



Universidad de Valladolid

# Estimación de las Contingencias de Coste: Aplicación del análisis cuantitativo de riesgos a un proyecto real de Construcción.

David Curto Lorenzo

MÁSTER EN DIRECCIÓN DE PROYECTOS  
Departamento De Organización De Empresas Y C.I.M.  
Universidad De Valladolid  
España



**INSISOC**  
SOCIAL SYSTEMS  
ENGINEERING CENTRE  
2021





**Universidad de Valladolid**

# Estimación de las Contingencias de Coste: Aplicación del análisis cuantitativo de riesgos a un proyecto real de Construcción.

David Curto Lorenzo

MÁSTER EN DIRECCIÓN DE PROYECTOS  
Departamento De Organización De Empresas Y C.I.M.  
Universidad De Valladolid

Valladolid, Julio 2021

**Tutor**  
Fernando Acebes Senovilla



## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible este trabajo.

A mis padres, mi hermana y mis abuelos por el apoyo incondicional que me han dado siempre.

A mi tutor Fernando Acebes, por acompañarme y guiarme en el camino de la investigación y de la Dirección de Proyectos.

A todos los miembros de INSISOC y, especialmente, a Dani y Juan por el apoyo continuo.

A Carlos Alfonso Herguedas Pastor y Alberto Sánchez Barbero, por hacer posible este proyecto.

A Clara, Pablo y Elena, por formar el mejor equipo.

Al resto de mis compañeros y amigos, por mostrar su disponibilidad plena para ayudarme en todo momento.



## **RESUMEN**

La utilización de técnicas cuantitativas de simulación avanzada permite realizar análisis de Gestión de Riesgos con mayor precisión. Estimar correctamente las contingencias de coste es una actividad clave en la Dirección de Proyectos. En este trabajo, proponemos un método basado en la simulación de Monte Carlo para estimar cuantitativamente las contingencias de coste. Su uso ha sido aplicado a un proyecto real de construcción y se han establecido las directrices para incorporar todos los tipos de incertidumbre al proceso de Gestión del Riesgo.

### **Palabras Clave**

Simulación de Monte Carlo, MCS, Análisis Cuantitativo, Contingencia de Coste, Gestión del Riesgo.

## **ABSTRACT**

The use of advanced quantitative simulation techniques allows for more accurate Risk Management analysis. Correctly estimating cost contingencies is a key activity in Project Management. In this document, we propose a method based on Monte Carlo simulation to quantitatively estimate cost contingencies. It has been applied to a real construction project and guidelines have been established to incorporate all types of uncertainty into the Risk Management process.

### **Keywords**

Monte Carlo Simulation, MCS, Quantitative Analysis, Cost Contingency, Risk Management.





## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
Objetivo del Proyecto .....	1
Alcance del Proyecto .....	1
Motivación del Proyecto.....	1
Estructura del Documento .....	1
<b>Capítulo 1 Preámbulo .....</b>	<b>3</b>
<b>Capítulo 2 Marco teórico.....</b>	<b>5</b>
2.1 Riesgo e Incertidumbre .....	5
2.1.1. Riesgo en la Dirección de Proyectos.....	5
2.1.2. Riesgo según los principales Estándares en Dirección de Proyectos.....	8
2.2 Tipos de incertidumbre .....	9
2.2.1. Incertidumbre aleatoria .....	10
2.2.2. Incertidumbre epistémica.....	11
2.2.3. Incertidumbre estocástica.....	11
2.2.4. Incertidumbre ontológica.....	12
<b>Capítulo 3 Gestión del Riesgo.....</b>	<b>13</b>
3.1 Proceso de Gestión del Riesgo.....	13
3.2 Riesgo en Proyectos de Construcción.....	15
3.2.1. Identificación del Riesgo .....	15
3.2.2. Evaluación del Riesgo.....	19
3.2.3. Respuesta al Riesgo .....	19
3.2.3.1 Acciones preventivas y correctivas .....	19
<b>Capítulo 4 Estimación de las Contingencias de Coste.....</b>	<b>21</b>
4.1 Estructura del Método Propuesto.....	22
4.2 Análisis del proyecto .....	24
4.2.1. Selección de herramientas <i>software</i> .....	24
4.2.2. Definición de los paquetes de trabajo (WP).....	25
4.2.2.1 Incertidumbre en la Duración del proyecto .....	25
4.2.2.2 Incertidumbre en el Coste del proyecto.....	26
4.3 Registro de los riesgos .....	27
4.3.1. Identificación de riesgos .....	27
4.3.2. Gestión de la Incertidumbre de la Probabilidad y el Impacto.....	28
4.3.2.1 Incertidumbre aleatoria.....	29
4.3.2.2 Incertidumbre epistémica .....	29

