el tráfico proveniente del eje transversal respecto al eje longitudinal del puente. En la *Ilustración 7* se puede apreciar la configuración espacial que tuvo el proyecto.



Ilustración 7: Imagen renderizada aérea de proyecto caso de estudio. Fuente: SECOP.

Para la ejecución del proyecto se tuvo que demoler toda la estructura de pavimento existente sobre el eje longitudinal del puente y una distancia aproximada de 1 km de la vía ubicada

sobre el eje transversal. También contemplo la renovación de los andenes en las inmediaciones del proyecto y la instalación de tubería para la red pluvial en el separador del eje transversal. Hay que aclarar que el caso de estudio formaba parte de un proyecto de mayor envergadura que contemplaba la renovación y subterranización de todas las redes de servicios públicos (alcantarillado, acueducto, energía, telefonía y datos), y por ende la construcción nuevamente de la estructura de pavimento, para todo un barrio que colinda con el puente.

Del caso de estudio se seleccionaron las actividades que se consideraron como más relevantes para este tipo de proyectos, pero respetando la lógica de precedencias y restricciones que regían el programa de obra original para la elaboración del modelo de Duración, tomando como decisión incluir aquellas actividades que a pesar de su baja participación en el costo total se encontraban en la ruta crítica de la programación original y por ende tenían relevancia para los modelos a desarrollar. El costo total de las 27 actividades consideradas representa un 85.8% del costo total del caso de estudio y su descripción se hace en la *Tabla 1*.

Actividad	Unidad	Descripción
Anden en loseta prefabricada	m ²	Instalación de loseta cuadrada prefabricada en concreto con sello de arena.
Baranda metálica	ml	Instalación de baranda en acero ASTM-36, incluye anticorrosivo y pintura.
Bárrete para estribo y columna	m ³	Excavación y fundición de cimentación profunda tipo bárrete con concreto Tremie 21 MPa, incluye bentonita y descabece posterior.
Base granular	m ³	Disposición y compactación de base granular para pavimento.
Cámara de inspección alcantarillado	Und.	Construcción de cámara de inspección bajo pavimento. Tipo B, según normal local EMCALI.
Canalización de tubería 2x3"	ml	Excavación e instalación de doble tubería de 3" para red eléctrica.
Columna en concreto	m ³	Fundición de columna en concreto reforzado 28 MPa.
Conformación subrasante	m ²	Escarificación, conformación y compactación de la superficie de subrasante.
Cordón en concreto	ml	Cordón en concreto reforzado 18 MPa para confinamiento de anden.
Demolición de carpeta asfáltica	m ²	Demolición de la carpeta asfáltica de la estructura del pavimento existente, incluye retiro de escombros.
Demolición de anden	m ²	Corte y demolición de andén existente, incluye retiro de escombros.

Estribos en concreto	m ³	Armado de acero de refuerzo y fundición de estribos en concreto reforzado de 28 MPa para puente.
Excavación a maquina	m ³	Excavación a máquina, incluye retiro del material.
Flecha en pintura termoplástica	m ²	Señalización horizontal para vías en pintura termoplástica.
Geotextil	m ²	Instalación de geotextil T-2400 para vías.
Línea en pintura termoplástica	ml	Señalización horizontal para vías en pintura termoplástica.
Losa de pavimento MR=42	m ³	Fundición de losa en concreto reforzado MR=42 MPa, incluye corte de juntas y sellado.
Losa (tablero) de puente	m ³	Fundición de losa maciza en concreto reforzado 28 MPa para tablero del puente, incluye junta de expansión.
Muro Keystone	m ²	Instalación de bloques prefabricados tipo keystone y geo malla dentro de terraplén.
New Jersey in-situ	m ³	Fundición de separador tipo New Jersey en concreto reforzado 28 MPa.
Relleno en roca muerta	m ³	Disposición y compactación de suelo importado tipo roca muerta.
Sardinél	ml	Fundición de sardinél en concreto reforzado 21 MPa.
Tubería concreto ref. de 1000 mm	ml	Instalación de tubería de concreto reforzado de diámetro = 1000 mm, incluye colchón de grava y relleno con suelo seleccionado de obra.
Viga en acero	kg	Suministro e izamiento de vigas en acero corten, incluye pintura y topes sísmicos en apoyos.
Viga en concreto	m ³	Fundición de viga aérea en concreto reforzado 28 MPa.
Viga de cimentación	m ³	Fundición de viga de cimentación en concreto reforzado 21 MPa.
Zapata para estribo y columna	m ³	Fundición de zapata en concreto reforzado 21 MPa

Tabla 1: Actividades que componen el análisis.

3.2. BASE DE DATOS

Para poder comparar críticamente el comportamiento de la ejecución en obra del caso de estudio, se necesitó, como base de los modelos, un conjunto de información que permitiera conocer resultados de experiencias pasadas en proyectos de características similares. Los datos obtenidos del caso de estudio sirvieron para generar el entorno determinístico, el cual

se encarga de recrear el desempeño que tuvo en la realidad la ejecución del proyecto caso de estudio; y al agrupar dicha información con la recolectada de los demás proyectos, se crearon las distribuciones de probabilidad que sirvieron como base de partida para crear el contexto estocástico.

3.2.1. RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN HISTÓRICA

Quizás uno de los aspectos que más tiempo requirió dentro de lo realizado en este trabajo fue la obtención de registros históricos de obras para la creación de la base de datos. Primero se intentó obtener la información a través de las dependencias estatales contratantes, pero la falta de un sistema de organización de información hizo imposible la obtención de la información por dicho medio. Después se procedió solicitar a múltiples empresas privadas locales dedicadas a la construcción, recibiendo una respuesta negativa en todos los casos por el recelo que las empresas tienen con esa información que muestra en cierta forma su desempeño. Cuando se había decidido utilizar distribuciones triangulares como plan de contingencia para reemplazar dicha información histórica ante la imposibilidad de tener acceso a ella, el autor logro obtener una respuesta positiva de una empresa de la ciudad con más de 15 años de experiencia.

En cierta forma, haber obtenido toda la información de una misma fuente implica que las variaciones registradas para los dos tipos de datos objetivo se deben más al cambio de condiciones en su ejecución que a la diferencia de cultura organizacional que caracteriza a cada empresa, aun cuando la empresa haya experimentado cambios internos con el transcurso del tiempo una variación en sus procesos no sería tan drástica como la que se esperaría al comparar desempeños de diferentes empresas. También signifíco que distintos documentos y archivos obtenidos estaban organizados en general bajo un mismo formato, lo que facilito en gran medida el entendimiento de dicha información y su posterior utilización.

Un compromiso que el autor acordó con la persona de dicha empresa que facilito el acceso a la información fue el principio de confidencialidad, por lo que el nombre de la empresa y el de los proyectos que hicieron parte del registro histórico no será revelado. En total fueron 19 proyectos los que conformaron el registro de información, que se dividieron principalmente en dos grupos: 15 proyectos relacionados con infraestructura vial y espacio público, y cinco proyectos relacionados con estructuras en concreto reforzado que sirvieron para complementar la información relacionada con la estructura del puente. Todos los proyectos fueron ejecutados en el departamento del Valle del Cauca.

Pese a lo anterior, para tres actividades no se logró obtener información histórica ya que se tratan de procesos constructivos poco comunes en los que la empresa facilitadora de la información no tenía antecedentes registrados. Un ejemplo de ello es la actividad *Muro Keystone*, que representa la instalación de los bloques prefabricados con dicho nombre, la extensión de la geo-malla que refuerza el terreno y el vaciado de la capa de grava sobre los bloques; toda vez que este proceso constructivo solo ha sido empleado en cinco proyectos en los últimos diez años en la ciudad de Cali.

Los medios para obtener la información de los distintos proyectos fueron principalmente las bitácoras de obra, que llevaban el registro diario del ingeniero residente del proyecto y permitían verificar los rendimientos de ejecución; las programaciones de obra en archivos de MS Project, con las cuales se estableció de qué manera estaban divididas las actividades y sirvió de respaldo para la revisión de los rendimientos; y las actas de cobro hacia la dependencia estatal contratante, donde se pudo establecer los distintos precios unitarios.

3.2.2. TRATAMIENTO DE DATOS

Dado que algunas actividades que en la programación de obra eran una sola actividad, pero en el presupuesto estaban divididas en varios ítems, se realizó un re-agrupamiento tomando como unidad de medida final la que perteneciera a la actividad más general y que estaba claramente establecida en la programación de obra. Para establecer el precio unitario de la unidad de medida general, se llamará la actividad general correspondiente como el ítem mayor, y las demás actividades relacionadas a esta como los ítems menores; así a partir de la relación de cantidades unitarias que hay entre el ítem mayor y sus ítems menores se calculó el precio unitario general que llevaría la actividad. El proceso que se utilizó para los datos obtenidos del caso de estudio, y después para los demás proyectos considerados, se muestra a continuación.

Se toma como ejemplo la actividad *Losa de pavimento MR=42*, que representa la losa en concreto hidráulico utilizada para la estructura del pavimento en todo el proyecto. Dicha losa estaba representada en la programación original como una sola actividad, pero en el presupuesto estaba dividida en dos ítems:

Ítem mayor: *Losa de pavimento MR=42 (m3)*; su análisis de precio unitario –APU- incluye el concreto premezclado de MR=42 MPa, la formaleta, la mano de obra, la canastilla, el anti sol, la regla vibratoria, la cortadora de pavimento, el sellante para la junta y el rastrillo de acabado superficial. Su precio unitario es

$$P/U = \$571,576.$$

Ítem menor: *Acero de refuerzo 420 MPa (kg)*; su análisis de precio unitario –APU- incluye el acero corrugado, el alambre dulce, segueta y mano de obra. Su precio unitario es

$$P/U = \$3,312.$$

Dado que el diseño utilizado para la losa en todo el proyecto fue el mismo, el valor de unidades que hay del ítem menor dentro de una unidad del ítem mayor representa su relación de cantidades unitarias y se obtiene en este caso de las cantidades totales ejecutadas. La cantidad total ejecutada del ítem mayor fue de 5,186.6 m³, y la cantidad total ejecutada del ítem menor utilizado fue 38,955 kg.

$$\frac{Item\ menor}{Item\ mayor} = \frac{38,955\ kg}{5,186.6\ m^3} = 7.51\ kg/m^3$$

Sabiendo cuantas unidades del ítem menor hay en una unidad del ítem mayor, se puede saber el incremento que tiene el precio unitario del ítem mayor por incluir dichas unidades del ítem menor, esto al multiplicar la relación hallada por el costo unitario del ítem menor

$$(C/U)_{Total} = \$571,579 + (7.51\ kg * \$3,312) = \$571,579 + \$24,873 = \$596,452$$

Así, el costo unitario de la actividad *Losa de pavimento MR=42* es de \$596,452. Donde \$571,576 corresponde al precio unitario del ítem mayor y \$24,873 corresponde a los 7.51 unidades del ítem menor que están incluidas en una unidad del ítem mayor.

Debido a que los proyectos fuente de la información se ejecutaron en años anteriores al 2016, tiempo en que fue ejecutado el caso de estudio, los precios unitarios obtenidos siguiendo el proceso anterior debieron ser actualizados a su valor monetario correspondiente al año 2016. Lo anterior se logró por medio del Índice de Costos de la Construcción Pesada –ICCP- que suministra el DANE de manera mensual y anual, índice que permite establecer la evolución de los costos de las actividades de proyectos de construcción de vías y puentes en un determinado periodo de tiempo; de la misma manera que el Índice de Precios del Consumidor –IPC- permite establecer la evolución del costo de los productos de la canasta familiar. Una vez llevados todos los precios unitarios a su valor real al año 2016, junto con los valores de rendimiento de ejecución obtenidos, se realizó un análisis de la dispersión para cada conjunto de datos que conformaban las variables de entrada; para ello se identificaron los valores atípicos mediante el diagrama de caja y bigotes, y su nivel de atipicidad según el rango intercuartil: leve, moderado o extremo.

3.2.3. ASIGNACIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD

Debido a que no se logró obtener un número representativo de datos para las variables de entrada (rendimiento, precio unitario) de todas las actividades, estas se categorizaron según el número de datos disponibles que tuviera cada variable después de haber sido tratados. Hay que aclarar que, debido a que hubo un grupo de actividades a las cuales no se logró encontrar datos históricos para proveer al contexto estocástico de los modelos, se optó por incluir los datos obtenidos del caso de estudio en la asignación y generación de las distribuciones de probabilidad, pues dichas actividades son muy relevantes en proyectos de características similares al caso de estudio.

Así, se crearon cuatro categorías según la cantidad de datos y se definió un procedimiento para cada una:

1. Diez o más datos: no se consideran como válidos los datos que clasificaran como Atípico Extremo. Por medio de la herramienta de Ajuste de Probabilidad con la que cuenta el programa @Risk se eligió la función de distribución de probabilidad que mejor puntaje tuviera según el Criterio de Información Akaike (Akaike Information Criterion –AIC-).

Se ejemplifica el procedimiento anterior con el caso del ajuste de distribución de probabilidad para el rendimiento de ejecución de la actividad *Losa de pavimento MR=42*. Después de haber establecido que ningún dato de los recolectados fuera considerado un valor atípico extremo, se clasificó mediante el AIC las funciones de probabilidad al conjunto de datos para establecer cual tuvo mejor puntaje. En la *Ilustración 8* se observa como la función Valor Extremo -ExtValue- fue la que mejor se ajusta al comportamiento del grupo de datos recolectados sobre las funciones Normal y Logistic, y por ende será la función a utilizar; su aplicación se muestra en la *Ilustración 9*.

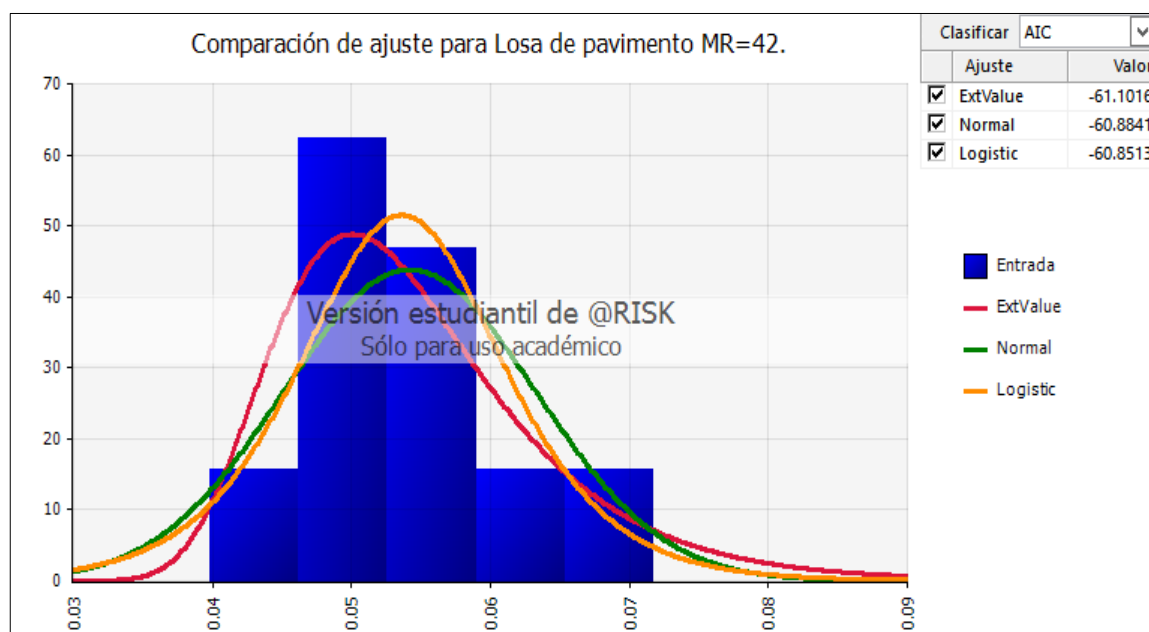


Ilustración 8: Clasificación de funciones de probabilidad según AIC. Fuente: El autor.

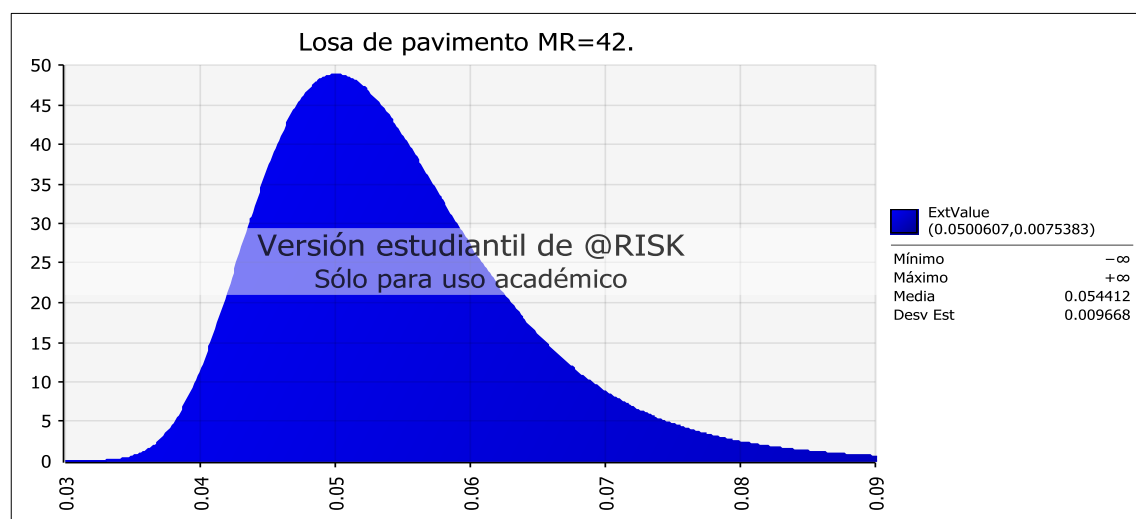


Ilustración 9: Función de distribución de probabilidad Valor Extremo para rendimiento de la actividad. Fuente: El autor.

2. Entre seis y diez datos: no se consideran como válidos los datos que clasificaran como Atípico Extremo según el tratamiento de datos en 3.2.2. y se utilizó la función distribución de probabilidad triangular según lo argumentado en 2.2.4.1, donde se indica como la función triangular puede suplir las necesidades de otras funciones y ser congruente con las condiciones de un proyecto de construcción.

3. Menos de seis datos: si se consideran como válidos los datos que clasificaran como Atípico Extremo según el tratamiento de datos en 3.2.2. debido a que la insuficiencia de muestras no permite tener certeza que dichos valores catalogados como Atípico Extremo en realidad correspondan a esa condición, pues puede que si hubiera una muestra más amplia su análisis de dispersión no los clasifique de tal manera. Se utilizó la función distribución de probabilidad triangular según lo argumentado en 2.2.4.1, donde se indica como la función triangular puede suplir las necesidades de otras funciones y ser congruente con las condiciones de un proyecto de construcción.
4. Solo un dato (obtenido del caso de estudio): se utilizó la función de distribución de probabilidad triangular en función de tres valores: mínimo, más probable y máximo. El valor existente del caso de estudio fue asignado como el más probable, esto en base que la lectura de la bitácora de obra permitió inferir que las tres actividades que corresponden a esta categoría tuvieron un desarrollo normal en su ejecución y por ende su valor no puede ser catalogado como un valor extremo de la distribución. Respecto a este valor, en el caso del precio unitario, se realizó una variación inferior y superior del 10% para obtener los valores mínimo y máximo. Para el rendimiento en su ejecución, se hizo una variación inferior del 10% y superior del 15%, con el fin de recrear el sesgo positivo esperado en el entorno de un proyecto de construcción, según lo expuesto en 2.2.4.1, pero sin generar una sobre asignación de probabilidades a eventos muy poco probables si se asignara un mayor porcentaje de variación superior.