4.3.2.3 Incertidumbre estocástica.....	33
4.4 Simulación integrada de la duración y el coste.....	34
4.5 Análisis de resultados y estimación de contingencias .....	34
<b>Capítulo 5 Caso de Estudio: Proyecto de Construcción del Aulario IndUVA.....</b>	<b>37</b>
5.1 Análisis del proyecto .....	37
5.1.1. Definición de los paquetes de trabajo (WP) .....	38
5.1.2. Coste del proyecto .....	40
5.2 Registro de los riesgos.....	41
5.2.1. Identificación de riesgos .....	41
5.2.2. Gestión de la Incertidumbre de la Probabilidad y el Impacto.....	41
5.2.2.1 Incertidumbre epistémica .....	41
5.2.2.2 Incertidumbre estocástica.....	44
5.2.3. Integración de todos los tipos de incertidumbre .....	44
5.3 Análisis de resultados y estimación de contingencias .....	47
5.3.1. Simulación inicial .....	48
5.3.1.1 Simulación de Duración y Coste.....	48
5.3.1.2 Valor planificado (PV).....	49
5.3.1.3 Duración total acumulada.....	50
5.3.1.4 Coste total acumulado .....	51
5.3.1.5 Análisis conjunto de Duración y Coste.....	52
5.3.2. Simulación final.....	53
5.3.2.1 Simulación de Duración y Coste.....	53
5.3.2.2 Duración total acumulada.....	55
5.3.2.3 Coste total acumulado .....	57
5.3.2.4 Análisis conjunto de Duración y Coste.....	58
5.3.2.5 Estimación de contingencias .....	60
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>65</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>67</b>
<b>INDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>75</b>
<b>INDICE DE TABLAS .....</b>	<b>77</b>

## **INTRODUCCIÓN**

### **Objetivo del Proyecto**

El objetivo principal de este trabajo es proponer un método válido de Gestión del Riesgo de los proyectos para estimar la asignación de las contingencias de coste. Para ello, nos basaremos en la simulación de Monte Carlo para realizar un análisis cuantitativo del riesgo. Este trabajo persigue analizar la efectividad del método comparado con el tradicional método de estimación de contingencias de coste, el cual establece reservar un porcentaje determinado del total del coste del proyecto.

### **Alcance del Proyecto**

Este trabajo persigue analizar las implicaciones que tendría no estimar correctamente las contingencias de coste para los proyectos. Partiendo de una revisión sobre el estado del arte de la Gestión del Riesgo y de cómo se aplica dentro de la Dirección de Proyectos, se persigue estimar la asignación de contingencias de coste para poder ejecutar el proyecto según la planificación realizada.

En dicha planificación, se evaluarán los riesgos o imprevistos que pudieran surgir durante el ciclo de vida del proyecto, para tenerlos en cuenta e incluirlos en el análisis previo. Un análisis de los escenarios más probables de producirse, a través de la simulación de Monte Carlo, nos permitirá estimar las contingencias de coste del proyecto.

### **Motivación del Proyecto**

La motivación para la realización de este trabajo surge de la necesidad por controlar el coste no planificado de los proyectos. El coste es una variable a tener en cuenta en la monitorización de los proyectos. Actualmente, la gestión que se realiza de los riesgos no aplica métodos ni técnicas cuantitativas avanzadas de simulación, por lo que la precisión para estimar correctamente las contingencias reales de los costes es muy baja. Por este motivo, los proyectos suelen terminar con un coste real mucho mayor que el coste planificado.

### **Estructura del Documento**

Este trabajo consta de cinco capítulos donde se desarrolla el contenido de este. El documento se estructurará como sigue:

En el Capítulo 1 Preámbulo, se realizará una breve introducción del documento y del marco de trabajo en el que este se desarrolla. Es decir, se realizará una introducción a la Dirección de Proyectos y a la Gestión del Riesgo en los proyectos.

Seguidamente, en el Capítulo 2 Marco teórico, se realizará un breve análisis sobre los conceptos de riesgo e incertidumbre y de la relación que existe entre ambos. Además, se analizará la evolución que ha seguido el concepto de riesgo a lo largo del tiempo y su estado actual, tanto por diversos autores como por los principales estándares en Dirección de Proyectos.

A continuación, se realizará un repaso sobre la situación del proceso de Gestión del Riesgo y las fases de las que se compone, así como las respuestas que se dan para gestionar los riesgos. Específicamente, se analizarán los riesgos específicos a los proyectos de construcción y cómo son actualmente abordados.

En el Capítulo 4 Estimación de las Contingencias de Coste, se explica el método propuesto. Comenzando por la estructura, se expondrán las características necesarias para aplicar este método y cómo poder medir la incertidumbre para incorporarla a un modelo de simulación de Monte Carlo.

Un estudio del caso real es realizado en el Capítulo 5 Caso de Estudio: Proyecto de Construcción del Aulario IndUVa. Se analizarán las actividades del proyecto y cómo les afecta la incertidumbre y los riesgos identificados por el Comité de Expertos del proyecto. Después de realizar la simulación de Monte Carlo, se presentarán los resultados y se analizarán para estimar las contingencias de coste. Finalmente, se propondrán las principales conclusiones obtenidas tras la realización de este trabajo.