3.3. MODELO DE DURACIÓN

El modelo se realizó tomando como base la programación de obra original creada para el caso de estudio y que fue parte de la información suministrada por la empresa, con la cual se realizó el seguimiento real del proyecto en su ejecución. Como se mencionó previamente, el caso de estudio comprendía otras actividades que no se tuvieron en cuenta para la realización de los modelos, por lo que fue necesario realizar algunas modificaciones a la programación obtenida, aunque sin alterar el sistema de precedencias y restricciones establecido, tomando como referencia también la bitácora de obra para verificar la secuencia de los trabajos y procesos constructivos. La programación de obra fue realizada bajo los lineamientos del Método de la Ruta Crítica (CPM), con el fin de establecer cuál fue la ruta crítica y cuales actividades hacen parte de ella.

Este programa conto con 53 actividades repartidas en los siguientes seis frentes de trabajo: *Vía de aproche -VA, Rampas de aproche -RA, Estructura puente -EP, Rotonda y desvíos -*

RD, Vía transversal -VT y Andén –AN; a excepción de las actividades *Demolición de carpeta asfáltica, Flecha en pintura termoplástica y Línea en pintura termoplástica* que eran predecesoras o sucesoras de varios frentes de trabajo. De las 27 actividades consideradas del caso de estudio, 18 se dividen en sub-actividades presentes en varios frentes de trabajo y las nueve restantes solo se encuentran en un frente de trabajo. Por ejemplo, la actividad *Losa de pavimento MR=42* está presente en cuatro de los seis frentes de trabajo, creando seis sub-actividades, mientras que la actividad *Muro keystone* está presente únicamente en el frente de trabajo *Rampa de aproche –RA*. Debido a esta división de algunas actividades en sub-actividades, se vio necesario la asignación de las iniciales de cada frente de trabajo (ej: *Losa de pavimento MR=42 –VA*) al final de algunas de las sub-actividades para una más fácil identificación.

3.3.1. CONTEXTO DETERMINÍSTICO

Para obtener la duración de cada sub-actividad en los distintos frentes de obra, se multiplico el rendimiento obtenido del caso de estudio por la cantidad ejecutada en cada sub-actividad, como se muestra en la *Tabla 2* para el ejemplo de la actividad *Losa de pavimento MR=42*. La suma de estas cantidades es igual al valor final ejecutado para la actividad *Losa de pavimento MR=42* en el proyecto caso de estudio.

SUB-ACTIVIDAD	RENDIMIENTO (día/m ³)	CANTIDAD (m ³)	DURACIÓN (días)
Losa de pavimento MR=42 –VA	0.05165	1086.1 m ³	56.1
Losa de pavimento MR=42 –RA		935.1 m ³	48.3
Losa de pavimento MR=42 –RD		1033.8 m ³	53.4
Losa de pavimento MR=42 –VT		2,131.5 m ³	110.1

Tabla 2: Obtención de duración para sub-actividades.

El programa de obra resultante de este proceso se muestra en la *Ilustración 10*, siendo las actividades de color rojo aquellas que están dentro de la ruta crítica para el contexto determinístico. La duración total obtenida fue de 451 días.

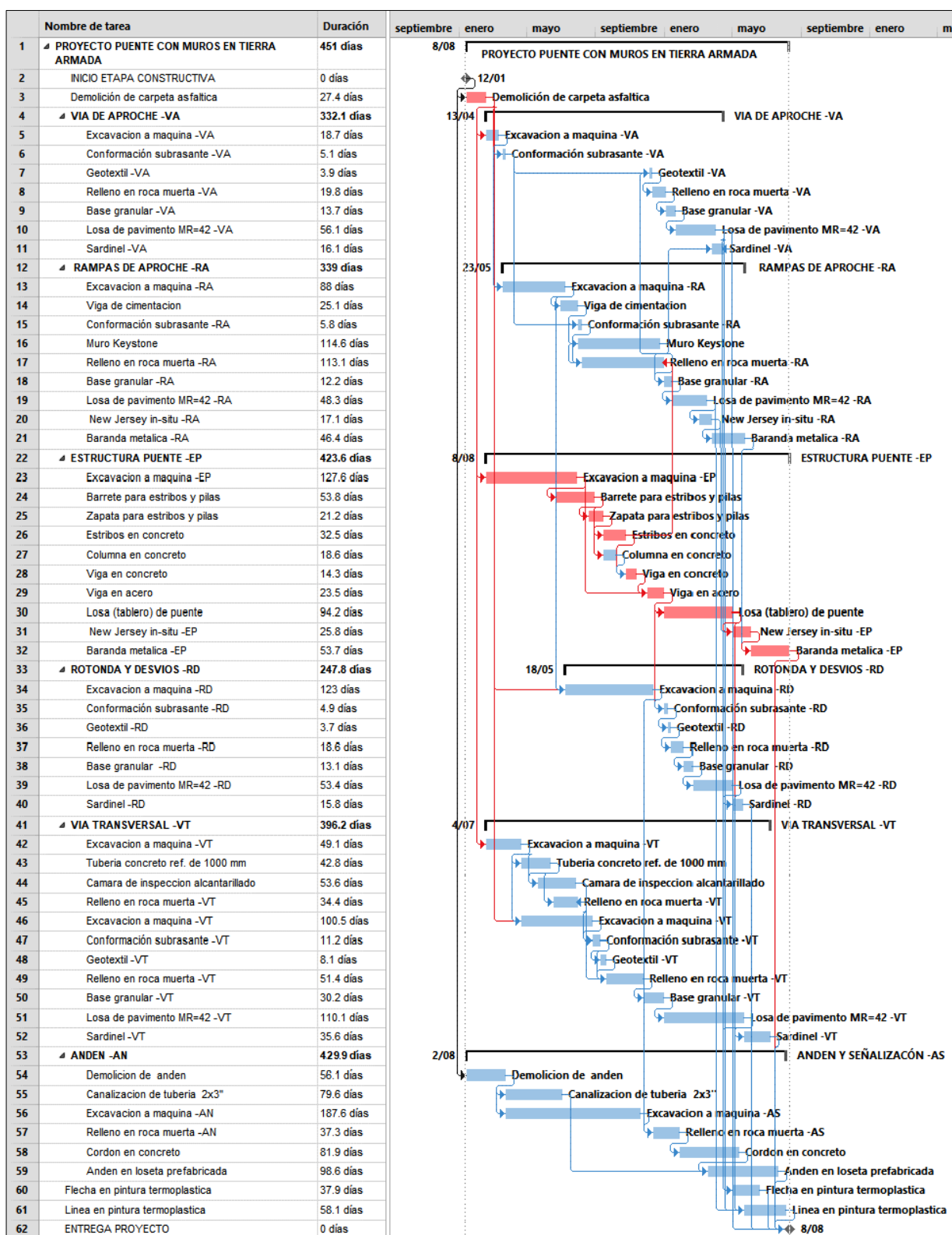


Ilustración 10: Programa de obra bajo un entorno determinístico. Fuente: El autor.

3.3.2. CONTEXTO ESTOCÁSTICO

Para introducir la incertidumbre al modelo de Duración ya establecido, se importó el programa de obra a una hoja de MS Excel mediante el complemento de @Risk para MS Project, que permite interactuar con el programa de obra en tiempo real en cada iteración y así obtener un valor diferente para la duración total. Con las funciones de distribución de probabilidad obtenidas para los rendimientos de cada actividad, según el procedimiento explicado en 3.2.3, se obtuvo la duración para cada actividad, o sub-actividad, asignando la función de distribución de rendimiento en la celda de la duración del programa y multiplicando por la cantidad ejecutada en dicha actividad de manera similar a lo mostrado en la *Tabla 2*. Se muestra a continuación el resultado de asignar la distribución de probabilidad a la actividad *Losa de pavimento MR=42* en sus cuatro sub-actividades que la representan en el programa de obra, siendo el resultado análogo del contexto determinístico hallado en la *Tabla 2*.

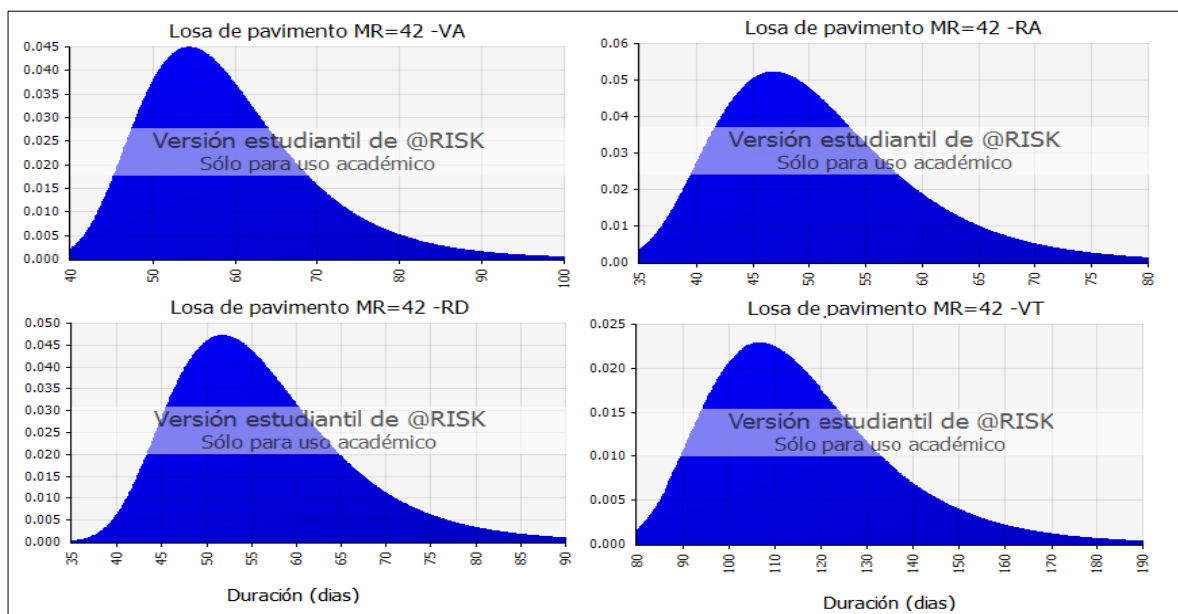


Ilustración 11: Distribución de probabilidad asignada para la duración de actividades.
Fuente: El autor.

En este caso se definieron como variables de salida la duración total del proyecto y la duración de cada frente de trabajo con el fin de poder realizar un análisis de los componentes generales del proyecto.

La simulación del modelo se realizó con 10,000 iteraciones y el modelo se muestra en la *Ilustración 12*, donde las actividades en color azul son las variables de entrada y en rojo las variables de salida del sistema, siendo la Duración Total el valor obtenido para la actividad resumen PROYECTO PUENTE CON MUROS EN TIERRA ARMADA y las demás la duración de cada uno de los seis frentes de trabajo.

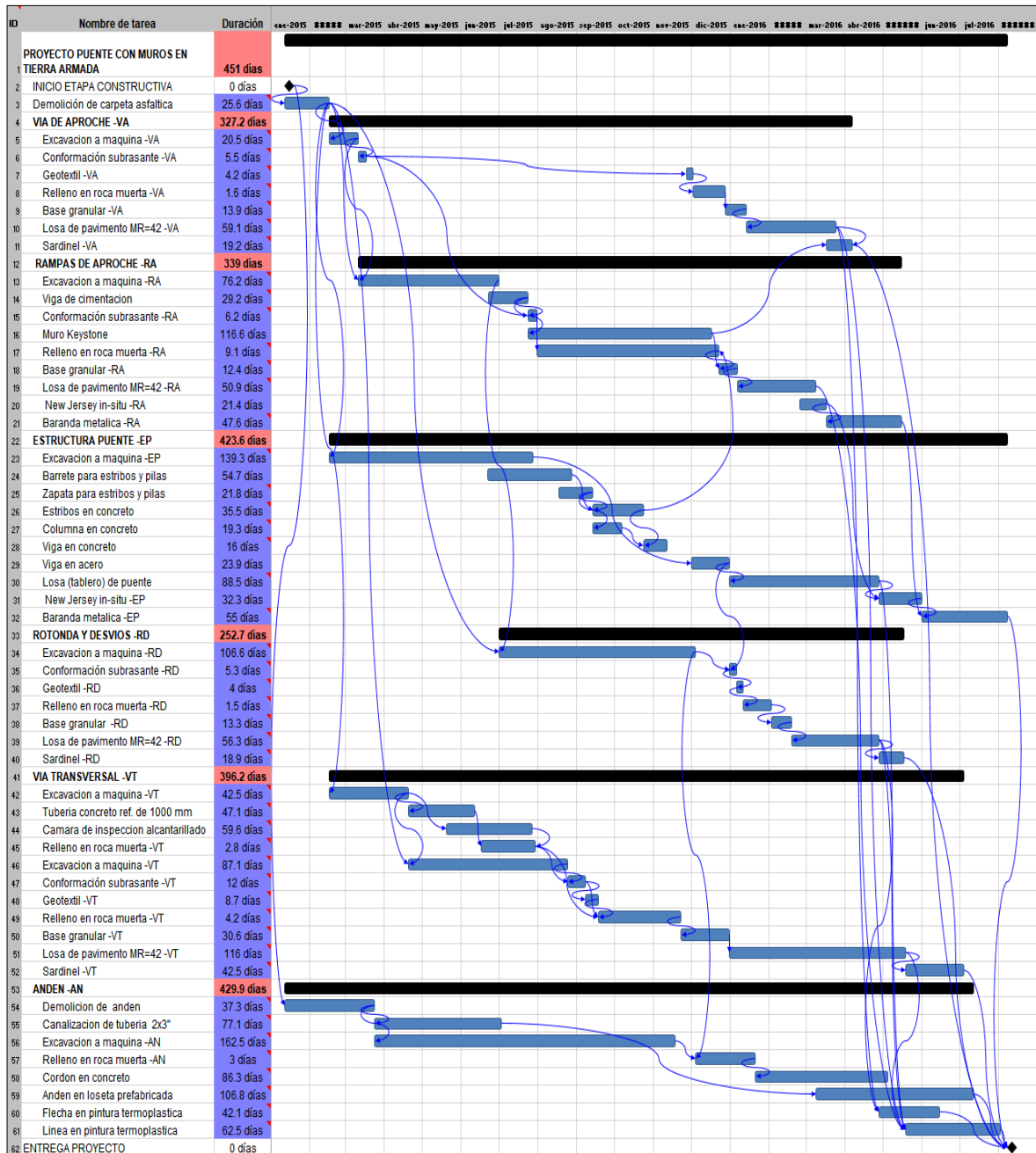


Ilustración 12: Modelo de Duración con @Risk. Fuente: El autor.

3.4. MODELO DE COSTO DIRECTO

El modelo se creó a partir de las cantidades totales que se ejecutaron para las actividades consideradas del caso de estudio, obtenidas por medio del acta de liquidación del proyecto. Por ejemplo, en el caso de la actividad *Losa de pavimento MR=42*, la cantidad total corresponde a la suma de las cantidades de las cuatro sub-actividades que la componen, como se mostró en el proceso del modelo de Duración, siendo la cantidad final ejecutada 5,186.6 m³. La obtención de los precios unitarios con los cuales se configuro el modelo en los dos contextos, fue realizada mediante el procedimiento descrito en 3.2.2., reagrupando los distintos ítems del presupuesto en una sola actividad.

3.4.1. CONTEXTO DETERMINÍSTICO

Como el contexto determinístico se contempló como una manera de reflejar el comportamiento real del proyecto caso de estudio en su ejecución, se utilizaron los precios unitarios establecidos por la empresa ejecutora del proyecto, cuya suma resulto en el costo directo que la entidad estatal pago a la empresa por la ejecución de los trabajos. Para el caso de la actividad *Losa de pavimento MR=42* el precio unitario fue de \$596,453, que al multiplicarse por la cantidad ejecutada en dicha actividad (5,186.6 m³) da un costo de \$3,093,548,649; como se muestra en la fila 18 de la ***Ilustración 13***. El costo directo total del proyecto bajo el contexto determinístico fue de \$16,158,201,942.

	A	B	C	D	E
1	ACTIVIDAD	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO
2	Anden en loseta prefabricada	M2	9,527.3	\$ 63,761	\$ 607,470,813
3	Baranda metalica	ML	1,023.4	\$ 521,272	\$ 533,469,841
4	Barrete para estribo y columna	M3	479.3	\$ 1,447,347	\$ 693,684,470
5	Base granular	M3	6,670.3	\$ 78,923	\$ 526,437,640
6	Camara de inspeccion alcantarillado	UND	43.0	\$ 2,638,263	\$ 113,445,309
7	Canalizacion de tuberia 2x3"	ML	1,136.4	\$ 55,225	\$ 62,757,690
8	Columna en concreto	M3	29.8	\$ 3,919,379	\$ 116,640,719
9	Conformación subrasante	M2	25,967.9	\$ 2,970	\$ 77,124,672
10	Cordon en concreto	ML	5,734.5	\$ 47,163	\$ 270,456,916
11	Demolición de carpeta asfaltica	M2	1,456.9	\$ 4,085	\$ 5,951,600
12	Demolición de andén	M2	1,423.7	\$ 11,723	\$ 16,690,035
13	Estribos en concreto	M3	308.1	\$ 1,229,239	\$ 378,728,536
14	Excavacion a maquina	M3	108,551.7	\$ 25,525	\$ 2,770,781,122
15	Flecha en pintura termoplastica	M2	1,295.5	\$ 30,621	\$ 39,670,057
16	Geotextil	M2	24,253.1	\$ 3,875	\$ 93,980,840
17	Linea en pintura termoplastica	ML	9,147.7	\$ 1,460	\$ 13,355,642
18	Losa de pavimento MR=42	M3	5,186.6	\$ 596,453	\$ 3,093,548,649
19	Losa (tablero) de puente	M3	601.4	\$ 1,654,968	\$ 995,324,235
20	Muro Keystone	M2	2,016.1	\$ 565,941	\$ 1,140,982,331
21	New Jersey in-situ	M3	473.6	\$ 1,020,706	\$ 483,355,326
22	Relleno en roca muerta	M3	31,561.9	\$ 33,440	\$ 1,055,428,264
23	Sardinell	ML	3,155.0	\$ 41,173	\$ 129,901,072
24	Tuberia concreto ref. de 1000 mm	ML	276.0	\$ 731,611	\$ 201,924,636
25	Viga en acero	KG	240,909.9	\$ 6,225	\$ 1,499,664,128
26	Viga en concreto	M3	467.8	\$ 1,593,634	\$ 745,450,989
27	Viga de cimentacion	M3	349.9	\$ 1,068,122	\$ 373,714,491
28	Zapata para estribo y columna	M3	96.0	\$ 1,231,895	\$ 118,261,920
29		COSTO DIRECTO			\$ 16,158,201,942

Ilustración 13: Modelo de costos directos, contexto determinístico. Fuente: El autor.