## Capítulo 1 Preámbulo

Todos los proyectos acarrear riesgo ya que el objetivo es crear un resultado único. Los proyectos se desarrollan en un entorno de ambigüedad, complejidad e incertidumbre, lo que implica falta de información y conocimiento sobre el entorno y el futuro (Baccarini, 1996; Fan, Lin y Sheu, 2008; Cagliano, Grimaldi y Rafele, 2015; Lam y Siwingwa, 2017).

El éxito de un proyecto viene determinado por el grado de satisfacción de los *stakeholders*, medido por el cumplimiento de sus intereses y preferencias temporales (Seyedhoseini, Noori y Hatefi, 2009; Association for Project Management, 2010; Hosny, Ibrahim y Fraig, 2018). Este entorno de naturaleza inestable, incierta y cambiante es el responsable de que los intereses de los *stakeholders* se vean alterados.

Para abordar las causas que modifican la planificación de un proyecto, se ha ido desarrollando a lo largo de los años el proceso de Gestión de Riesgos: un enfoque estructurado para abordar las implicaciones del riesgo en los proyectos y establecer las contingencias para asegurar el desarrollo y cumplir los objetivos.

Muchos autores han estudiado la asignación de contingencias y el efecto de la incertidumbre en los proyectos (Lorance y Wendling, 2001; Touran, 2003; Thal, Cook y White, 2010; Idrus, Fadhil Nuruddin y Rohman, 2011; Baccarini y Love, 2014; Hammad, Abbasi y Ryan, 2016; Kwon y Kang, 2019; Traynor y Mahmoodian, 2019; El-Kholy, Tahwia y Elsayed, 2020).

El objetivo principal de este trabajo es proponer un método basado en la simulación de Monte Carlo (MCS) para estimar la asignación de contingencias de coste en la fase de planificación, incorporando todos los tipos de incertidumbre que pudiesen afectar a las actividades del proyecto.

La Gestión de Riesgos consta de tres fases bien diferenciadas por la literatura: identificación, evaluación y respuesta al riesgo (Zhang y Fan, 2014). La identificación se corresponde con el proceso de reconocer y documentar los riesgos que afectan al proyecto. La evaluación hace referencia al estudio de los riesgos identificados mediante un análisis de características y de la probabilidad de ocurrencia e impacto asociado. Por último, dar respuesta al riesgo está enfocado hacia el estudio de las acciones a tomar para gestionar el riesgo, así como la implementación y evaluación de dichas respuestas.

Durante la evaluación del riesgo, se distinguen dos principales tipos de análisis, cualitativo y cuantitativo (Hong *et al.*, 2016; Moret y Einstein, 2016). El primero consiste en una valoración de la prioridad de los riesgos y la relevancia que tienen en el proyecto (El-Sayegh, 2008; Gosling, Naim y Towill, 2013; Allahi, Cassettari y Mosca, 2017; Hosny, Ibrahim y Fraig, 2018; Moreno-Cabezali y Fernandez-Crehuet, 2020). Este proceso se lleva a cabo mediante el estudio de la probabilidad de ocurrencia y el impacto asociado en materia de alcance, tiempo y coste (Hillson, 2005; Moreno-Cabezali y Fernandez-Crehuet, 2020).

La evaluación cuantitativa persigue analizar numéricamente las modificaciones de los objetivos del proyecto debido a los riesgos (AACE International, 2011; Kwon y Kang, 2019). El análisis cuantitativo tiene lugar en aquellas organizaciones con un alto grado de madurez (Cagliano, Grimaldi y Rafele, 2015).

Solo aquellas organizaciones suficientemente maduras, capaces de buscar más allá de los límites del proyecto, han alcanzado una visión periférica de aquellos elementos que pueden alterar las condiciones base de la planificación de un proyecto. Para evitar que el entorno modifique la realidad del proyecto, es necesaria una optimizada gestión del riesgo.

La asignación de contingencias de tiempo y coste, en forma de un buffer de tiempo y de la reserva de una partida presupuestaria, es una respuesta común para hacer frente a los efectos imprevistos de los riesgos (Long y Ohsato, 2008). Muchas técnicas de evaluación de riesgos persiguen estimar las contingencias mínimas necesarias para asegurar el éxito del proyecto, y hacerlas dentro de un enfoque estructurado de Gestión del Riesgo produce una mejora significativa en la precisión de estimación de las contingencias (Akintoye y MacLeod, 1997; Mak y Picken, 2000).

Puesto que existen multitud de métodos y herramientas de gestión del riesgo (Curto, 2020; Curto *et al.*, 2020), entre técnicas cualitativas y cuantitativas, el método propuesto en este trabajo se focaliza en el estudio de la Simulación de Monte Carlo (MCS) como una técnica cuantitativa de gestión del riesgo óptima/válida para asignar las contingencias reales de coste en un proyecto real de construcción.

Debido a que los proyectos se desarrollan en un entorno de incertidumbre, es esa falta de certeza la que modifica las condiciones iniciales de partida. Entendemos por incertidumbre aquel conocimiento sobre el que no poseemos certeza (Alleman, Coonce y Price, 2018b). Por tanto, el riesgo surge de la incertidumbre (“*risk arises from uncertainty*”) del entorno del proyecto (Ordóñez Arízaga, 2007; Hillson, 2014), provocando la existencia de multitud de fuentes de riesgo (Gosling, Naim y Towill, 2013; Hong *et al.*, 2016).