3.4.2. CONTEXTO ESTOCÁSTICO

La inclusión de la incertidumbre en este modelo se logró por medio de las distribuciones de probabilidad asignadas para los costos unitarios. En este caso no fue necesario crear una distribución aparte para los valores que se generan en la columna Costo porque el modelo permite interactuar directamente con el precio unitario, a diferencia del modelo para la Duración que requería obtener los valores en duración para cada actividad directamente desde una distribución de probabilidad propia. Para el caso de la actividad *Losa de pavimento MR=42* se contaron con diez registros históricos obtenidos, y siendo la función logarítmica la que mejor se ajustó al comportamiento como lo muestra la *Ilustración 14*.

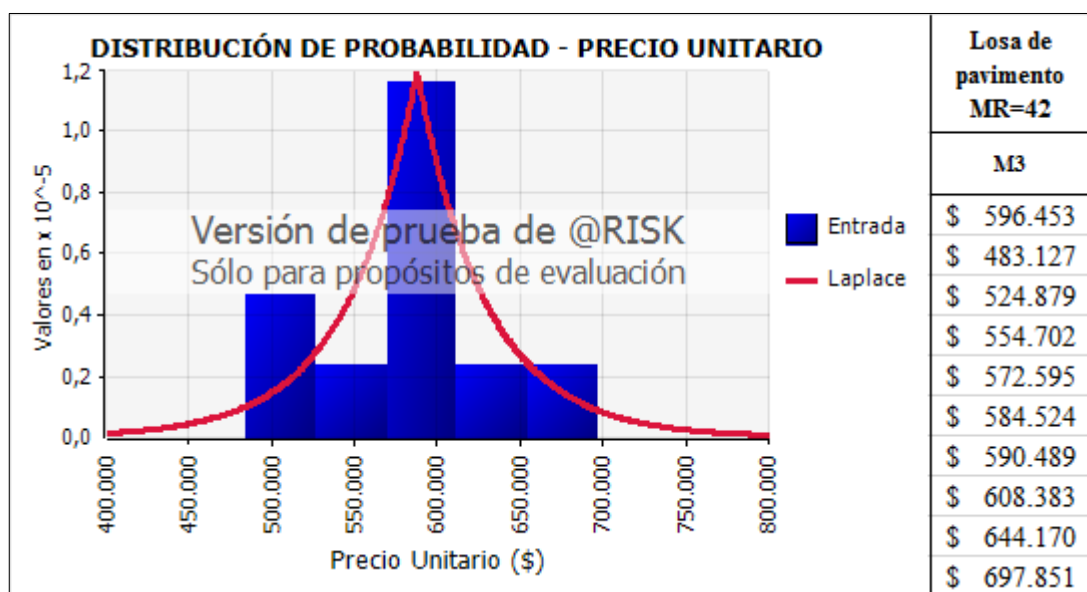


Ilustración 14: Distribución de probabilidad, entrada modelo de Costo Directo. Fuente: El autor.

Así, cada actividad tuvo un precio unitario representado por una distribución de probabilidad que en cada iteración genere un precio diferente. El sistema utilizado fue el mismo mostrado en la *Ilustración 13*, donde las 27 variables de entrada son los precios unitarios de color azul, y la variable de salida, en color rojo, corresponde al Costo Directo. La simulación contó con 10,000 iteraciones.

3.5. MODELO DE COSTO TOTAL

Este modelo toma a consideración que el costo total de un proyecto está estrechamente relacionado con los costos administrativos en los que tiene que incurrir la empresa para poder ejecutar el proyecto, como el salario del personal involucrado en el proyecto, los costos de operación del campamento de obra, viáticos de movilidad, ensayos a muestras requeridos o asesorías particulares, entre otros. Como es de esperarse, estos costos dependen del tiempo en que se ejecute el proyecto, toda vez que a mayor tiempo de ejecución se requiere una mayor permanencia y operación de todo el equipo de trabajo, consideración que muestra la correlación que hay entre los variables tiempo y costo, que no se contempló en los dos modelos anteriores.

Para obtener el valor del costo administrativo total, que representa la suma de los costos administrativos durante toda la duración del proyecto, se tomó como base la información aportada por la empresa en donde se especifican los gastos mensuales que se tenían, igual a \$96,734,246.66, y se convirtió en un valor de costo administrativo diario de \$3,224,474.89 para tener un seguimiento más detallado de su evolución; valor que al relacionarse con la Duración Total obtenida en el modelo de Duración muestra el valor total del gasto administrativo. La adición del Costo Administrativo con el Costo Directo da como resultado el Costo Total. Si bien para el contratante el costo total del proyecto también incluye los Impuestos y la Utilidad del contratista, estos dos elementos pueden ser representados más fácilmente por un porcentaje del costo directo, mientras que el porcentaje que podría representar el costo administrativo puede variar en mayor medida dependiendo si el proyecto cuenta con elementos de alta tecnología que hacen que los costos directos sean muy altos, o si es un proyecto de larga duración pero de poca demanda de profesionales.

3.5.1. CONTEXTO DETERMINÍSTICO

Como el modelo de programación en su contexto determinístico dio como resultado una Duración Total de 451 días, este valor fue multiplicado por el costo administrativo diario para obtener un Costo Administrativo de \$1,454,238,175. Al adicionar dicho costo con el obtenido del modelo de Costo Directo en su contexto determinístico, se obtuvo como Costo Total un valor de \$17,612,440,116. La *Ilustración 15* muestra una parte de las actividades ya mostradas para el modelo de Costo Directo, y en la parte inferior muestra los valores de la Duración Total, el Costo Administrativo y el Costo Total.

13	↑ CONTINUAN LAS DEMAS ACTIVIDADES DEL MODELO PARA COSTO DIRECTO ↑				
14	Estribos en concreto	M3	308.1	\$ 1,229,239	\$ 378,728,536
15	Excavacion a maquina	M3	108,551.7	\$ 25,525	\$ 2,770,781,122
16	Flecha en pintura termoplastica	M2	1,295.5	\$ 30,621	\$ 39,670,057
17	Geotextil	M2	24,253.1	\$ 3,875	\$ 93,980,840
18	Linea en pintura termoplastica	ML	9,147.7	\$ 1,460	\$ 13,355,642
19	Losa de pavimento MR=42	M3	5,186.6	\$ 596,453	\$ 3,093,548,649
20	Losa (tablero) de puente	M3	601.4	\$ 1,654,968	\$ 995,324,235
21	Muro Keystone	M2	2,016.1	\$ 565,941	\$ 1,140,982,331
22	New Jersey in-situ	M3	473.6	\$ 1,020,706	\$ 483,355,326
23	Relleno en roca muerta	M3	31,561.9	\$ 33,440	\$ 1,055,428,264
24	Sardinell	ML	3,155.0	\$ 41,173	\$ 129,901,072
25	Tuberia concreto ref. de 1000 mm	ML	276.0	\$ 731,611	\$ 201,924,636
26	Viga en acero	KG	240,909.9	\$ 6,225	\$ 1,499,664,128
27	Viga en concreto	M3	467.8	\$ 1,593,634	\$ 745,450,989
28	Viga de cimentacion	M3	349.9	\$ 1,068,122	\$ 373,714,491
29	Zapata para estribo y columna	M3	96.0	\$ 1,231,895	\$ 118,261,920
30	COSTO DIRECTO				\$ 16,158,201,942
31					
32	ADMINISTRACIÓN:	DURACIÓN	COSTO ADMIN.	COSTO	
33		TOTAL	DIARIO	ADMINISTRATIVO	
33		451	\$ 3,224,474.89	\$ 1,454,238,175	
34	COSTO TOTAL				\$ 17,612,440,116

Ilustración 15: Modelo de costo total, contexto determinístico. Fuente: El autor.

3.5.2. CONTEXTO ESTOCÁSTICO

Debido a la imposibilidad de vincular los modelos de Duración y Costo de manera directa en el programa @Risk, se tuvo que crear una distribución de probabilidad a partir del resultado obtenido en la Duración Total, siendo la función Pearson la que mejor se ajustaba al comportamiento de los datos obtenidos como se muestra en la *Ilustración 16*. Habiendo creado esta nueva variable de entrada, la simulación funciono con un sistema de 28 variables de entrada (27 precios unitarios) de color azul y el Costo Total, de color rojo, como única variable de salida, como se mostró en la *Ilustración 15*. Para este modelo la simulación fue desarrollada con 15,000 iteraciones para reducir el margen de error aportado por la variable de entrada de Duración Total.

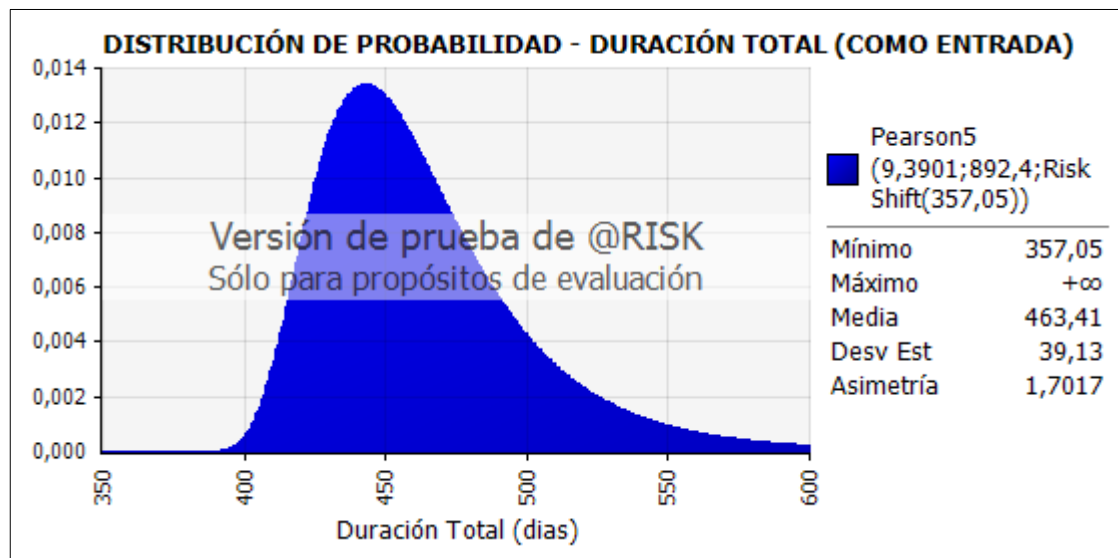


Ilustración 16: Duración Total ajustada a la función Pearson. Fuente: El autor.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. DURACIÓN

Una vez realizada la simulación del modelo de Duración descrito en 3.3, se obtuvieron los siguientes resultados del comportamiento global del proyecto. La Duración Total del modelo bajo un contexto determinístico corresponde a 451 días, dictada por la ruta crítica compuesta por diez actividades que inicia en la actividad *Demolición de carpeta asfáltica* y prosigue por el frente de trabajo de *Estructura puente –EP* en donde su última actividad finaliza la ruta crítica.

La *Ilustración 17* muestra el histograma de densidad de probabilidad de la duración total del proyecto para el contexto estocástico, donde el valor mínimo posible es 390.7 días y el valor máximo es 926.3 días. La media corresponde a 463.4 con una probabilidad de ocurrencia del 59.5% y la mediana tiene un valor de 455.6 días, mostrando también una marcada asimetría o sesgo positivo.

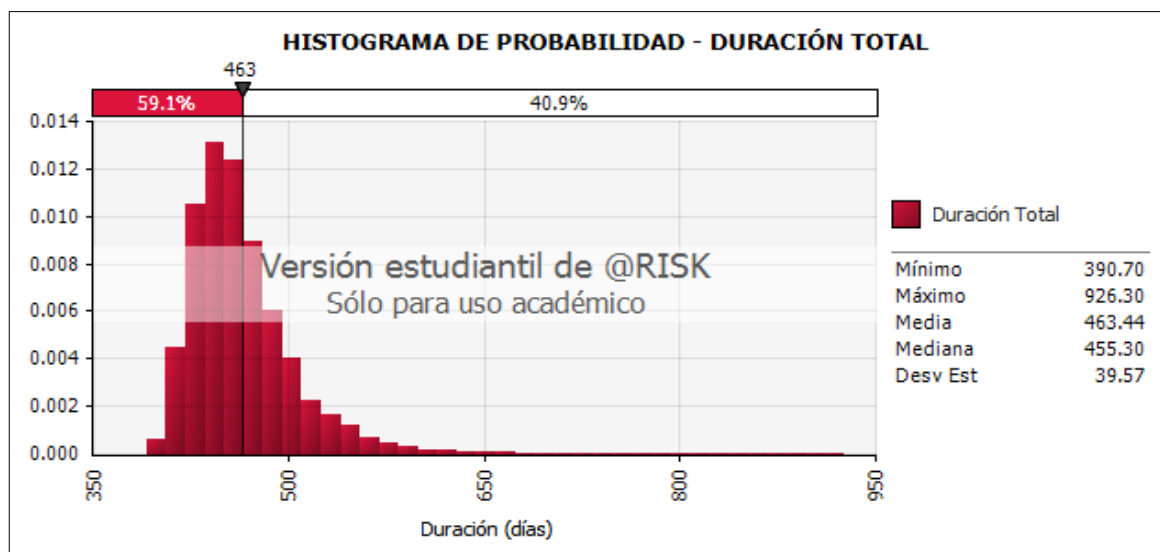


Ilustración 17: Histograma de probabilidad para la Duración Total del modelo. Fuente: El autor.

Dado que la duración total del proyecto ejecutado según parámetros determinísticos, con 451 días, tiene una probabilidad de ocurrencia del 44.2%; se podría inferir que este se pudo ejecutar con una efectividad algo superior respecto a los demás proyectos considerados para el análisis y conto con un nivel medio-alto de riesgo. Un análisis de literatura permitió establecer que un valor de probabilidad acumulada comúnmente usado como contingencia para las reservas de los proyectos es del 80% (Touran; Bakhshi. 2015), que en este caso es equivalente a una duración 488.9 días. Al comparar dicho valor de contingencia con el desempeño del modelo determinístico se obtiene una diferencia de probabilidades de 35.8% ($80\% - 44.2\% = 35.8\%$), que representa un incremento del 8.4% en el valor total de días para la duración determinístico obtenida. Lo anterior se puede observar en la *Ilustración 18*, donde se muestra la probabilidad acumulada para las distintas duraciones posibles.

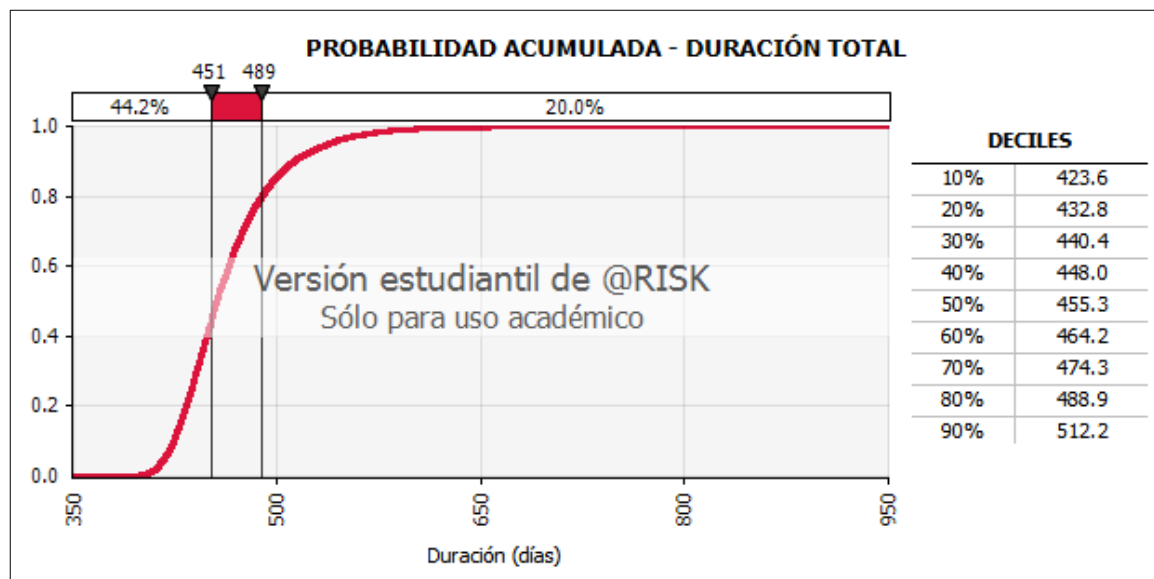


Ilustración 18: Diagrama de probabilidad acumulada para la Duración Total del modelo.
Fuente: El autor.

Dado que la variación de la duración total del proyecto refleja la variación de las actividades que lo componen, habrá un grupo de actividades que dada la naturaleza de su varianza afecten en mayor medida el resultado global. El análisis de sensibilidad por medio del diagrama de tornado en la *Ilustración 19* muestra cuales fueron las diez actividades que influyeron en mayor medida en la variación de la Duración Total a partir de duración media (indicada como “Línea de base”), mostrando hacia la izquierda o la derecha el valor mínimo o máximo, respectivamente, al que llevarían a la Duración Total. La *Tabla 3* muestra los valores resultantes para cada actividad.

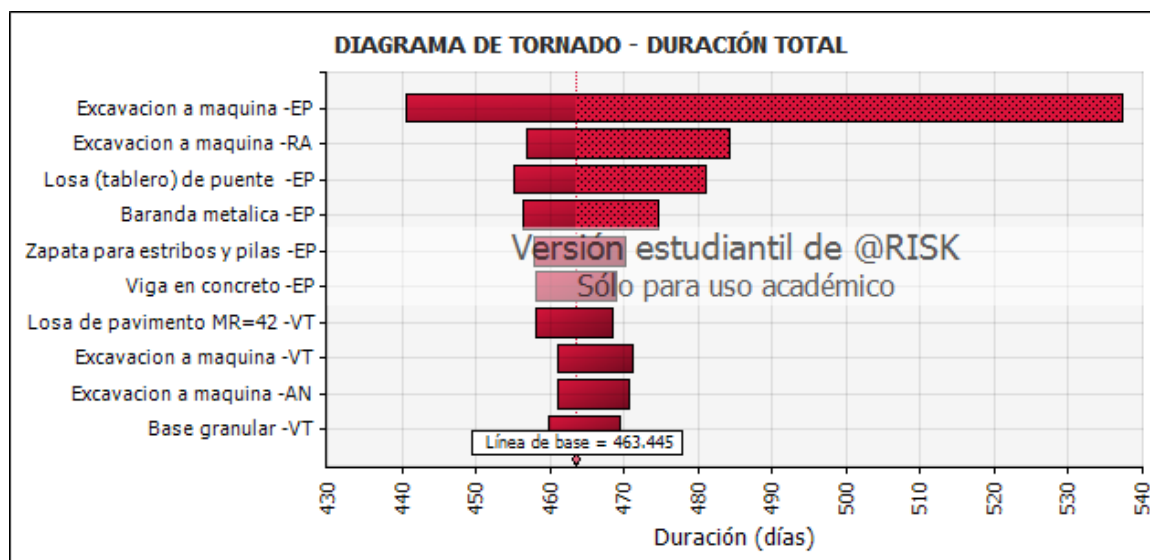


Ilustración 19: Diagrama de tornado para Duración Total del modelo. Fuente: El autor.