Este estudio persigue integrar los diferentes tipos de incertidumbre identificados en la literatura para realizar una gestión cuantitativa de los riesgos mediante la Simulación de Monte Carlo (MCS). La simulación es una herramienta que se abre paso entre la incertidumbre, ya que permite representar el futuro más probable cuanto mayor información conozcamos (AACE International, 2011; Hazir, 2015; Mohamed *et al.*, 2020).

## Capítulo 2 Marco teórico

El objetivo principal de este capítulo es conocer el estado del arte actual del riesgo en la Dirección de Proyectos. Para ello, se expone una revisión de la literatura académica del riesgo en los proyectos. Primeramente, se comenzará con un análisis de la evolución histórica de los conceptos de riesgo e incertidumbre, al igual que la relación que une ambos conceptos y cómo son tratados en el proceso de Gestión del Riesgo.

### 2.1 Riesgo e Incertidumbre

En este apartado, se establecerán las bases que fundamentan los conceptos de ‘Riesgo’ e ‘Incertidumbre’ en la Dirección de Proyectos. Para ello, realizaremos un repaso a la evolución que históricamente han ido adquiriendo ambos conceptos y la relación que se establece entre ellos. Se analizarán los componentes del riesgo y se definirán las clasificaciones de los tipos de incertidumbre.

Asimismo, también será objeto de análisis el estado actual del proceso de Gestión del Riesgo, y las estrategias y fases en las que se divide. Se hará un repaso de las técnicas y herramientas más utilizadas para identificar y evaluar el riesgo, analizando la probabilidad y el impacto, tipos de análisis y eficacia de estos. Para finalizar el capítulo, se estudiarán las principales acciones de respuesta al riesgo.

#### 2.1.1. Riesgo en la Dirección de Proyectos

Todos los proyectos originan riesgo porque se desarrollan en un entorno de ambigüedad, complejidad e incertidumbre, (Baccarini, 1996; Fan, Lin y Sheu, 2008; Cagliano, Grimaldi y Rafele, 2015; Lam y Siwingwa, 2017).

Sin embargo, no existe un consenso sobre el concepto del riesgo (Williams, 1995; Perminova, Gustafsson y Wikström, 2008). Ha sido un concepto ampliamente estudiado a lo largo de la historia de la Dirección de Proyectos. Aun así, existen diferencias importantes entre autores, y algunos puntos en común (Acebes, Pajares y López-Paredes, 2015).

Por una parte, en la lengua popular se ha relacionado tradicionalmente la idea de ‘riesgo’ como algo que implica connotaciones negativas, lo cual ha llevado a identificar el riesgo como un problema perjudicial (Hillson, 2002). A lo largo de este apartado, se expondrá la evolución que ha padecido el significado de riesgo con el paso de los años.

Por otro lado, a pesar de que en el entorno del *Project Management* el concepto de riesgo se ha entendido originalmente como una amenaza, hoy en día se incluyen también como ‘riesgo’ los efectos positivos. Es decir, se tienen en consideración las oportunidades. Esta idea está presente en

la mayoría de las definiciones actuales, incluyendo los principales estándares en la Dirección de Proyectos.

En la Tabla 1, se presenta una revisión de diferentes autores y el significado del término ‘riesgo’. La definición más extendida de ‘riesgo’ es la que lo define como cualquier “*evento o condición incierta que, si se produce, tiene un efecto positivo o negativo en uno o más de los objetivos del proyecto*” (Project Management Institute, 2017). El riesgo es, por tanto, un evento o una condición dominado por la incertidumbre que puede afectar a los objetivos del proyecto. Cualquier alteración en el ambiente o en el proyecto -ocurrencia de un riesgo- puede generar un impacto y afectar a la consecución de los objetivos del proyecto.

**Tabla 1 Riesgo para diversos autores.**

<b>Autor</b>	<b>Riesgo</b>
Dowie (1999)	Consecuencias negativas
Jaafari (2001)	Probabilidad de perder o ganar
Hillson (2002)	Tradicionalmente entendido como resultados adversos, como pérdida, peligro o daño
Chapman y Ward (2003)	Oportunidades y amenazas como las dos caras de una misma moneda
Hillson ((2004)	Incertidumbre medible
Chí (2006)	Puntos en común en algunas características del riesgo
Hillson (2009)	Incertidumbre que importa
Hillson y Simon (2012)	Amenaza u oportunidad
Project Management Institute (2017)	Evento o condición con efectos positivos o negativos
Alleman, Coonce y Price (2018b)	Consecuencia de la incertidumbre
ISO 31000 (2018)	Efecto de la incertidumbre sobre los objetivos

Dependiendo de cómo sean los efectos de ese impacto, se obtiene la primera clasificación del riesgo:

- Amenazas para los riesgos que producen efectos negativos.
- Oportunidades para los riesgos que producen efectos positivos.