ACTIVIDAD	En días		
	VALOR INFERIOR	VALOR SUPERIOR	RANGO DE VARIACIÓN
Excavación a máquina -EP	440.5	537.3	97.0
Excavación a máquina -RA	456.8	484.2	27.4
Losa (tablero) de puente -EP	455.2	481.1	25.9
Baranda metálica -EP	456.5	474.7	18.2
Zapata para estribos y pilas -EP	458.0	470.2	12.2
Viga en concreto -EP	458.1	469.1	11.0
Losa de pavimento MR=42 -VT	458.0	468.5	10.5
Excavación a máquina -VT	461.1	471.2	10.1
Excavación a máquina -AN	461.0	470.8	9.8
Base granular -VT	459.8	469.5	9.7

Tabla 3: Valores límite de influencia de cada actividad para el análisis de sensibilidad, Duración Total.

Destaca fuertemente la amplitud de variación para la actividad *Excavación a máquina -EP*, ya que genera una variación de -5.0% y 15.9% respecto a la media y un rango de variación de 97 días frente a 27.4 días que genera la actividad en segunda posición. Sin embargo, el diagrama de tornado lista las actividades según la amplitud del rango de variación, pero no

considera aquellos escenarios en donde la variación de la actividad no afecta la Duración Total. La *Ilustración 20* muestra los Coeficientes de Correlación que representan la relación entre la variación salida respecto a la variación de la entrada, siendo posibles los valores de coeficientes entre -1.0 y 1.0; el valor de 1.0 indica que por una unidad de variación en la entrada, se genera una unidad de variación en la salida. Así, esta medición considera también las variaciones de cada actividad que no tuvieron un impacto en la salida (que hacen disminuir el valor del coeficiente) y muestra un resumen de cómo es la afectación en general de la variabilidad de cada actividad.

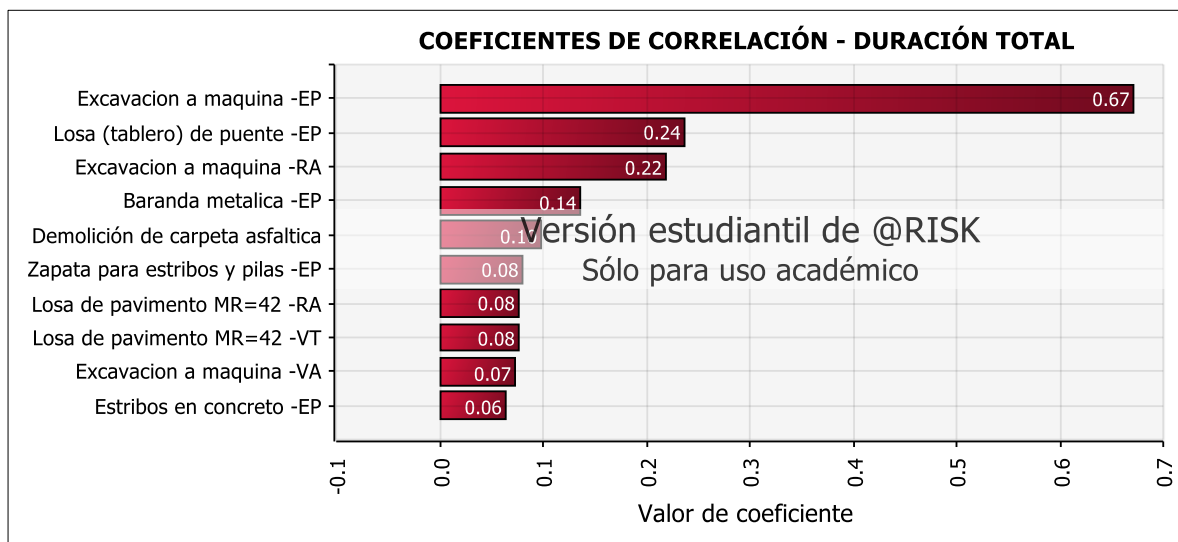


Ilustración 20: Coeficientes de correlación para la Duración Total del modelo. Fuente: El autor.

Para la Duración Total ambas graficas comparten seis de sus actividades y se confirma la relevancia del impacto que causa la actividad *Excavación a máquina –EP* observada en el diagrama de tornado, pues el coeficiente de correlación tiene un valor de 0.67 que es más del doble del coeficiente obtenido para la segunda actividad *Losa (tablero) de puente –EP* con 0.24. El segundo y tercer puesto se alternan entre los dos gráficos con las actividades *Losa (tablero) de puente –EP* y *Excavación a máquina –RA*, y la cuarta actividad *Baranda metálica –EP* mantiene la misma posición en ambos casos; lo que confirma que estas cuatro actividades poseen la mayor capacidad de afectación al proyecto en su Duración Total.

Esta variación que hay entre el orden o la presencia de las actividades en ambos gráficos, se debe principalmente a la poca o mucha probabilidad que tienen las actividades de pertenecer a la ruta crítica y que por ende su impacto sea más relevante. Este valor de probabilidad se puede conocer mediante el Índice Crítico, que es el porcentaje que tiene cada actividad de

pertenecer a la ruta crítica para todos los escenarios considerados dentro de la simulación. La *Tabla 4* muestra el Índice Crítico de cada actividad listadas según el programa creado para el modelo.

ACTIVIDAD	ÍNDICE CRÍTICO	ACTIVIDAD	ÍNDICE CRÍTICO
Demolición de carpeta asfáltica	97.54%	ROTONDA Y DESVÍOS -RD	
VÍA DE APROCHE -VA		Excavación a máquina -RD	2.04%
Excavación a máquina -VA	25.56%	Conformación subrasante -RD	3.28%
Conformación subrasante -VA	0.0%	Geotextil -RD	3.28%
Geotextil -VA	0.02%	Relleno en roca muerta -RD	3.28%
Relleno en roca muerta -VA	0.02%	Base granular -RD	3.28%
Base granular -VA	0.02%	Losa de pavimento MR=42 -RD	3.28%
Losa de pavimento MR=42 -VA	0.02%	Sardinell -RD	0.0%
Sardinell -VA	0.0%	VÍA TRANSVERSAL -VT	
RAMPAS DE APROCHE -RA		Excavación a máquina -VT	6.92%
Excavación a máquina -RA	25.56%	Tubería concreto ref. de 1000 mm -VT	4.04%
Viga de cimentación -RA	23.52%	Cámara de inspección alcantarillado -VT	4.04%
Conformación subrasante -RA	0.0%	Relleno en roca muerta -VT	4.04%
Muro Keystone -RA	23.52%	Excavación a máquina -VT	2.88%
Relleno en roca muerta -RA	0.22%	Conformación subrasante -VT	6.92%
Base granular -RA	23.72%	Geotextil -VT	6.92%
Losa de pavimento MR=42 -RA	23.72%	Relleno en roca muerta -VT	6.92%
New Jersey in-situ -RA	23.72%	Base granular -VT	6.92%
Baranda metálica -RA	23.72%	Losa de pavimento MR=42 -VT	6.92%
ESTRUCTURA PUENTE -EP		Sardinell -VT	0.06%
Excavación a máquina -EP	65.12%	ANDEN -AN	
Bárrete para estribos y pilas -EP	65.12%	Demolición de anden -AN	2.46%

Zapata para estribos y pilas -EP	65.12%	Canalización de tubería 2x3" - AN	0.0%
Estribos en concreto -EP	62.66%	Excavación a máquina -AN	2.46%
Columna en concreto -EP	2.48%	Relleno en roca muerta -AN	4.0%
Viga en concreto -EP	64.90%	Cordón en concreto -AN	4.0%
Viga en acero -EP	64.90%	Anden en loseta prefabricada - AN	4.0%
Losa (tablero) de puente -EP	62.14%	Flecha en pintura termoplástica	0.0%
New Jersey in-situ -EP	62.14%	Línea en pintura termoplástica	10.16%
Baranda metálica -EP	85.80%		

Tabla 4: Índice critico de las actividades del modelo.

En la *Tabla 5* se muestran las cuatro actividades que se encontró tienen un impacto significativo en el proyecto y sus valores resumidos de las mediciones del impacto; también las actividades *Excavación a máquina –AN* y *Demolición de carpeta asfáltica* para mostrar como una sola medición no muestra el panorama completo respecto al impacto generado.

ACTIVIDAD	RANGO DE VARIACIÓN	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN	ÍNDICE CRITICO
Excavación a máquina –EP	97.0 días	0.67	65.12 %
Excavación a máquina –RA	27.4 días	0.22	25.56 %
Losa (tablero) de puente -EP	25.9 días	0.24	62.14 %
Baranda metálica -EP	18.2 días	0.14	85.5 %
Excavación a máquina –VT	10.1 días	0.03*	2.46 %
Demolición de carpeta asfáltica	5.3*	0.10	97.54 %

*Tabla 5: Valores de medición del impacto resumido. *no aparece en la ilustración respectiva*

Aunque la actividad *Excavación a máquina –VT* aparece listada como octava en el diagrama de tornado dentro de un total de 53 actividades, debido a su poca probabilidad de estar en la ruta crítica según su índice critico hace que su coeficiente de correlación sea tan bajo que obtenga en puesto 21 y no sea listada en la *Ilustración 20*. Caso contrario sucede con la

actividad *Demolición de carpeta asfáltica*, cuyo rango de variación para la Duración Total es tan pequeño que se ubica en el puesto 19 y por ende no aparece en el diagrama de tornado, sin embargo ocupa la quinta posición respecto a los Coeficientes de Correlación con un valor de 0.10 que es más de tres veces el coeficiente obtenido para *Excavación a máquina –VT*, a pesar que esta tiene un rango de variación de casi el doble de días; lo que se debe al hecho que la demolición es predecesora de todas las excavaciones del proyecto y por esto su Índice Crítico de 97.54%.

De la *Tabla 4* se puede observar también la predominancia que mantiene la ruta crítica del modelo determinístico a través de las actividades del frente *Estructura Puente –EP* con valores entre el 62% y 86% para nueve de sus diez actividades, y que la ruta crítica alterna más probable recorre las actividades del frente *Rampa de Aprovecho –RA*, con valores entre el 23% y 26% para siete de nueve de ellas. Lo anterior indica que dado el caso que se den ciertas condiciones que permitan el escenario alterno, como un retraso significativo en la actividad *Excavación a máquina –RA* y un desempeño óptimo en el frente de trabajo Estructura Puente –EP, es muy probable que la ruta crítica se desplace al frente *Rampa de Aprovecho –RA*.

4.1.1. ANÁLISIS POR FRENTE DE TRABAJO

Si se compara el valor de 423.6 días que tuvo de duración el frente de trabajo *Estructura Puente –EP* (llamado en adelante **EP**) en el contexto determinístico frente al histograma de probabilidad mostrado en la *Ilustración 21* obtenido para el contexto estocástico, este valor de duración tiene una probabilidad de ocurrencia del 46.9%. Dicho porcentaje de probabilidad es ligeramente mayor del obtenido para la Duración Total del modelo con un valor de 44.6%, y la media con 433.8 días tiene un porcentaje de probabilidad muy similar a la Duración Total, con 59.9% y 59.5% respectivamente. Ambos resultados debían ser semejantes toda vez que dicho frente de trabajo es el que determina con mayor seguridad el resultado final, que variara como reflejo del impacto de los demás frentes de trabajo.

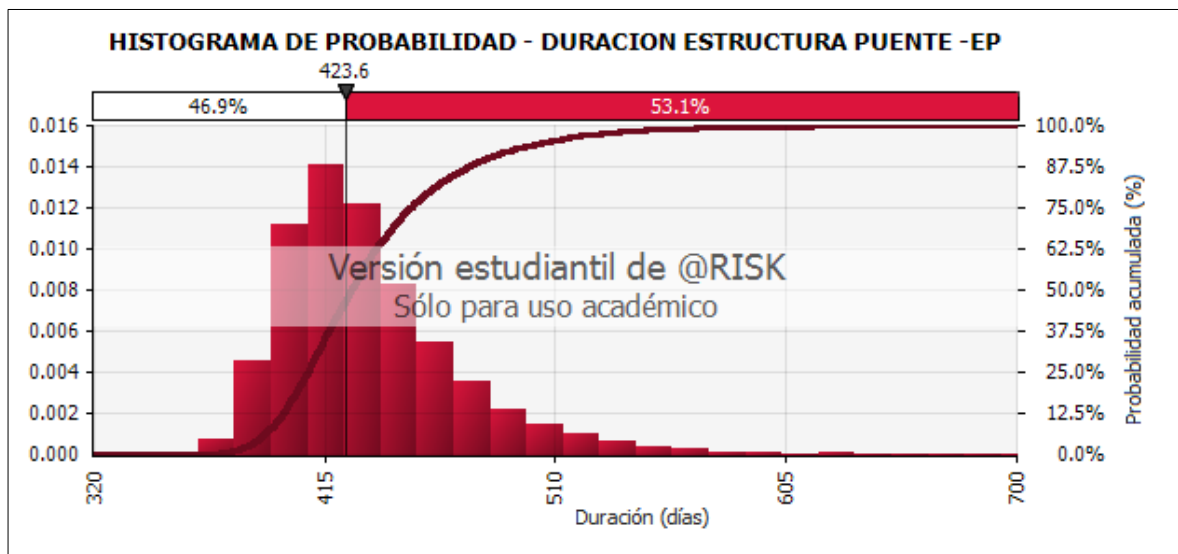


Ilustración 21: Histograma de probabilidad con curva de probabilidad acumulada superpuesta. Fuente: El autor.

Haciendo una comparación similar para el frente de trabajo *Rampa de Aproximación* –RA (llamado en adelante **RA**) con la *Ilustración 22*, se tiene que el valor de 339.0 días que tuvo de duración en el contexto determinístico se ubica en el histograma de probabilidad obtenido para el contexto estocástico con una probabilidad del 62.4% y que el valor de la media tiene una duración de 336.5 días con un porcentaje de probabilidad del 59.0%. A pesar que la media tiene una probabilidad de ocurrencia muy similar a la media de la Duración Total y se presenta una marcada diferencia para la probabilidad de sus valores determinísticos (62.4% vs. 44.6%), hay que considerar que este porcentaje todavía se encuentra dentro de los niveles de operación permitidos pues no supera el 80% si se considerara un valor para contingencia en tiempo para cada frente de trabajo.

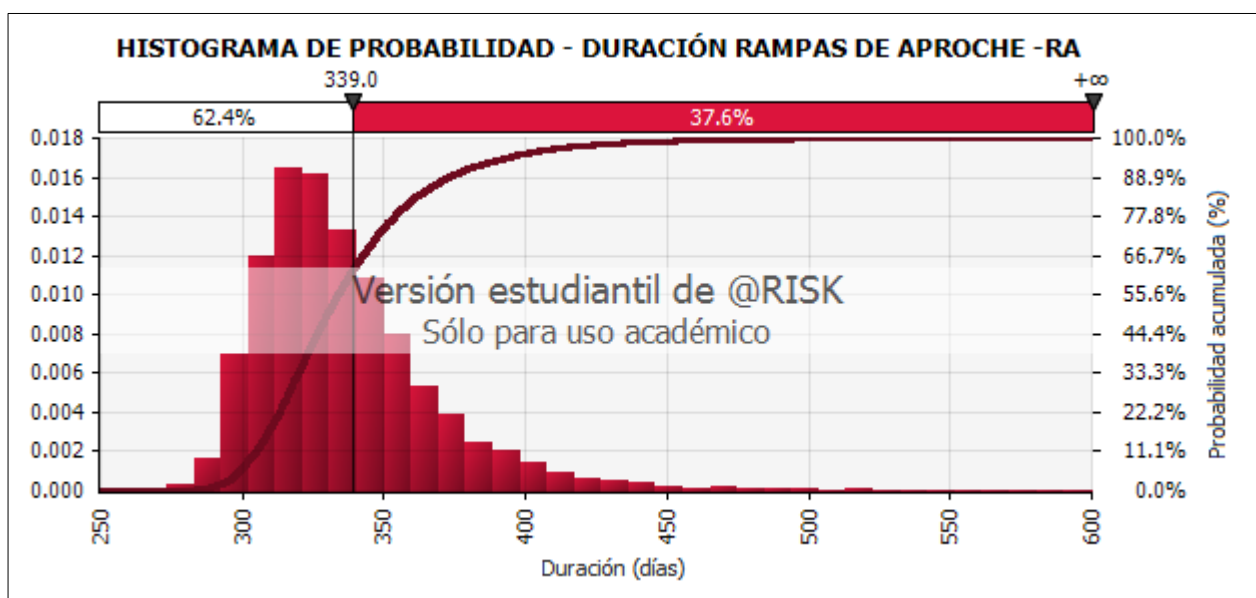


Ilustración 22: Histograma de probabilidad con curva de probabilidad acumulada superpuesta. Fuente: El autor.

Para determinar qué actividades influyeron en mayor medida en el frente *EP* se observa primero el diagrama de tornado de la *Ilustración 23* y sus valores de variación límite en la *Tabla 6*. Este también comparte la similitud de la gran ponderación que obtiene la actividad *Excavación a máquina –EP* sobre la Duración Total, esta vez con una variación en porcentaje respecto a la media de -5.8% y 17.7%. Seis de las diez actividades pertenecen al mismo frente y tres pertenecen al frente *RA*, siendo una de ellas la tercera en el orden de impacto causado, lo que confirma que hay una interdependencia entre los dos frentes y sus actividades según las precedencias establecidas en el programa de obra.

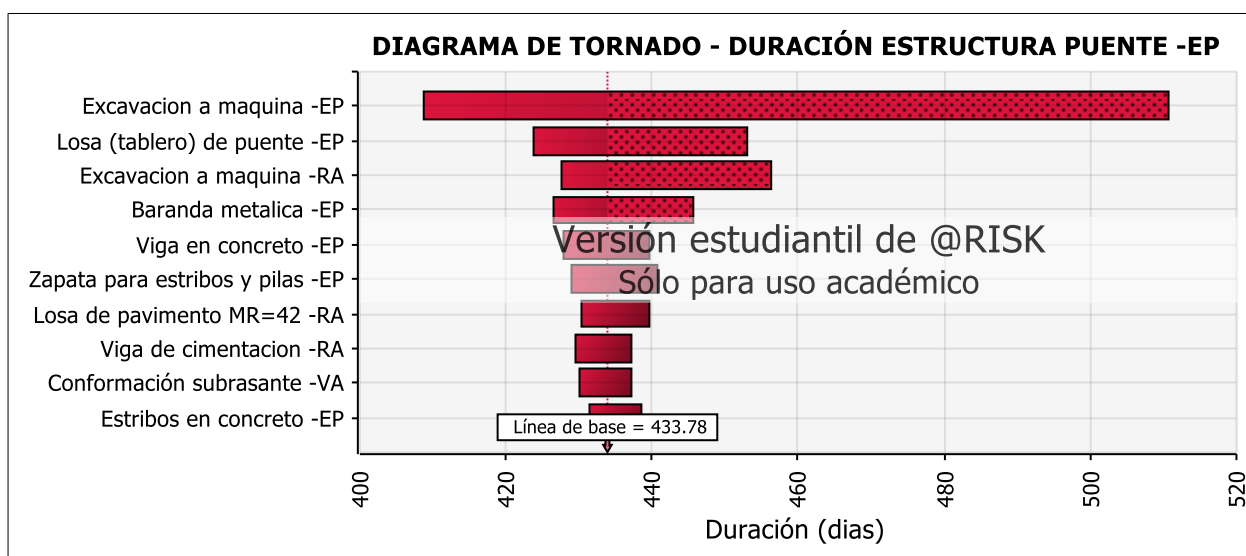


Ilustración 23: Diagrama de tornado para duración del frente de trabajo -EP. Fuente: El autor.

ACTIVIDAD	En días		
	VALOR INFERIOR	VALOR SUPERIOR	RANGO DE VARIACIÓN
Excavación a máquina -EP	408.7	510.6	101.9
Losa (tablero) de puente -EP	423.9	453.1	29.2
Excavación a máquina -RA	427.5	456.4	28.9
Baranda metálica -EP	426.5	445.6	19.1
Viga en concreto -EP	427.8	439.7	11.9
Zapata para estribos y pilas	429.0	440.7	11.7
Losa de pavimento MR=42 -RA	430.4	439.7	9.3
Viga de cimentación -EP	429.5	437.0	7.5
Conformación subrasante -VA	430.0	437.3	7.3
Estribos en concreto -EP	431.4	438.6	7.2

Tabla 6: Valores límite de influencia de cada actividad para el análisis de sensibilidad, frente Estructura puente –EP.

Analizando ahora el diagrama de Coeficientes de Correlación de la *Ilustración 24* para EP, se encuentra nuevamente la actividad *Excavación a máquina –EP* tiene una relevancia

incluso mayor que la encontrada para la Duración Total, pues su coeficiente de correlación incremento de 0.67 a 0.73. Respecto al diagrama de tornado comparte ocho de las diez actividades listadas y las cuatro primeras conservan el mismo orden, lo que indica que en este caso si hay una fuerte similitud entre el impacto que esas variables pueden generar y la efectividad con que lo generan. Comparando los resultados del frente *EP* con los obtenidos para la Duración Total se encuentra que para los diagramas de tornado hay cinco de diez actividades en común y para los coeficientes de correlación hay ocho de diez, lo que tiene sentido al ser el frente con mayor prevalencia en la ruta crítica según los Índices Críticos obtenidos del modelo.

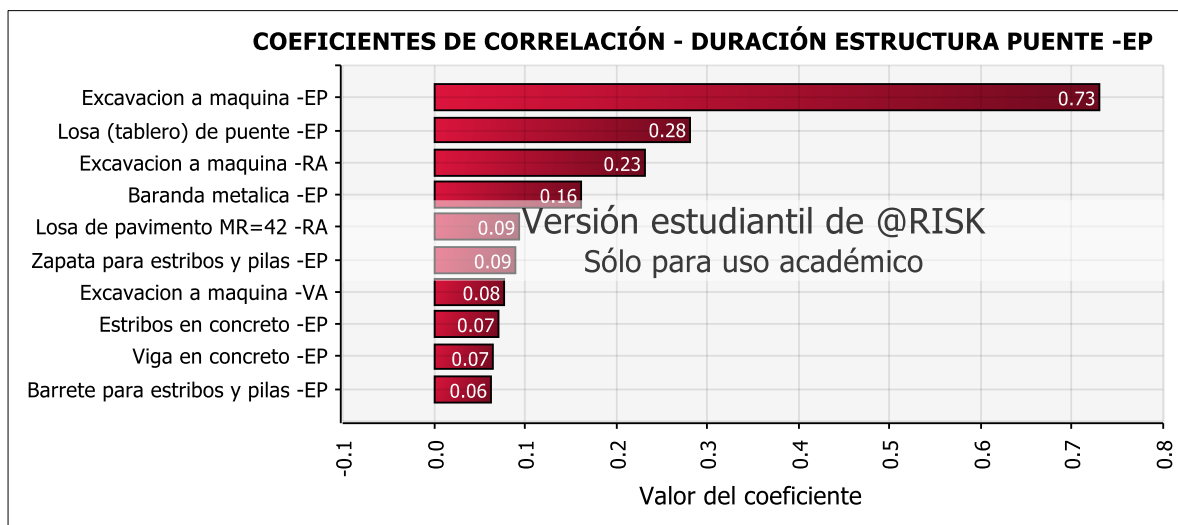


Ilustración 24: Coeficientes de correlación para la duración por frente de trabajo. Fuente: El autor.

Tres de las diez actividades que más influencia tienen en el frente *EP* según su coeficiente de correlación no pertenecen a dicho frente, dos actividades del frente *RA* que también aparecen listadas en el diagrama de tornado: *Excavación a máquina –RA* y *Losa de pavimento MR=42 –RA*; y una del frente *Vía de Aproximación –VA*: *Excavación a máquina -VA*.

Ahora para el caso del frente *RA*, la *Ilustración 25* y la *Tabla 7* muestran los resultados del diagrama de tornado. Sorprende que la actividad con mayor influencia sobre la duración del frente sea una actividad ajena al mismo y que tenga un efecto negativo tan marcado en su duración, incluso a pesar de la conexión que existe entre ambos frentes ya mencionada. En este caso las siete actividades siguientes a la actividad *Excavación a máquina –EP* son del frente en análisis, por lo que el impacto del frente ajeno es mucho más puntual, a diferencia del caso del frente *EP* donde el frente *RA* tiene un impacto de forma más dispersa por sus varias actividades presentes.

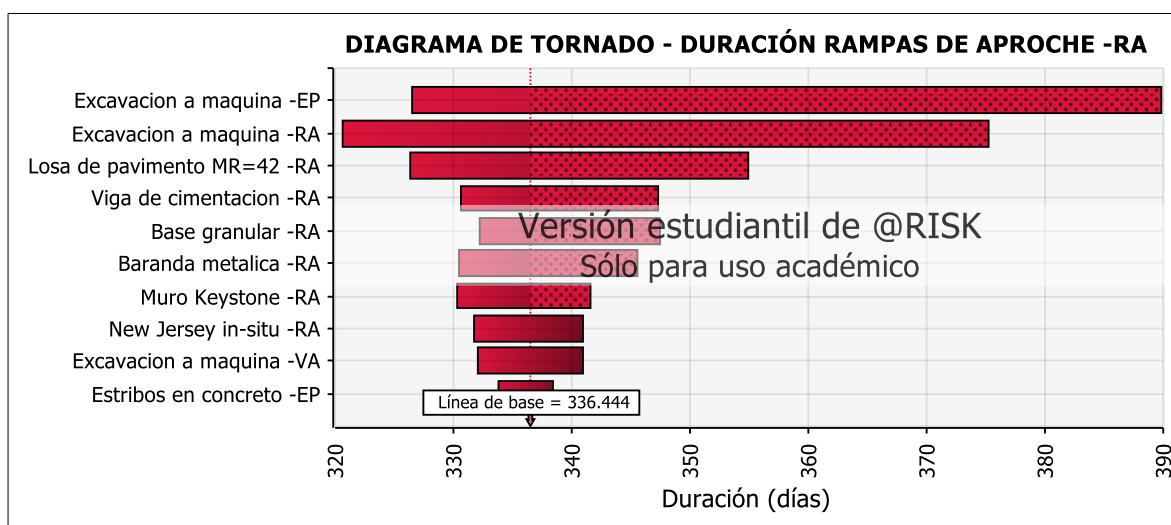


Ilustración 25: Diagrama de tornado para duración del frente de trabajo -RA. Fuente: El autor.

ACTIVIDAD	En días		
	VALOR INFERIOR	VALOR SUPERIOR	RANGO DE VARIACIÓN
Excavación a máquina -EP	326.5	389.9	63.4
Excavación a máquina -RA	320.6	375.2	54.6
Losa de pavimento MR=42 -RA	326.4	354.9	28.5
Viga de cimentación -RA	330.7	347.3	16.6
Base granular -RA	332.2	347.4	15.2
Baranda metálica -RA	330.5	345.5	15.0
Muro Keystone -RA	330.3	341.5	11.2
New Jersey in-situ -RA	331.7	341	9.3
Excavación a máquina -VA	332.1	340.9	8.8
Estribos en concreto -EP	333.8	338.4	4.6

Tabla 7: Valores límite de influencia de cada actividad para el análisis de sensibilidad, frente Estructura puente -EP.

En el diagrama de Coeficientes de Correlación de la *Ilustración 26* para el frente RA, no hay una ponderación tan marcada hacia la primera actividad listada como en el frente EP, pues entre esta y la segunda hay una diferencia en sus Coeficientes de Correlación de 0.18, mucho

menor a la diferencia de 0.45 del caso anterior. La actividad con mayor relevancia en este caso es *Excavación a máquina –RA* y es seguida por la actividad *Excavación a máquina –EP*, alternando así el orden del diagrama de tornado; aunque tienen en común que las demás actividades en los primeros ocho puestos pertenecen al frente en cuestión. En total dos actividades que no pertenecen al frente de trabajo *RA* poseen una influencia considerable para los resultados de este, *Excavación a máquina –EP* y *Bárrete para estribos y pilas –EP*.

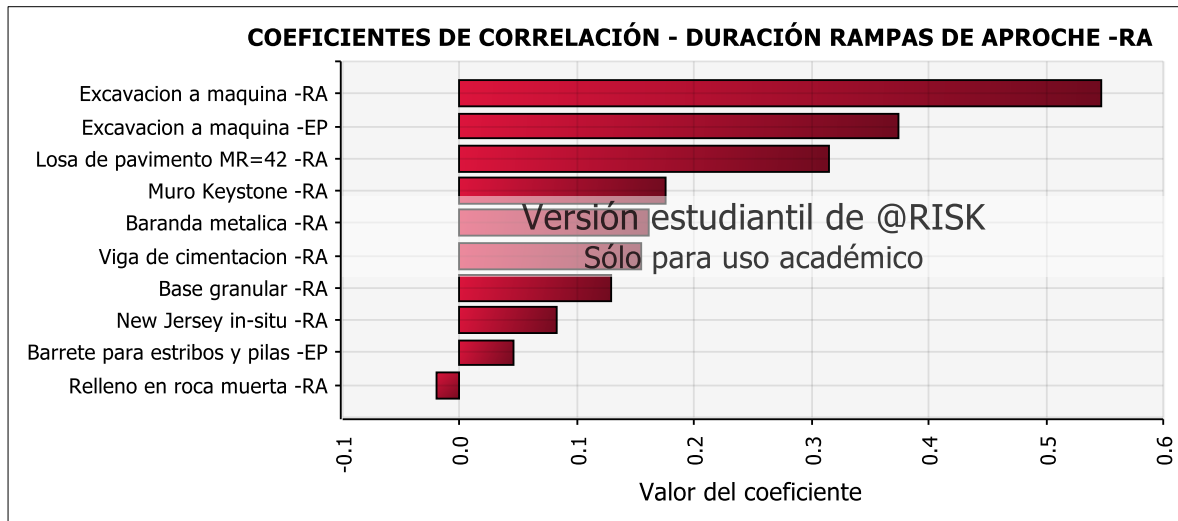


Ilustración 26: Coeficientes de correlación para la duración por frente de trabajo. Fuente: El autor.

Para explicar la presencia de actividades ajenas a ambos frentes de trabajo en sus respectivos listados de aquellas que más impactan su resultado según el Coeficiente de Correlación, hay que analizar la secuencia de trabajos de estos frentes en la *Ilustración 27* que muestra una sección del programa de obra utilizado para la realización del modelo (ya mostrado en la *Ilustración 10*). Allí se puede ver que los frentes *EP* y *RA* poseen tres conexiones en sus actividades:

1. *Estribos en concreto –EP* precede con su finalización la finalización de *Relleno en roca muerta –RA*, ya que los rellenos de las rampas solo pueden ser finalizados cuando los estribos, que son una de las tres caras de la rampa junto con las dos caras en bloque Keystone, ya hayan sido fundidos y tengas unos días de curado.
2. *New Jersey in-situ –RA* precede a *New Jersey in-situ –EP*, pues según la secuencia establecida sería la misma cuadrilla de trabajo la que realizaría el armado del acero y posterior fundición del separador tipo New Jersey iniciando desde la rampa para empalmar después con la el tablero del puente.

3. *Baranda metálica –RA* precede a *Baranda metálica –EP*, que se basa en el orden establecido de la conexión anterior, toda vez que la baranda se puede instalar una vez el separador haya sido fundido. Esta conexión muestra que todo el frente *Rampa de Aproche –RA* es predecesor de la última actividad del frente *Estructura Puente –EP*.

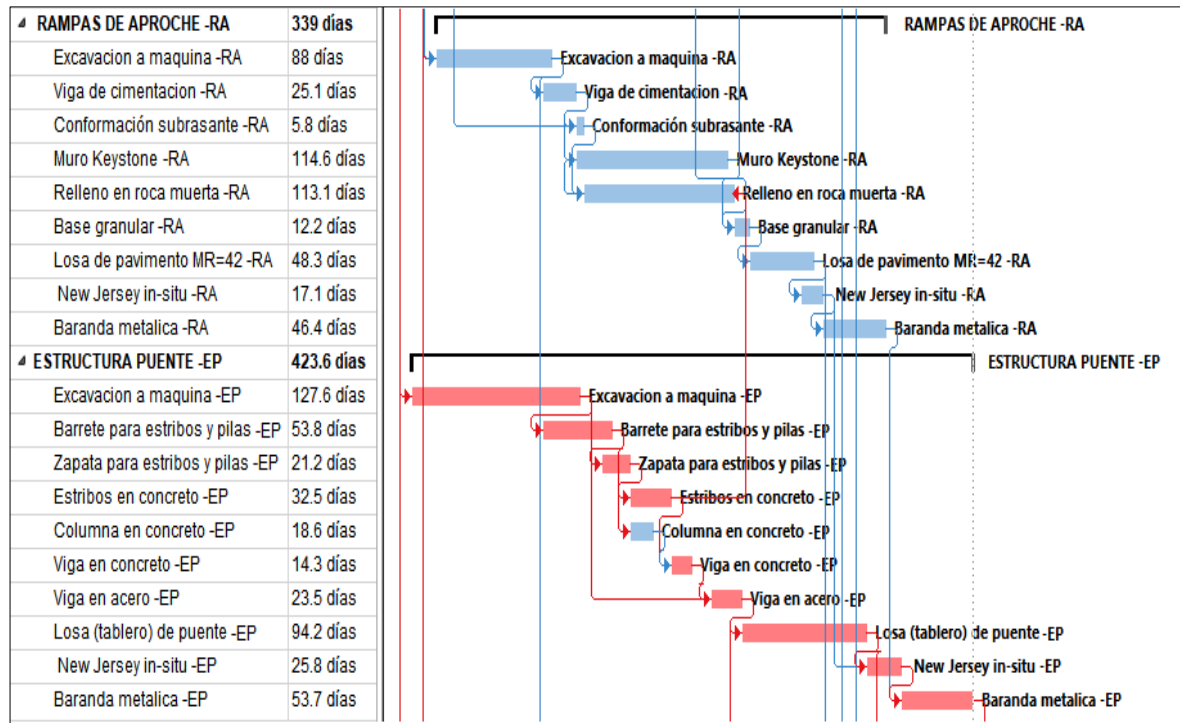


Ilustración 27: Sección del programa de obra bajo el contexto determinístico. Fuente: El autor.

La presencia de las actividades *Excavación a máquina –RA*, *Losa de pavimento MR=42 –RA* y *Excavación a máquina –VA*, en el diagrama de coeficientes de correlación del frente EP, se debe a las conexiones 2. y 3. recién definidas; pues para el caso de las dos primeras actividades, que pertenecen al frente RA, resulta que ellas son las que mayor Coeficiente de Correlación tienen para la duración de su respectivo frente, lo que significa que en la medida que ellas sufran variaciones el frente RA también las tendrá y generará una fecha de inicio más tardía para las actividades *New Jersey in-situ –EP* y *Baranda metálica –EP*. Como estas dos actividades son las últimas en la cadena del frente EP, no importa si hay un óptimo desempeño en las demás anteriores para dicha cadena pues la fecha de finalización del frente es la finalización de la actividad *Baranda metálica –EP*.

La explicación para la presencia de la tercera actividad ajena al frente EP, *Excavación a máquina –VA*, es que dicha actividad es predecesora de *Excavación a máquina –RA* por la

restricción que hay en la cantidad de maquinaria amarilla disponible, y por ende un impacto negativo en su ejecución desplazaría la fecha de inicio de *Excavación a máquina –RA*, generando el mismo efecto ya descrito para la fecha de finalización de la actividad *Baranda metálica –EP*. Para el caso de la presencia de las actividades *Excavación a máquina –EP* y *Bárrete para estribos y pilas –EP* en el diagrama de Coeficientes de Correlación del frente *RA*, está en la conexión 1. Como las actividades del frente *RA* que son sucesoras de *Relleno en roca muerta –RA* dependen de la fecha de terminación de la actividad *Estribos en concreto –EP* por su precedencia, el desempeño de dicha actividad y sus actividades predecesoras determinarían en ciertos escenarios la fecha de inicio de la cadena mencionada para el frente *RA*. Es por esto que las actividades *Excavación a máquina –EP* y *Bárrete para estribos y pilas –EP*, que son predecesoras de *Estribos en concreto –EP*, afectan el resultado final de la cadena *RA*; aunque su impacto tendrá una magnitud muy diferente pues la primera de dichas actividades tiene un Coeficiente de Correlación del 0.37 (2° lugar en la *Ilustración 26*) y la segunda solo 0.08 (9° lugar en la *Ilustración 26*).

De las dos explicaciones anteriores se puede inferir el motivo de porque la actividad *Excavación a máquina –EP* presenta un Coeficiente de Correlación tan alto para el frente *EP* y en general para la Duración Total, pues se muestra que la duración total del frente obedece principalmente a dos escenarios: uno donde la ruta crítica recorre en su totalidad el frente *EP*, y otro en donde se desvía hacia el frente *RA* en la actividad *Estribos en concreto –EP* para retornar nuevamente en el New Jersey y la baranda metálica; escenarios ambos donde la actividad *Excavación a máquina –EP* tiene un rol determinante.