Sin embargo, el concepto de riesgo adquirió un vínculo con las posibilidades de obtener un beneficio a la hora de alcanzar los objetivos. Para Dowie (1999), el riesgo siempre ha tenido implicaciones negativas: consecuencias que dificultan o imposibilitan la consecución de los objetivos. Igualmente, Hillson (2002) reconoce que el riesgo ha sido tradicionalmente entendido como ‘una pérdida, un peligro o un daño’ hacia los proyectos.

Jaafari (2001) define el riesgo de una forma sencilla: probabilidad de ganar o perder. Esta idea es recogida por Chapman y Ward (2003), quienes entienden el riesgo como una moneda, siendo los efectos positivos y negativos cada una de sus caras. Se introduce la idea de que un riesgo no es netamente positivo ni negativo, puesto que unos objetivos pueden verse perjudicados mientras que otros objetivos del mismo proyecto pueden resultar beneficiados. Dependiendo del lado en el que ‘caiga la moneda’, se puede ganar o perder.

Una vez asimilado que el riesgo podría generar impactos provechosos para la gestión de los proyectos, se profundizó en qué causa generaba los eventos o condiciones que modifican el entorno de un proyecto; es decir, los riesgos. De este modo, Hillson (2004) define riesgo como la



‘incertidumbre medible’ para, posteriormente, señalar que un riesgo es “*uncertainty that matters*”, o ‘la incertidumbre que importa’ (Hillson, 2009).

Por consiguiente, se establece una relación entre el riesgo y la incertidumbre. Chia (2006) señala que la incertidumbre está presente en todos los ámbitos de los proyectos. Además, el autor indica que, hasta esa fecha, existen varios puntos en común en la literatura relacionados con el concepto de riesgo: riesgo es un evento futuro que tiene una probabilidad de ocurrencia y producirá consecuencias inesperadas. En torno a estas tres condiciones se había desarrollado el estudio del concepto del riesgo a través de la literatura.

A día de hoy, el riesgo es mayoritariamente considerado una amenaza o una oportunidad, y tiene una relación causa-efecto con la incertidumbre, puesto que el riesgo surge de la incertidumbre (Hillson y Simon, 2012). Tanto los autores académicos, como los principales estándares en Dirección de Proyectos, incluyen a las oportunidades en sus análisis de riesgos. El Project Management Institute (2017) propone la definición de riesgo anteriormente mencionada y se produce un avance en el estudio de la relación entre incertidumbre y el riesgo.

Además, el Project Management Institute (2017) diferencia entre un ‘riesgo general’ y un ‘riesgo individual’, definiendo el primero como “*el efecto de la incertidumbre sobre el proyecto en su conjunto, proveniente de todas las fuentes de incertidumbre*”. Esta idea también ha sido estudiada recientemente por Acebes et al. (2021), quienes proponen un indicador para medir el riesgo total del proyecto. Por su parte, la norma de estandarización internacional sobre la Gestión del Riesgo, ISO 31000 (2018) define el riesgo como el “*efecto de la incertidumbre sobre los objetivos*”. Igualmente, Alleman, Coonce y Price (2018b) definen el riesgo como una consecuencia de la incertidumbre.

Anteriormente, se habían estudiado los componentes del riesgo. De acuerdo con la definición de Alleman, Coonce y Price (2018b), el núcleo de cada riesgo se corresponde con la incertidumbre que lo causa. En otras palabras, en la relación ‘causa que genera un evento, el cual acarrea consecuencias’, la ‘causa’ se ajusta con la ‘incertidumbre’, el ‘evento’ con un ‘riesgo’, mientras que las ‘consecuencias’ coincidirían con las ‘amenazas y oportunidades’.

Para Gosling, Naim y Towill (2013), la incertidumbre puede ser definida como el rango que oscila entre la falta de certeza y el desconocimiento casi total del resultado de un evento. En este sentido, poseer completa certidumbre sobre un resultado dejaría de ser considerado ‘incertidumbre’ y, por tanto, no podría convertirse en riesgo. A tenor de las definiciones ya mencionadas, un riesgo podría -o no- ocurrir y, en esa franja de desconocimiento, es donde se situaría la incertidumbre.

Por otro lado, otros autores ya hacían referencia sobre la necesidad de centrarse en las causas de un riesgo para abordar la ocurrencia del mismo (Ward y Chapman, 2003; Atkinson, Crawford y Ward, 2006). Priorizando así el estudio sobre las causas del riesgo, la mayor parte del proceso de ‘Gestión del Riesgo’ se convertiría en ‘Gestión de la Incertidumbre’. El objetivo sería, por tanto, aumentar la probabilidad de ocurrencia de las oportunidades y reducir aquella de las amenazas.