4.1.2. ANÁLISIS POR ACTIVIDAD

Hasta este punto, parte del análisis realizado de manera general para la Duración Total y para los frentes de trabajo *Estructura Puente –EP* y *Rampa de Aprovecho –RA*, ha permitido identificar un grupo de actividades que generan una mayor variabilidad en los resultados finales de acuerdo a la magnitud y probabilidad de ocurrencia de sus propias variaciones. Entre estas, la actividad *Excavación a máquina –EP* resalta notoriamente al ser la que más variación puede llegar a generar y la que tiene un mayor impacto por unidad de variación en la Duración Total del proyecto según el rango de variación y el coeficiente de correlación en las *Ilustraciones 19 y 20*; situación que se repite en el análisis de los frentes *EP* y *RA* solo con la excepción que para el coeficiente de correlación de *RA* obtiene el segundo lugar después de la actividad *Excavación a máquina –RA*. Para la Duración Total la segunda actividad que mayor impacto genera es *Losa (tablero) de puente –EP*, que presenta una gran variabilidad en su comportamiento porque de los proyectos que se tomaron los datos de rendimientos, presentaban diferentes métodos de ejecución. Principalmente la diferencia estaba en la instalación de la formaleta, pues en el caso de estudio se utilizó una formaleta apoyada sobre perfiles metálicos provisionales que se instalaron dentro de las vigas de acero

principales, por lo que no hubo necesidad de estructura de puntales o cimbra para soportar y fue un proceso muy rápido; en otro proyecto que se trataba de un puente sobre un cauce hídrico, fue necesaria la instalación de una cimbra tipo arco apoyada en los márgenes, para evitar que la corriente afectara la estabilidad de la misma ante la negativa de la autoridad ambiental para instalar elementos de mayor tamaño, razón por la cual tuvo una mayor demora en el tiempo final de la fundición del elemento pues la instalación de su formaleta tuvo un alto nivel de complejidad.

Ahora, es clara la estrecha relación que hay entre el desempeño del proyecto y la actividad *Excavación a máquina –EP*, debido en parte al hecho que la actividad tiene una buena probabilidad de estar en la ruta crítica según su índice crítico del 65.12%, pero también a la gran variación que ella misma presenta en su desempeño pues su duración puede variar entre 87 hasta 395 días, generando un rango de variación de 308 días. Considerando que la Duración Total tiene un rango de variación de 376 días, entre 391 y 767 días, es así entendible que el coeficiente de correlación para la actividad este cercano a 1.0.

Para poder visualizar cómo se comportan las duraciones variables de la actividad y el proyecto en conjunto, la *Ilustración 28* muestra el diagrama de dispersión de la Duración Total vs. la duración de la actividad, donde cada punto intercepta los valores de duración obtenidos para ambas variables en cada iteración de la simulación. Las líneas negras están ubicadas en el valor correspondiente a la media para cada duración, siendo 121.6 días para *Excavación a máquina –EP* y 463.3 días para la Duración Total, y dividen la gráfica en cuatro cuadrantes con sus valores de probabilidad acumulada señalados en las esquinas.

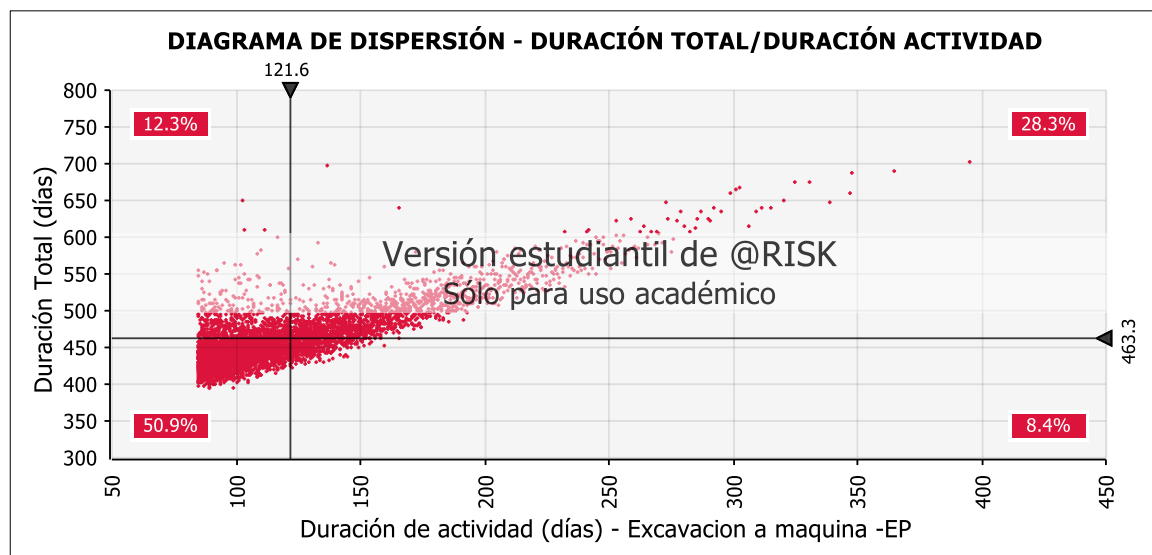


Ilustración 28: Diagrama de dispersión Proyecto vs. Actividad. Fuente: El autor.

Se puede observar como la nube de puntos a pesar de estar muy concentrada en los valores cercanos a las medias y tener el 50.9% de los posibles escenarios ubicados en el cuadrante inferior izquierdo, posee una cola más dispersa que sale hacia a la derecha con una pendiente positiva, lo que representa aquellos casos en que el incremento en la duración de la actividad genere un impacto similar en la Duración Total; siendo los puntos ubicados al final de la cola que son muy dispersos y cercanos a los límites de ambas variables, los que asignan el alto nivel de impacto a la actividad, pues ellos muestran aquellos escenarios negativos extremos y muy poco probables que la actividad puede llegar a causar.

Si bien esta actividad es la que mayor impacto genera, el diagrama de tornado para la Duración Total también nos muestra que las actividades *Excavación a máquina –RA*, *Excavación a máquina –AN* y *Excavación a máquina –VT* se encuentran en el grupo de las diez que más generan una variación en el resultado total; y la actividad *Excavación a máquina –VA* que no se encuentra listada en el diagrama de tornado si lo está en el de coeficientes de correlación. Esto indica que en general las labores relacionadas con las excavaciones mediante maquinaria amarilla son las que presentan el mayor riesgo en tiempo para el proyecto caso de estudio.

Todas estas actividades presentan el mismo comportamiento respecto a la media, pero en escala diferente, ya que todas estas tuvieron la misma función de distribución de probabilidad como base, pero multiplicada por las cantidades ejecutadas para cada una; distribución que en este caso es el rendimiento general usado para la actividad *Excavación a máquina* y corresponde una función Exponencial asignada como lo muestra la *Ilustración 29*.

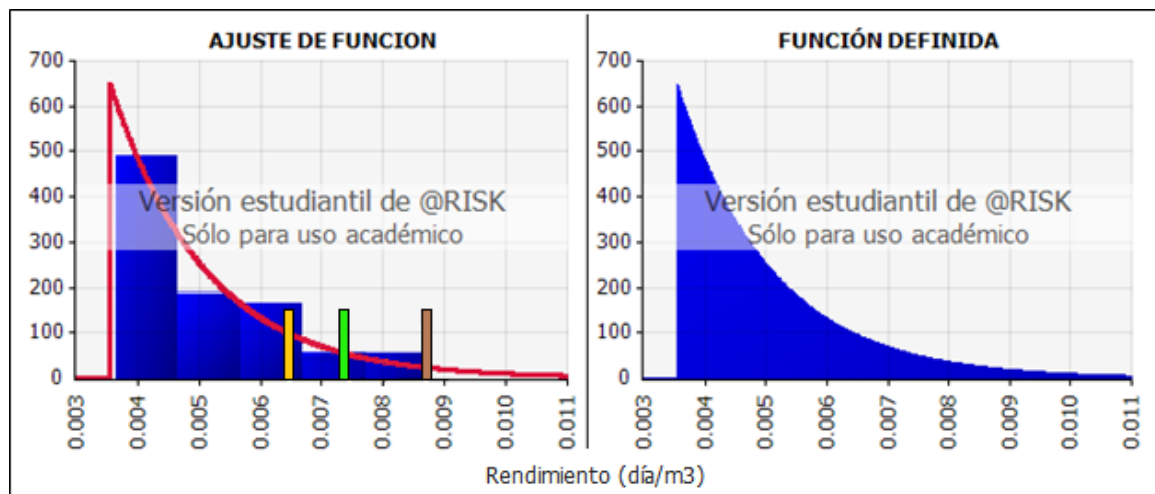


Ilustración 29: Función Exponencial de distribución de probabilidad para Excavación a máquina. Fuente: El autor.

Haber asignado la función Exponencial como su distribución de probabilidad genera una larga “cola” hacia la derecha, motivo por el cual el diagrama de dispersión también muestra el mismo comportamiento con los valores que causan el mayor impacto. Los valores de rendimiento obtenidos para el desarrollo de esta actividad se ven reflejados en las barras azules de la gráfica izquierda de la *Ilustración 29*, donde hubo una acumulación mayor de datos ubicados entre los valores 0.0035 y 0.0065 y una menor acumulación en los valores entre 0.0070 y 0.0085.

Una revisión en detalle de lo registrado en las bitácoras de obra para las actividades de excavación permitió establecer qué condiciones tenía cada proyecto del que fue tomado un valor de rendimiento para la actividad de excavación con el fin de evaluar qué factores pudieron incidir en su ejecución. Aunque en general muchos proyectos tuvieron en alguna medida la presencia de lluvia durante la ejecución de las excavaciones, hubo un dato obtenido en el que las labores de excavación fueron realizadas en el mes de octubre, fecha donde la segunda temporada de lluvias presenta su pico en intensidad. La línea amarilla en el gráfico representa la actividad con mayor rendimiento obtenido pero que no fue ejecutada con presencia de lluvias intensas y hasta donde los datos obtenidos presentaron una mayor acumulación, mientras que la línea de color verde representa el valor un poco aislado en donde hubo una alta intensidad de lluvia. La última barra de color café representa el único proyecto en donde se tuvo que excavar con la presencia de un nivel freático superficial, factor que afectó de manera muy significativa su rendimiento pues se debió utilizar bombas para abatir el nivel freático sumado a los trabajos necesarios para evacuar dicha agua. Estos dos últimos datos fueron quienes incrementaron drásticamente el sesgo positivo de la distribución.

4.2. COSTO DIRECTO

Una vez realizada la simulación del modelo de Costo Directo según lo descrito en 3.4, se tiene como resultado del proyecto bajo un contexto determinístico que el Costo Directo corresponde a \$16,158,201,942. La *Ilustración 30* muestra el histograma de densidad de probabilidad del Costo Directo del proyecto para el contexto estocástico, donde el valor mínimo posible es \$13,977,565,501 y el valor máximo es \$19,019,061,794. La media corresponde a \$16,298,681,547 con una probabilidad de ocurrencia del 52.5%, y la mediana representa un valor de \$16,258,951,931, habiendo un ligero sesgo positivo para este resultado. Este, a diferencia del histograma obtenido para la Duración Total, no muestra un sesgo positivo tan fuerte y su comportamiento se asemeja más a la función Normal.

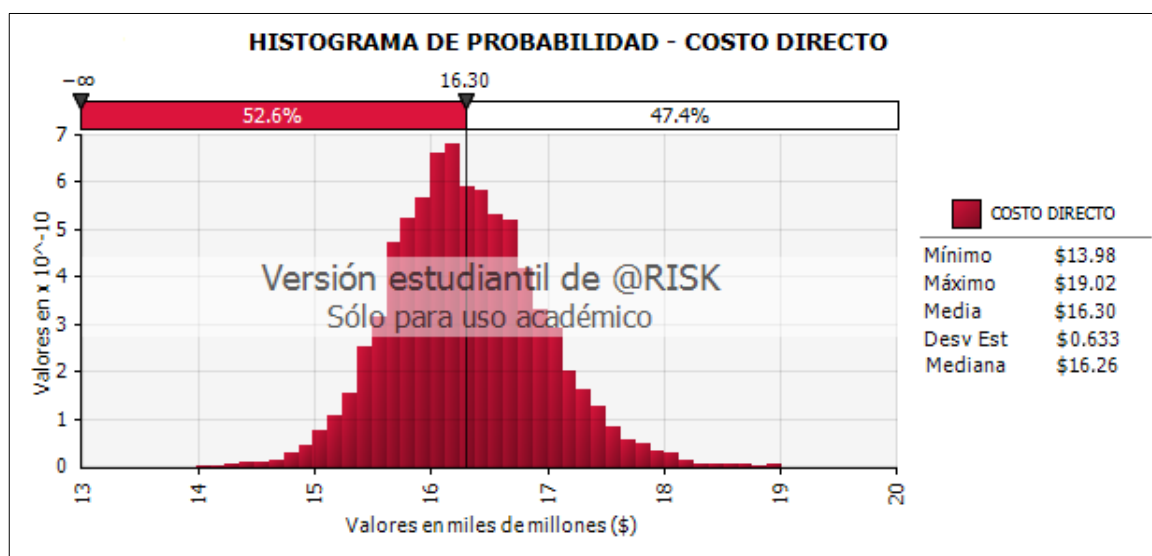


Ilustración 30: Histograma de probabilidad para el Costo Directo del modelo. Fuente: El autor.

Dado que el Costo Directo del proyecto ejecutado según parámetros determinísticos, con un valor de \$16,158,201,942, tiene una probabilidad de ocurrencia del 43.3%; se podría inferir que este se pudo ejecutar con unos precios competitivos respecto a los demás proyectos considerados para el análisis y conto con un nivel medio-alto de riesgo. Considerando un evento con 80% de probabilidad de ocurrencia como el valor de contingencia establecido, al igual que en el modelo de Duración, se tiene en este caso un costo equivalente a \$16,808,906,309. Al comparar dicho valor de contingencia con el desempeño del modelo determinístico se obtiene una diferencia de probabilidades de ocurrencia del 36.7% ($80\% - 43.3\% = 36.7\%$), que representa un incremento del 4.1% en el valor total obtenido. Lo anterior se puede observar en la *Ilustración 31*, donde se muestra la probabilidad acumulada para las distintas duraciones posibles.

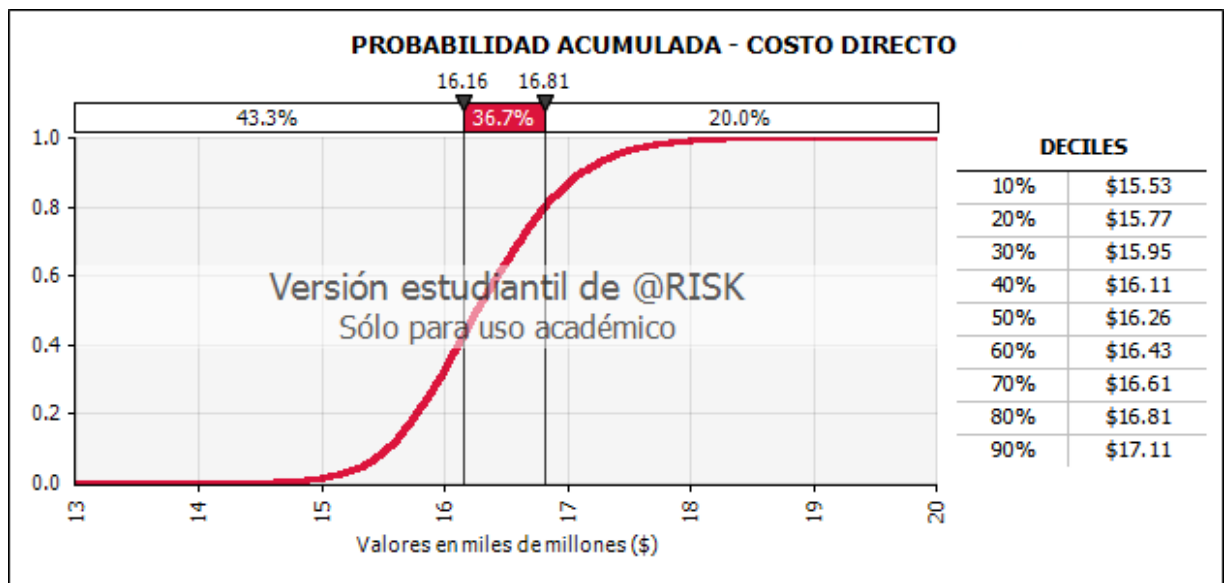


Ilustración 31: Diagrama de probabilidad acumulada para el Costo Directo del modelo.
Fuente: El autor.

Al igual que en los resultados del diagrama de tornado para el modelo de Duración, la actividad *Excavación a máquina* vuelve a obtener el primer lugar generando un rango de variación respecto a la media de -4.0% y 5.7%, que representa la suma de \$1,578,934,549; aunque en este modelo dicha actividad no posee una influencia en solitario tan marcada en el resultado final pues no hay una gran diferencia entre el rango de esta y el de la segunda actividad, *Losa de pavimento MR=42*, que genera una variación de -3.5% y 3.7% equivalente a \$1,173,174,384. Comparando estas dos actividades con las demás mostradas en la *Ilustración 32* y la *Tabla 8* si hay una diferencia apreciable del impacto causado, pues el rango de variación generado por la segunda actividad representa casi el doble del rango generado por la tercera, por lo que las dos primeras actividades son las que realmente representan el mayor riesgo.

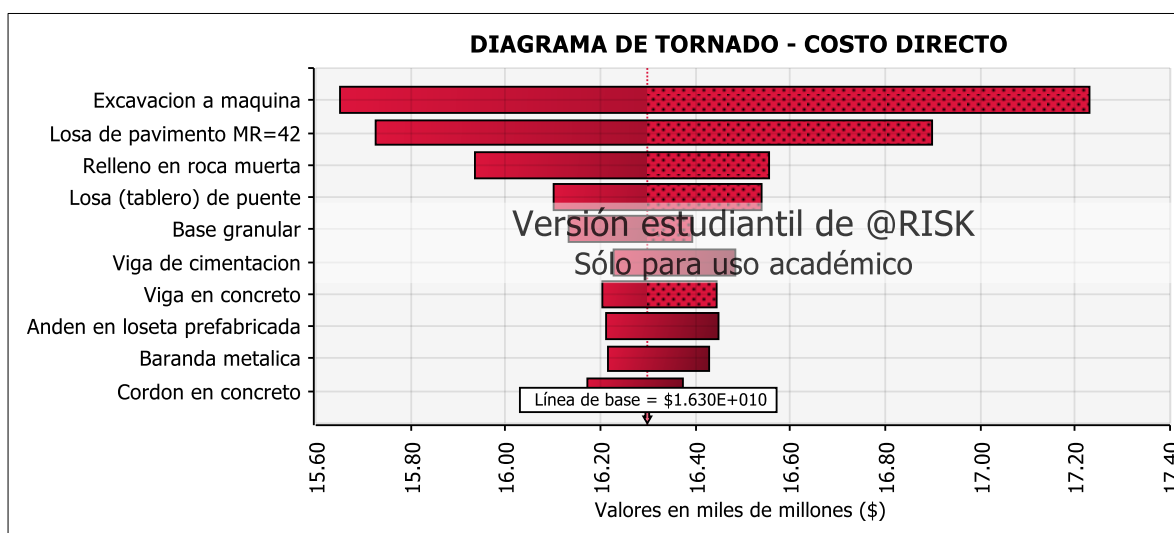


Ilustración 32: Diagrama de tornado para duración total del modelo. Fuente: El autor.

ACTIVIDAD	En millones de pesos		
	VALOR INFERIOR	VALOR SUPERIOR	RANGO DE VARIACIÓN
Excavación a maquina	\$15,652	\$17,231	\$1,579
Losa de pavimento MR=42	\$15,727	\$16,900	\$1,183
Relleno en roca muerta	\$15,933	\$16,557	\$623
Losa (tablero) de puente	\$16,102	\$16,540	\$438
Base granular	\$16,134	\$16,393	\$258
Viga de cimentación	\$16,228	\$16,483	\$254
Viga en concreto	\$16,205	\$16,446	\$240
Anden en loseta prefabricada	\$16,212	\$16,447	\$235
Baranda metálica	\$16,216	\$16,428	\$211
Cordón en concreto	\$16,171	\$16,373	\$202

Tabla 8: Valores límite de influencia de cada actividad para el análisis de sensibilidad, Costo Directo.

Analizando ahora el diagrama de los coeficientes de correlación de la *Ilustración 33*, se observa un comportamiento bastante similar al obtenido del diagrama de tornado, compartiendo nueve de diez actividades y las cuatro primeras siguiendo el mismo orden. Nuevamente las dos primeras actividades, *Excavación a máquina* y *Losa de pavimento*

$MR=42$, poseen una considerable diferencia respecto al resto de las demás listadas, pues la segunda actividad en orden de afectación posee un coeficiente de correlación de 0.49 que equivale casi el doble del obtenido para la tercera actividad *Relleno en roca muerta* con 0.28, aunque en este caso la diferencia entre la primera y la segunda si es más significativa que el diagrama de tornado.

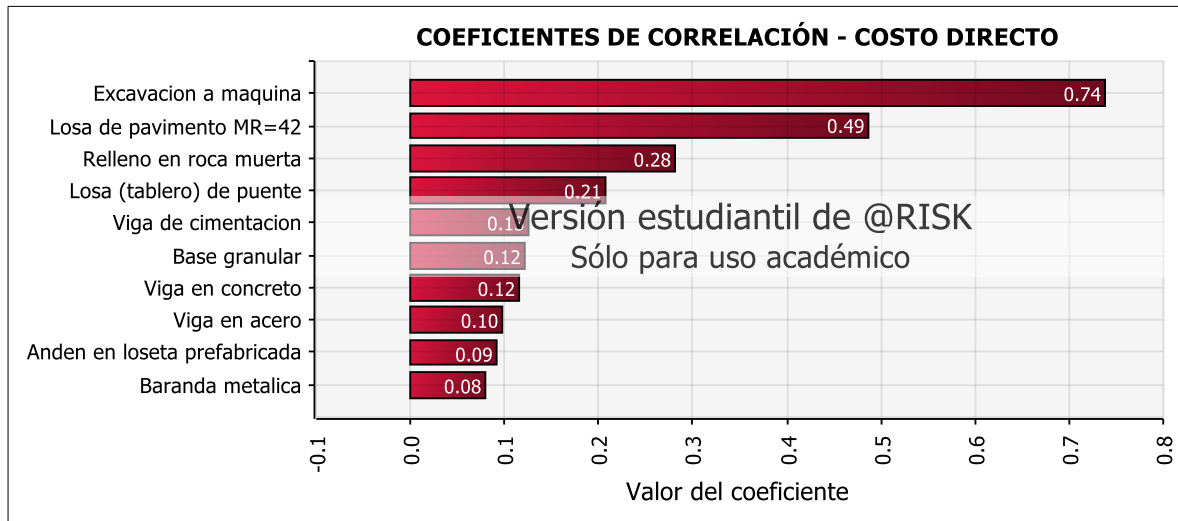


Ilustración 33: Coeficientes de correlación jerárquica para el Costo Directo. Fuente: El autor.

Estas dos actividades que se ha identificado representan el mayor riesgo para el Costo Total, *Excavación a máquina* y *Losa de pavimento MR=42*, obtuvieron en el modelo determinístico un valor total de \$2,770,781,122 y \$3,093,548,649 respectivamente. El hecho de que la actividad con mayor participación en el Costo Total del modelo determinístico no sea la que mayor impacto tiene en el modelo estocástico, se debe al comportamiento que tiene cada actividad según su función de probabilidad asignada, situación que se puede observar en la *Ilustración 34* donde se muestra los histogramas de probabilidad sobrepuestos para el valor total que obtuvo cada actividad; siendo las líneas de color verde y amarillo los valores obtenidos para el modelo determinístico.

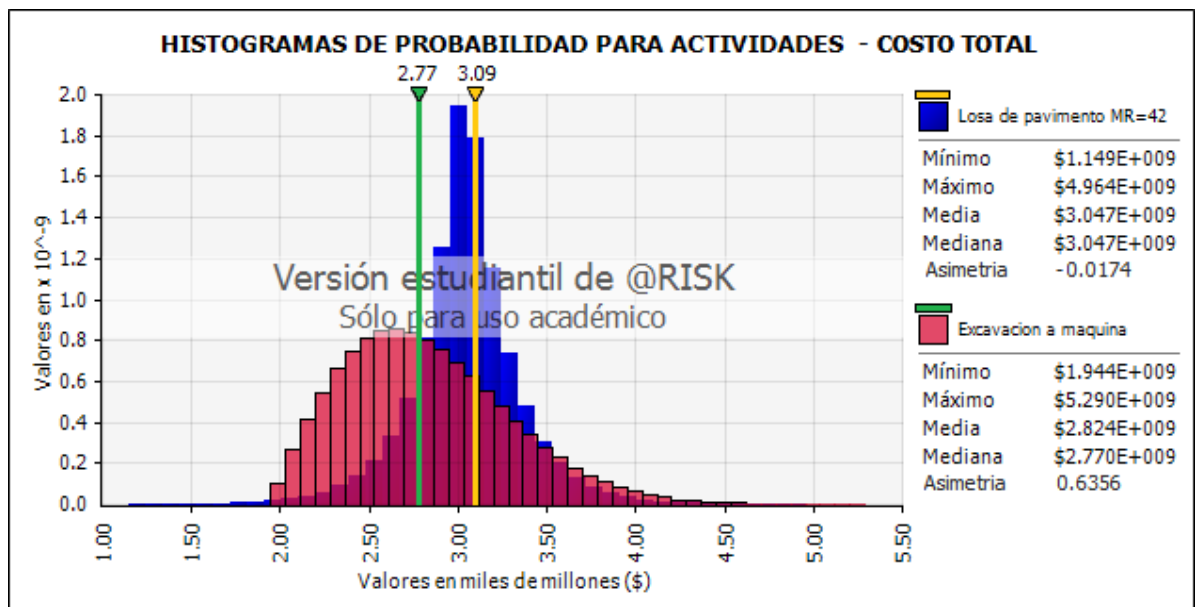


Ilustración 34: Histogramas de probabilidad sobre puestos para las actividades de mayor impacto. Fuente: El autor.

Con esto se puede entender porque las actividades cambian su puesto en la participación y por ende su impacto en el Costo Total, ya que ambas poseen una asimetría opuesta a la otra que hace que los valores de la actividad *Excavación a máquina* tiendan a subir y los de *Losa de pavimento MR=42* a disminuir. Comparando el comportamiento de ambas actividades se ve como *Excavación a máquina* presenta una figura más dispersa y con una menor acumulación de probabilidad cerca de su moda como no sucede en el caso de *Losa de pavimento MR=42* que tiene un pico muy alto que representa una gran cantidad de datos cerca a ese valor.

Para apreciar mejor la dispersión de los datos obtenidos para la actividad *Excavación a máquina*, que es al final la que mayor riesgo representa para el Costo Total, la *Ilustración 35* muestra el diagrama de dispersión del costo unitario de esta respecto al Costo Total, donde cada punto intercepta los valores de costo obtenidos para ambas variables en cada iteración de la simulación. Las líneas negras están ubicadas en el valor correspondiente a la media para cada variable en su eje, siendo \$26,016 días para el costo unitario de la actividad *Excavación a máquina* y \$16.3 (mil millones) para el Costo Directo; también dividen la gráfica en cuatro cuadrantes con sus valores de probabilidad acumulada señalados en las esquinas.

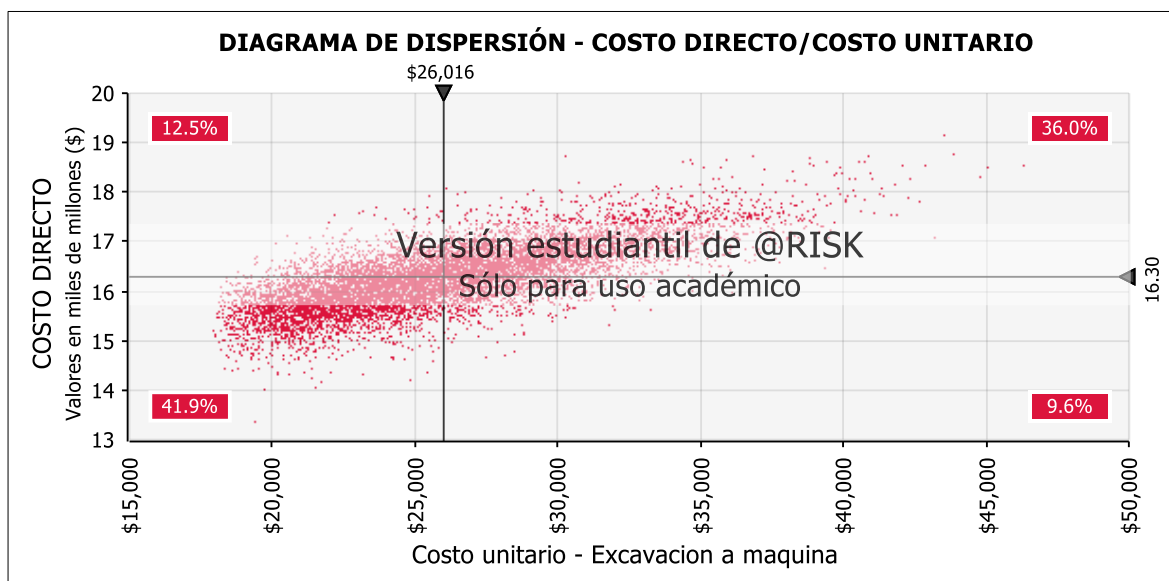


Ilustración 35: Diagrama de dispersión para costo unitario de la actividad Excavación a máquina. Fuente: El autor

Se puede comprobar entonces como los valores obtenidos para el costo unitario presentan un sesgo positivo al concentrarse la mayoría de estos entre \$20,000 y \$30,000, dejando los restantes y más dispersos crear la cola que se ve hacia la derecha de la gráfica; aunque mucho menos disperso que los valores encontrados en el modelo de Duración donde la cola se asemejaba más a la estela de un cometa. Sabiendo que esta actividad es la que mayor riesgo presenta para el Costo Total, se encuentra que el principal factor que afecta la variación del precio unitario para los distintos proyectos fue el transporte del material proveniente de la excavación; ya que hay proyectos que tuvieron un sitio de disposición final a menos de 5 km, mientras que otros lo tenían a 20 km. Como varios de los proyectos de los que se obtuvo un valor de precio unitario fueron ejecutados en la ciudad de Cali, tenían así un precio unitario bastante similar y por esto se da la agrupación de datos cerca de \$25,000; siendo el factor diferencial para estos datos el costo asignado a la maquinaria amarilla que realiza la excavación.

4.3. COSTO TOTAL

Este modelo utilizado como extensión de los modelos de Duración y Costo Directo, dio como resultado bajo un contexto determinístico que el Costo Total corresponde a \$17,612,440,116 luego de haber adicionado al Costo Directo la suma de \$1,454,238,175 correspondiente al

costo administrativo total que se generó durante los 451 días. La *Ilustración 36* muestra el histograma de densidad de probabilidad del Costo Total del proyecto para el contexto estocástico, donde el valor mínimo posible es \$14,666,074,749 y el valor máximo es \$20,750,593,342.63. La media corresponde a \$17,795,107,469.84 con una probabilidad de ocurrencia del 52.0%, y la mediana representa un valor de \$17,767,635,144.98, habiendo un ligero sesgo positivo para este resultado. Como era de esperarse, la forma del histograma se asemeja mucho al obtenido para el Costo Directo.

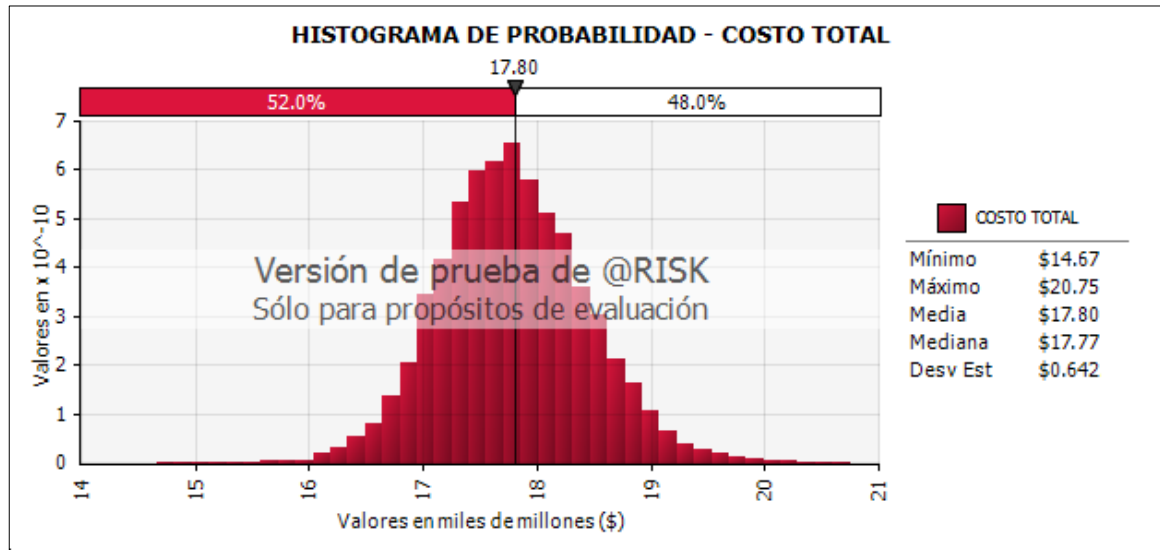


Ilustración 36: Histograma de probabilidad para el Costo Total del modelo. Fuente: El autor.

El Costo Directo del proyecto ejecutado según parámetros determinísticos, con un valor de \$17,612,440,116, tiene una probabilidad de ocurrencia del 40.0%; que representa un valor menor al obtenido para el Costo Directo lo que indica que corrió con un riesgo mayor para este caso. Considerando un evento con 80% de probabilidad de ocurrencia como el valor de contingencia establecido para el Costo Total, al igual que en los modelos previos, se tiene en este caso un costo equivalente a \$18,320,649,407. Al comparar dicho valor de contingencia con el desempeño del modelo determinístico se obtiene una diferencia de probabilidades de ocurrencia del 40.0% ($80\% - 40.0\% = 40.0\%$), que representa un incremento del 4.0% en el valor monetario obtenido. Lo anterior se puede ver en la *Ilustración 37*.

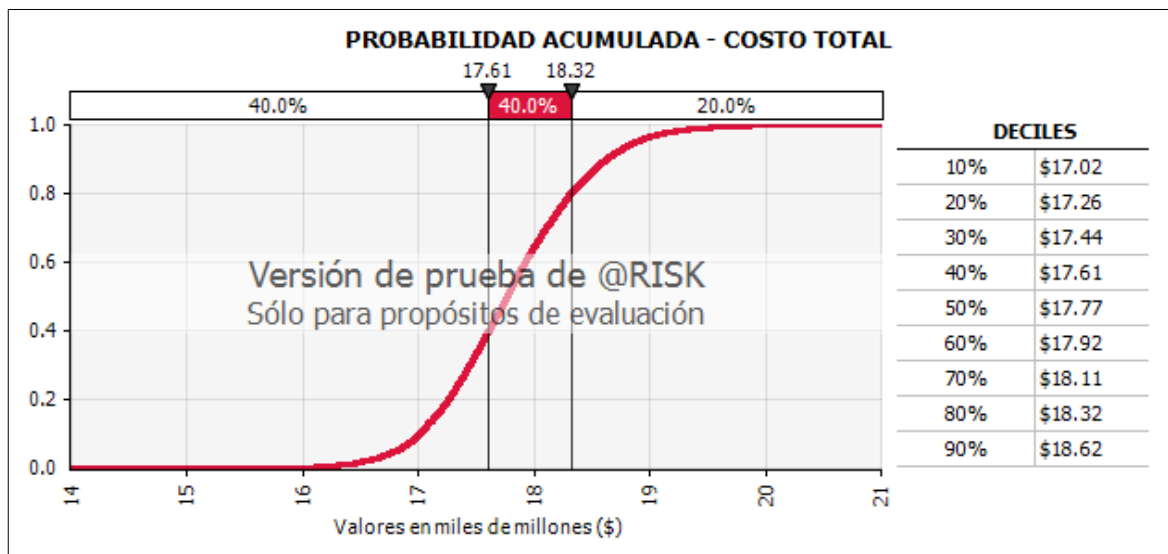


Ilustración 37: Diagrama de probabilidad acumulada para el Costo Directo del modelo. Fuente: El autor.

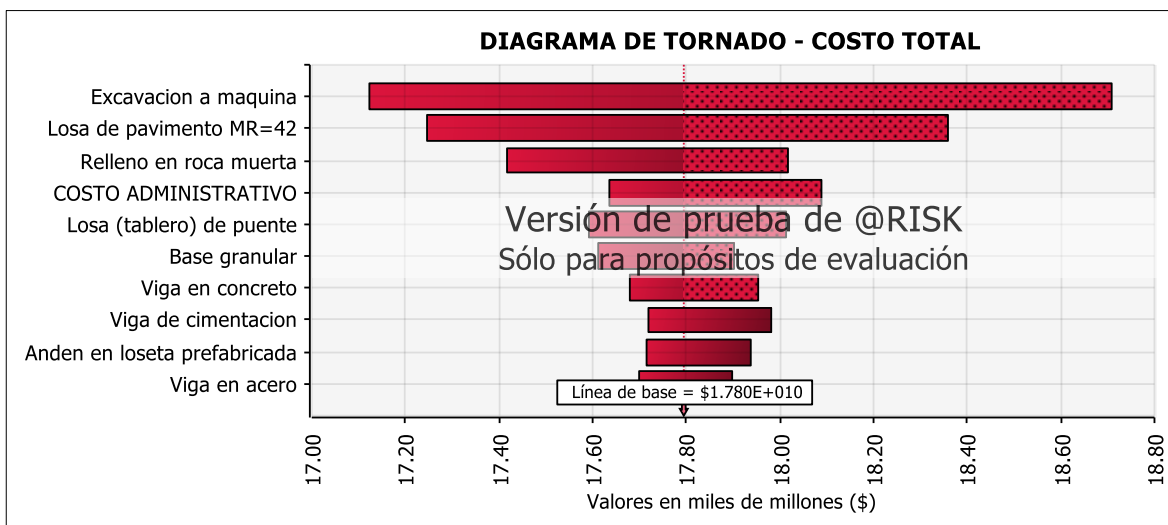


Ilustración 38: Diagrama de tornado para duración total del modelo. Fuente: El autor.