### 2.1.2. Riesgo según los principales Estándares en Dirección de Proyectos

En este apartado se analizará el concepto de riesgo propuesto por los principales Estándares en Dirección de Proyectos, como son el PMBok, *Project Management Body of Knowledge*, del PMI – Project Management Institute (2017), la ICB, *Individual Competence Baseline*, de IPMA – International Project Management Association (2015), el estándar PRINCE2 de AXELOS (2017), el estándar PM<sup>2</sup> de la Comisión Europea (European Commission, 2018), la guía *Project Risk Analysis and Management Guide (PRAM Guide)* de APM – Association for Project Management (2010), así como la norma estandarizada ISO 31000 de la *International Organization for Standardization* (2018) (ver Tabla 2).

**Tabla 2 Principales Estándares para la Dirección de Proyectos.**

<b>Estándar</b>	<b>Año de publicación</b>	<b>Autor</b>
Project Risk Analysis and Management Guide (PRAM Guide)	2010	Association for Project Management (APM)
Individual Competence Baseline (ICB)	2015	International Project Management Association (IPMA)
Project Management Body of Knowledge (PMBok Guide)	2017	Project Management Institute (PMI)
PRINCE2	2017	AXELOS
PM <sup>2</sup>	2018	Comisión Europea
ISO 31000	2018	International Organization for Standardization (ISO)

La definición realizada por el estándar más extendido, el PMBoK o *Project Management Body of Knowledge* (*Project Management Institute*, 2017), es también la definición más utilizada. Así, se define ‘riesgo individual’ como “*un evento o condición incierta que, si se produce, tiene un efecto positivo o negativo en uno o más de los objetivos del proyecto*”.

Los objetivos de un proyecto giran en torno a las restricciones y requisitos que se establecen en torno al alcance, el tiempo y el coste planificado. Un riesgo podría generar un impacto en la consecución de estos, o afectar a las metas, los hitos y la calidad requerida, tanto de forma positiva, como negativa.

Por otro lado, la metodología abierta para la Dirección de Proyectos de la Comisión Europea, PM<sup>2</sup> (European Commission, 2018), alinea su visión del riesgo con el estándar PRINCE2 de AXELOS (2017). El riesgo haría referencia a aquellos eventos inciertos que tienen efecto en la consecución de los objetivos del proyecto, en el caso de que se produjesen.

Por su parte, la norma ISO 31000 (2018) sobre Directrices para la Gestión del Riesgo, define riesgo como el “*efecto de la incertidumbre sobre los objetivos*” del proyecto. En ese sentido, el Project Management Institute (2017) diferencia entre un ‘riesgo general’ y un ‘riesgo individual’, definiendo el primero como “*el efecto de la incertidumbre sobre el proyecto en su conjunto, proveniente de todas las fuentes de incertidumbre*”. Vemos pues, la incertidumbre está íntimamente relacionada con el riesgo, pudiendo afectar a una parte o la totalidad del proyecto.

Para la APM, *Association for Project Management* (2010), el riesgo supone un evento incierto o un conjunto de circunstancias que podrían afectar a la consecución de los objetivos del proyecto. En este caso, alcanzar los objetivos se podría ver afectado tanto positiva como negativamente, ya que el impacto puede ayudar o dificultar el éxito del proyecto.

Por último, la *International Project Management Association* (2015), en su *ICB – Individual Competence Baseline*, diferencia entre riesgos (efectos negativos) y oportunidades (efectos positivos). De este modo, ambos afectan “*al logro de los objetivos del proyecto*”, bien positivamente; bien de forma negativa. Un resumen de las definiciones aportadas por los principales Estándares se encuentra en el la Tabla 3.

**Tabla 3 Riesgo para los principales Estándares para la Dirección de Proyectos.**

Estándar	Riesgo
Project Risk Analysis and Management Guide (PRAM Guide)	Evento incierto o un conjunto de circunstancias que podrían afectar a la consecución de los objetivos del proyecto
Individual Competence Baseline (ICB)	Los riesgos (efectos negativos) y las oportunidades (efectos positivos) afectan al logro de los objetivos del proyecto
Project Management Body of Knowledge (PMBok Guide)	Evento o condición que, si se produce, tiene un efecto positivo o negativo en uno o más de los objetivos del proyecto. (Riesgo individual)
PRINCE2 & PM <sup>2</sup>	Efecto de la incertidumbre sobre el proyecto en su conjunto, proveniente de todas las fuentes de incertidumbre (Riesgo general)
ISO 31000	Eventos inciertos que tienen efecto en la consecución de los objetivos del proyecto
	Efecto de la incertidumbre sobre los objetivos

## 2.2 Tipos de incertidumbre

La incertidumbre ha sido objeto de estudio por distintos autores, generando una amplia literatura al respecto, que incluye nuevas clasificaciones y novedosas definiciones. Para unos autores, el riesgo surge de la incertidumbre y la incertidumbre está en todas partes (Chapman y Ward, 2011; Hazir y Ulusoy, 2019).

Por consiguiente, se ha puesto el foco en abordar las siguientes tres cuestiones: (1) ‘La incertidumbre está en todas partes’, (2) ‘No todas las incertidumbres importan’ y (3) ‘No todas las incertidumbres que importan son malas’ (Hillson, 2020).

Alineado con esta visión, ‘riesgo’ e ‘incertidumbre’ están relacionados en el sentido de que ‘riesgo es consecuencia de la incertidumbre’. Dentro del grado de certeza o desconocimiento sobre un evento, la incertidumbre se ha clasificado en base a distintos criterios (Hazir y Ulusoy, 2019).

Tradicionalmente, la incertidumbre se ha dividido en dos categorías (Elms, 2004): (1) aleatoria, relacionada con la variabilidad, y (2) epistémica, debida a la falta de conocimiento. Para otros autores, la incertidumbre surge de la ‘variabilidad’ y de la ‘ambigüedad’, lo que se correspondería con cada uno de estos dos tipos de incertidumbre (Chapman y Ward, 2003; Alleman, Coonce y Price, 2018b).

Hillson (2014) amplió la clasificación de la incertidumbre incluyendo dos nuevos tipos en la denominada ‘Clasificación en no-eventos’, actualizando las categorías de la clasificación hasta cuatro: (1) aleatoria, (2) epistémica, (3) estocástica y (4) ontológica.

### 2.2.1. Incertidumbre aleatoria

La incertidumbre aleatoria surge de la variabilidad, proveniente de la naturaleza propia un sistema o de su entorno (Chapman y Ward, 2004; Alleman, Coonce y Price, 2018b). También llamada ‘variabilidad inherente’ o “*inherent variability*” (Chapman y Ward, 2011), siempre es una cuestión de grado de impacto, puesto que la variabilidad está asociada a eventos o actividades planificadas o esperadas, en donde existe un rango más o menos amplio de resultados posibles (Hillson, 2014). Es decir, el efecto de la variabilidad se corresponde con la disparidad de resultados que esperamos obtener.

Estos resultados están asociados a las distintas variables del Triángulo de Hierro, *iron triangle* o también llamado *triple constraint* para la Dirección de Proyectos: alcance, duración de las tareas, coste y calidad técnica (Chapman y Ward, 2003). Esta incertidumbre está presente en todo lugar, puesto que, al provenir de un sistema propio o de su entorno, nada podríamos hacer para cambiar la naturaleza propiamente dicha. Por tanto, los autores arriba mencionados concluyen que la incertidumbre aleatoria es irreducible.

Los métodos más recomendadas para tratar la aleatoriedad de los eventos y las actividades planificadas es mediante técnicas cuantitativas de Gestión de Riesgos (Hillson, 2014; Padalkar y Gopinath, 2016). Concretamente, Alleman, Coonce y Price (2018b) proponen la creación de un margen de contingencia, en materia de coste y tiempo, para prevenir los problemas que se derivan de la variabilidad. Otros métodos han sido estudiados por Curto *et al.* (2020).

La forma más común de modelar la incertidumbre aleatoria para la duración de las actividades es mediante las funciones de distribución probabilísticas Beta, Triangular, Normal y Uniforme (Acebes *et al.*, 2014), mientras que la variabilidad del coste se modula con funciones Beta, Triangular, Lognormal, y *Pearson-type* (Ordóñez Arízaga, 2007).

Un análisis sobre las funciones de distribución de probabilidad (PDF)<sup>1</sup> más utilizadas en incorporar la variabilidad derivada de la incertidumbre aleatoria es expuesta en la Tabla 4. Todas ellas tienen en común el uso de la simulación de Monte Carlo como la herramienta utilizada en el estudio de la gestión de riesgos.

Observamos que los autores se pueden agrupar en tres categorías, dependiendo de la función de distribución que utilicen: Triangular, Normal y Lognormal. También se puede observar que, en alguna ocasión, incorporan otra función a mayores, como la uniforme, o se componen de una combinación de las funciones ya descritas.

---

<sup>1</sup> *Probability Distribution Function.*

**Tabla 4 Funciones de distribución utilizadas por diversos autores.**

<b>Autor</b>	<b>PDF en MCS</b>
Lorance y Wendling (2001)	Triangular
Clark, (2001)	Triangular
Barraza <i>et al.</i> (2007)	Normal (Más Probable, 10% Más Probable)
AACE International (2011)	Triangular
Trietsch <i>et al.</i> (2012)	Lognormal
Eldosouky, Ibrahim y Mohammed (2014)	Triangular & Uniforme
Acebes <i>et al.</i> (2014, 2015, 2020)	Normal
Hammad, Abbasi y Ryan (2016)	Normal (Media, 10% Media)
Colin y Vanhoucke (2016)	Lognormal
Para-González, Mascaraque-Ramírez y Madrid (2018)	Triangular
Traynor y Mahmoodian (2019)	Triangular, Normal & Lognormal
Mohamed <i>et al.</i> (2020)	Triangular & Uniforme

### 2.2.2. Incertidumbre epistémica

La incertidumbre epistémica aparece debido a la falta de información y conocimiento, lo que diversos autores califican de ‘ambigüedad’, ‘incertidumbre de ambigüedad’ o “*ambiguity uncertainty*” (Chapman y Ward, 2011). La ambigüedad surge de la falta de experimentación y exploración de los sistemas (Damnjanovic y Reinschmidt, 2020) y de la falta de datos, de detalle o de especificación, entre otros (Chapman y Ward, 2011).