Analizando el diagrama de tornado de la *Ilustración 38* y sus valores en la *Tabla 9*, siendo muy similar al diagrama de tornado para el modelo de Costo Directo, la actividad *Excavación a máquina* vuelve a obtener el primer lugar generando un rango de variación respecto a la media de -4.0% y 5.1%, que representa la suma de \$1,585,252,095. El segundo y tercer puesto se mantienen iguales a lo obtenido para el Costo Directo, con las actividades *Losa de pavimento MR=42* y *Relleno en roca muerta*; y la cuarta posición la ocupa la nueva variable de entrada, el *Costo Administrativo*, que es una variable dependiente del tiempo, la *Duración*

Total en este caso. En general, el diagrama de tornado mantiene el mismo comportamiento del obtenido para el modelo de Costo Directo, pero con la inclusión de la nueva entrada *Costo Administrativo* dependiente del tiempo.

ACTIVIDAD	En millones de pesos		
	VALOR INFERIOR	VALOR SUPERIOR	RANGO DE VARIACIÓN
Excavación a maquina	\$17,123	\$18,708	\$1,585
Losa de pavimento MR=42	\$17,244	\$18,359	\$1,114
Relleno en roca muerta	\$17,418	\$18,019	\$601
COSTO ADMINISTRATIVO	\$17,636	\$18,091	\$454
Losa (tablero) de puente	\$17,592	\$18,015	\$423
Base granular	\$17,610	\$17,900	\$290
Viga en concreto	\$17,681	\$17,952	\$271
Viga de cimentación	\$17,719	\$17,983	\$264
Anden en loseta prefabricada	\$17,714	\$17,937	\$223
Viga en acero	\$17,699	\$17,896	\$197

Tabla 9: Valores límite de influencia de cada actividad para el análisis de sensibilidad, Costo Total.

Analizando ahora el diagrama de los coeficientes de correlación de la *Ilustración 39*, se observa un comportamiento bastante similar al obtenido del diagrama de tornado, compartiendo las diez actividades y con un cambio de orden respecto a las 4° y 5° posición, en donde se intercambiaron las actividades *Losa (tablero) de puente* y *Costo Administrativo*. Nuevamente las dos primeras actividades, *Excavación a máquina* y *Losa de pavimento MR=42*, poseen una diferencia respecto al resto de las demás listadas, aunque no tan marcada como en el modelo del Costo Directo.

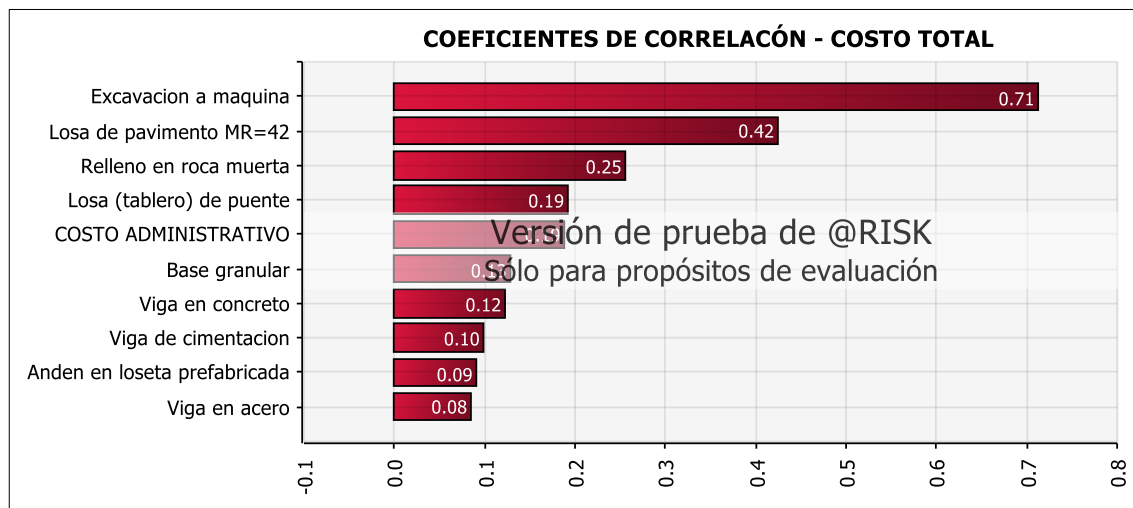


Ilustración 39: Coeficientes de correlación jerárquica para el Costo Total. Fuente: El autor.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El trabajo desarrollado a lo largo de este documento permitió demostrar como la inclusión de la incertidumbre en los modelos de programación de obra genera una alta volatilidad para el proyecto caso de estudio, específicamente respecto a dos de los objetivos principales de todo proyecto: duración y costo. En general, se pudo apreciar que para los resultados del caso de estudio se presenta una variación más notoria en el tiempo que en el costo.

Para el modelo de Duración elaborado mediante el método de la ruta crítica (CPM) y su resultado principal, la Duración Total, se encontró que las actividades de *Excavación a máquina*, *Losa (tablero) de puente* y *Baranda metálica* son las que más impacto generan en el caso de estudio; siendo la sub-actividad *Excavación a máquina –EP* la que posee un nivel de impacto muy superior a las demás al causar por si sola una variación de 308 días en la Duración Total, cuando la variación total que se puede generar es de 376 días. Esta capacidad de impacto se debe a dos aspectos: según su relevancia en el sistema (CPM), porque dicha actividad podría hacer presencia en las dos rutas críticas más probables del sistema; y según su origen mismo, pues le fue asignada una distribución de probabilidad para su rendimiento que presentaba un fuerte sesgo positivo. Dicha distribución de probabilidad fue creada a partir de un grupo de datos en donde un valor obtenido representaba una excavación realizada bajo intensas lluvias, y otro una excavación con la presencia de un nivel freático superficial; rendimientos que por ende muestran una mayor duración para la ejecución de los trabajos; y aunque estos datos no fueron clasificados como un valor atípico extremo según el diagrama de caja, sin duda causaron una distorsión en la distribución de los datos que conllevo a la asignación de la función Exponencial, función que posee un sesgo positivo absoluto lo que hace que se consideren escenarios muy pesimistas e improbables dentro de los resultados.

Ante esto, hay que considerar que cualquier proyecto de puentes de mediano o gran tamaño, cuenta con un estudio de suelos que permiten establecer la profundidad del nivel freático para el área donde se va a ejecutar los trabajos. El autor considera que un enfoque correcto para la realización de un análisis de riesgo en proyectos similares al caso de estudio, seria primero revisar la profundidad de las excavaciones a realizar y comparar con la profundidad del nivel freático según lo encontrado en el estudio de suelos, para saber si coincidirán dichas profundidades; y a partir de esto, tomar la decisión si se deben tener en cuenta o no los rendimientos que representan un nivel freático superficial para la posterior creación de las distribuciones de probabilidad de entrada. Un posible escenario de este análisis seria que a pesar que el nivel freático no sea muy superficial, si haya algunas excavaciones a mayor

profundidad, por ejemplo, para la instalación de tuberías de gran diámetro o elementos de cimentación, por lo que a estas actividades debería asignarse una distribución de probabilidad que considere dichas condiciones, mientras que a las demás actividades de excavación no. Lo anterior muestra que lo ideal sería que las actividades de excavación estén clasificadas según la profundidad a la que se vaya a excavar, o en general si contaran con la presencia del nivel freático o no.

Para el otro valor de la distribución utilizada que es menos pesimista, donde se considera la presencia de lluvias intensas, lo ideal sería que las actividades de excavación y movimientos de tierra en general no sean programadas para los periodos de tiempo donde se sabe tienen lugar las lluvias más intensas. Ahora bien, como esto no es posible siempre, se toma a consideración el trabajo realizado por (Pan. 2005), que creó una metodología para evaluar el impacto de la lluvia en la duración de proyectos de infraestructura vial, identificando para ello algunos parámetros que indican el grado de afectación causado; entre estos esta la capacidad de filtración del suelo y la intensidad de lluvia a partir de registros históricos, que se toman a consideración por su fácil consecución en el medio local, pues el primero se podría obtener del estudio de suelos que igualmente se requiere para el proyecto, y el segundo se encuentra disponible dentro de la información de acceso público del IDEAM. El análisis de estos dos parámetros y el juicio de personas con experiencia en este tipo de proyecto, podría ser una forma para decidir si deben incluirse o no dentro del análisis de riesgos, los datos que representan fuertes afectaciones por parte de la lluvia. Para el caso de este trabajo académico realizado, se consideraron todos los escenarios pues dentro de la información recolectada no había un nivel de detalle que permitiera establecer en que actividades o zonas de la obra se presentó cada condición en particular, pues la información era más que todo general para toda el área de trabajo y por ende se decidió no descartarlos para el análisis realizado.

Considerando lo anterior, la probabilidad de ocurrencia que obtuvo la duración del modelo determinístico en el modelo estocástico, de 44.2%, podría estar subestimando el riesgo que corrió el proyecto caso de estudio en su ejecución, toda vez que dicho porcentaje obtenido se basa en un límite superior que representa el escenario donde todas las excavaciones contaron con la presencia de un nivel freático superficial, escenario que según lo que se pudo extraer de la bitácora de obra, no tuvo lugar; incluso, el escenario con lluvias intensas que sería el siguiente en consideración tampoco fue una constante durante la ejecución del proyecto. Lo anterior indica que en realidad la distribución de probabilidad generada para la duración total no debió contar con un sesgo positivo tan marcado, por lo que el nivel de riesgo medio-alto obtenido para el contexto determinístico, en verdad podría haber representado un nivel del riesgo alto. Esto es muy importante pues la contingencia considerada a partir del modelo estocástico, con 80% de probabilidad de ocurrencia, representa un 8.4% del valor de la Duración Total obtenida del modelo determinístico, valor que probablemente hubiera

ascendido a más de 10% con una distribución de probabilidad con menor sesgo positivo. Como este 10% representa el valor máximo que usualmente se asigna como contingencia en procesos determinísticos, un resultado que figure dentro de los escenarios pesimistas hubiera sido capaz de sobrepasar dicho valor de contingencia, mostrando que ella no cumpliría su único fin que es mitigar el impacto causado de un escenario pesimista.

Respecto al Costo Directo, y también en general para el Costo Total, se encontró que las actividades que mayor impacto causan son *Excavación a máquina* y *Losa de pavimento* $MR=42$, en ese orden. Para la primera, su impacto se debe en mayor medida a la alta variación del costo que puede presentar debido a las distancias que tiene que recorrer el material excavado, ya que este debe tener como sitio de disposición final un lugar aprobado por las autoridades competentes o alguna propiedad en donde se haya requerido para rellenar el terreno; distancia que puede variar entre 3 km hasta más de 20 km según lo encontrado dentro en los proyectos de los que se recolectó la información. Para el caso de la segunda actividad, su nivel de impacto se debe más al hecho que es una actividad de un alto costo unitario y el proyecto conto con una gran cantidad de unidades ejecutadas, por lo que una variación no tan grande en el costo unitario, si genera una gran variación para el costo final del proyecto. Es sabido que en el costo de una estructura de pavimento el concreto es el componente que más dinero representa, motivo por el cual en las vías de menor tráfico se prescinde de este.

En los resultados del Costo Total, se pudo evidenciar el peso que puede llegar a representar el Costo Administrativo en el proyecto, pues fue listado como 4° y 5° de un total de 28 actividades de entrada según la variación que genera en el proyecto y su efectividad para generar dicha variación. Este resultado se basa en el hecho que la Duración Total presento un comportamiento algo disperso y con un sesgo positivo muy fuerte, lo que hace que se muestren igualmente unos valores muy altos de Costo Administrativo, aunque estos no tengan tanta probabilidad de suceder, razón por la cual este elemento de entrada aparece con un mayor impacto en el diagrama de tornado que en el diagrama de coeficientes de correlación. Si se considera que la actividad *Excavación a máquina -EP* es la que más impacta la Duración Total, y por ende el valor obtenido para el Costo Administrativo; el primer puesto obtenido para la actividad *Excavación a máquina* por su nivel de impacto respecto al Costo Total se tornaría aún más notorio, mostrando así que son los procesos de excavación los que mayor riesgo representan para al caso de estudio.

Respecto al desempeño del modelo determinístico, el modelo de Costo Directo arrojó como resultado final un valor que representa una probabilidad de ocurrencia del 43.3%, valor que se encuentra por debajo del valor obtenido en la media con un 52.6%; lo que muestra que el proyecto se ejecutó dentro de los márgenes esperados y conto con unos precios competitivos para poder estar debajo de la media. Una probable explicación para estos precios

competitivos podría estar en la magnitud misma del proyecto caso de estudio, pues podría esperarse que al tener una gran cantidad de unidades para ejecutar, la empresa haya buscado obtener unos precios más competitivos con antelación; por ejemplo, al hacer un acuerdo con cierta marca de cemento para el suministro exclusivo de todo el concreto premezclado, que si se suman los elementos de concreto reforzado y las losas de pavimento hidráulico suman $16,882 \text{ m}^3$ de concreto utilizado en el proyecto, cantidad bastante relevante para cualquier marca que suministre dicho producto. En general para el modelo del Costo Total se obtuvo un desempeño bastante similar, pues su valor determinístico obtenido representa un 40.0% de probabilidad, que estaba por debajo de la media con 52.6%.

Ambos modelos de costos podrían haber sido cobijados por una contingencia con un valor con probabilidad de ocurrencia del 80% y también con un valor obtenido de manera determinísticamente del 10% de su valor monetario; situación que no se presenta en el modelo de Duración, pues ya se mostró como un 10% adicional a la Duración Total obtenida determinísticamente, podría haber estado por debajo de 80% de probabilidad y no haber cumplido su función de mitigar el riesgo. Esto muestra como en el caso de estudio un análisis de riesgo mediante métodos cuantitativos hubiera permitido vaticinar que una contingencia aplicada con los métodos tradicionales no hubiera sido suficiente para salvaguardar el proyecto.

6. REFERENCIAS

1. Akintoye, Akintola S; MacLeod, Malcolm J. Risk analysis and management in construction. International Journal of Project Management. Vol 15, pp 31-38 (1997).
2. Antill, James M; Woodhead, Ronald R. Método de la Ruta Crítica y sus aplicaciones a la construcción. México D.F. 2002.
3. Barry, Willian Ryan. The true impact of late deliverables at the Construction site. Master of Science in Engineering Thesis. Austin, Texas, United States. University of Texas, 2014.
4. Cali Como Vamos. Informe: Como vamos en Movilidad. Agosto, 2015. Documento en línea.
http://media.wix.com/ugd/ba6905_de83c90932d24ef58323e76427b20323.pdf
5. Calzadilla, Erika; Awinda, Keneth; Parkin, Anna. An examination of the risk management process in Venezuelan construction projects. Annual Conference of the Association of Researchers in Construction Management (28: 3-5 September, 2012: Edinburgh; United Kingdom)
6. Choundhry, Rafiq Muhammad; Aslam, Mohammad Ali. Cost and schedule risk analysis of bridge construction in Pakistan: Establishing risk guidelines. Journal of Construction Engineering and Management. Vol 140, Artículo 7 (2014).
7. Coreas, Reynaldo H; Osorio, Mario A; Rivas, Erick A. Estudio comparativo del sistema Tierra Armada con técnicas convencionales para la estabilización de taludes. Tesis de grado en Ingeniería Civil. San Salvador, El Salvador. Universidad del Salvador, 2009.
8. DANE. Índice de Costos de la Construcción Pesada. Índices. Serie de empalme / 1990 – 2016 (diciembre).
9. Javier, Fente; Cliff, Schexnayder; Kraig, Knutson. Defining a probability distribution function for construction simulation. Journal of Construction Engineering and Management. Vol 126. Artículo 3 (2000).
10. Flanagan, Roger; Norman, George. Risk Management and Construction. Great Britain. Blackwell Science Ltd. 1999.
11. Fiorito, Fabian. La simulación como una herramienta para el manejo de la incertidumbre. Universidad del CEMA. 2006.

12. Gómez, Hernán D. Análisis de los efectos de la incertidumbre en tiempo y costo en proyectos de construcción de carreteras. Tesis de grado en Maestría en Ingeniería Civil. Cali, Colombia. Universidad del Valle, 2014.
13. Goodpasture, John C. Quantitative methods in project management. USA. J Ross Publishing. 2004.
14. Hajdu, Miklos; Bokor, Orsoyla. The effects of different activity distributions on project duration in PERT networks. Procedia - Social and Behavioral Sciences. Vol 119, pp 766–775 (2014).
15. Ministerio de Transporte. Plan Maestro de Transporte Intermodal PMTI. Colombia, 2015.
16. Nang-Fei, Pan. Assesment of productivity and duration of highway construction activities subject to impact of rain. Expert Systems with Aplication. Vol 28, pp 313-326 (2005).
17. Ökmen, Ökmen; Öztaş, Ahmet. Construction project network evaluation with correlated schedule risk analysis model. Journal of Construction Engineering & Management. Vol 134(1), pp 49-63 (2008).
18. Palisade, C. Simulación de Monte Carlo. – Palisade, 2014.
http://www.palisade-lta.com/risk/simulacion_monte_carlo.asp
19. Palisade Corporation. Guia para el uso de @Risk Version 7. USA. 2016.
20. PMI – Project Management Institute. Guia del PMBOK. Quinta edición. USA. PMI Publications. 2013.
21. Periódico El País. Mala planeación retrasa las grandes obras de infraestructura en Colombia. 1, Agosto, 2012. Artículo en línea:
<http://www.elpais.com.co/elpais/economia/noticias/mala-planeacion-retrasa-grandes-obras-infraestructura-en-colombia>
22. Periódico El Tiempo. Proyectos privados para mejorar la movilidad de Cali. 19, Septiembre, 2014. Artículo en línea.
<http://www.eltiempo.com/colombia/cali/proyectos-privados-para-mejorar-movilidad-de-cali/14555955>
23. Ramírez, Erick G. Efectos de la incertidumbre, asociada a la estimación de duraciones de actividades, en la programación de proyectos de construcción de infraestructura vial. Tesis de grado en Ingeniería Civil. Cali, Colombia. Universidad del Valle, 2014.
24. Revista Semana. Cali construye futuro. 10, Septiembre, 2015. Artículo en línea.
<http://www.semana.com/especiales-comerciales/especial-cali/articulo/cali-construye-futuro/445573-3>.

25. Xenidis, Yiannis; Stavrakas, Eleftherios. Risk based budgeting of infrastructure projects. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* Vol 74, pp 478-487 (2013).
26. Secretaria de Infraestructura y Valorización (2). Resolución Proyecto 21 Megaobras. <http://www.cali.gov.co/valorizacion/descargar.php?id=25082>
27. Secretaria de Infraestructura y Valorización (1). Presentación 21 Megaobras [Diapositiva]. 2009. <http://www.cali.gov.co/valorizacion/descargar.php?id=33338>
28. Sears, S; Sears, G; Clough, R. *Construction Project Management: A Practical Guide to Field Construction Management*: Wiley 2010.
29. Taroun, Abdulmaten. Towards a better modelling and assessment of construction risk: Insights from a literature review. *International Journal of Project Management* Vol 32, pp 101-115 (2014).
30. Touran, Ali; Bakhshi, Payam. An overview of budget contingency calculation methods in construction industry. *Procedia and Engineering* Vol. 85, pp 52-60 (2015).
31. Yamin, R; Harmelink, D. Comparison of linear scheduling method (LSM) and critical path method (CPM). *Journal of Construction Engineering and Management* (2001).