Al contrario de lo que ocurre con la incertidumbre aleatoria, la ambigüedad dominante se reduce adquiriendo mayor conocimiento sobre un sistema y su entorno. Es decir, reduciendo la ambigüedad, lo que se ve dificultado por la existencia de sinergias impredecibles en sistemas complejos. Por ello, expandir los límites del conocimiento humano reduce la incertidumbre epistémica.

### 2.2.3. Incertidumbre estocástica

La incertidumbre estocástica es conocida como la ‘incertidumbre de eventos’, puesto que se trata de aquellos eventos, condiciones, escenarios, circunstancias o sucesos que, en el caso de ocurrir, conoceríamos sus consecuencias más inmediatas (Chapman y Ward, 2011).

Otra definición que se le ha dado a este tipo de incertidumbre es que está asociada a la ‘acción’. Es decir, se trata de aquellos eventos futuros que pueden -o no- ‘pasar a la acción’, y que, en el caso de que ocurriesen, traerían aparejados una serie de consecuencias (Hillson, 2014). Por consiguiente, si una acción o un evento no se produce, no tendría ningún impacto en el alcance y objetivos del proyecto.

#### **2.2.4. Incertidumbre ontológica**

Por su parte, los riesgos con incertidumbre ontológica son conocidos como ‘cisnes negros’. Nada puede conocerse de este tipo de incertidumbre, puesto que se ubica más allá de los límites posibles del conocimiento humano (*outside our mindset or cognisance*) (Alleman, Coonce y Price, 2018a). Ni aumentando el conocimiento sobre un sistema y su entorno se podría reducir este tipo de incertidumbre, ya que no se sabría por dónde empezar a buscar.

## Capítulo 3 Gestión del Riesgo

En este apartado, se revisarán el proceso de Gestión del Riesgo y la estimación de contingencias. Posteriormente, se desgranarán las fases y estrategias de las que se compone dicho proceso: identificación, evaluación y respuesta al riesgo, así como las herramientas, métodos y técnicas utilizadas por diversos autores para abordar el riesgo y la incertidumbre en cada una de las fases expuestas.

### 3.1 Proceso de Gestión del Riesgo

El proceso de la Gestión del Riesgo ha sido ampliamente estudiado. Tanto académicos, como los principales estándares en Dirección de Proyectos, han analizado el proceso para generar un enfoque más o menos estructurado del mismo, revisando las estrategias propuestas y las fases en las que se divide.

Por una parte, algunos autores proponen una serie de estrategias para lograr una satisfactoria Gestión del Riesgo. Este es el caso de Anderson, Molenaar y Schexnayder (2007), quienes presentan una metodología compuesta por ocho estrategias: gestión de costes, gestión del alcance y de la duración, involucramiento activo de los *stakeholders* externos, estrategia para el riesgo, gestión de las entregas y las adquisiciones, estrategia para la calidad documental, mejora de la precisión y consistencia y minimización de la influencia externa.

Sin embargo, la mayoría de los análisis del riesgo se ajustan a lo recomendado por los principales estándares, como exponen Zhang y Fan (2014). En dicho estudio, se pone de manifiesto que existen procesos comunes en la mayor parte de la literatura sobre el proceso de Gestión del Riesgo<sup>2</sup>: (1) Identificación de Riesgos, (2) Evaluación del Riesgo y (3) Respuesta al Riesgo. Cada una de estas estrategias será desarrollada en profundidad más adelante, en el apartado 3.2 Riesgo en Proyectos de Construcción.

Este esquema, dividido en tres estrategias, se encuentra presente en los principales estándares, como se puede observar en la Tabla 5. En ella se dan cita los seis documentos de referencia para la Dirección de Proyectos más extendidos (ver Tabla 2).

De forma general, Zhang y Fan (2014) explican que la identificación requiere reconocimiento y se basa en documentar los riesgos que podrían afectar al proyecto. La evaluación hace referencia al estudio de los riesgos identificados: descripción y características, probabilidad de ocurrencia e impacto asociado. Por último, la respuesta al riesgo está enfocada hacia el estudio de las acciones a tomar para tratar el riesgo, como son la evaluación e implementación de las acciones de respuesta seleccionadas.

En lo relativo a la Gestión del Riesgo, el Project Management Institute en su estándar para la Gestión del Riesgo, *The Standard for Risk Management in Portfolios, Programs, and Projects*

---

<sup>2</sup> (1) Risk Identification, (2) Risk Assessment and (3) Risk Response.

(Project Management Institute, 2019) divide el proceso en siete fases: Planificar la Gestión de los Riesgos, Identificar los Riesgos, Realizar los análisis Cualitativo y Cuantitativo de los Riesgos, Implementar la Respuesta al Riesgo y Monitorear los Riesgos. Cada una de las fases tiene unas características determinadas y un momento de aplicación dentro del ciclo de vida del proyecto.

**Tabla 5 Gestión del Riesgo para los principales Estándares para la Dirección de Proyectos.**

<b>Etapas generales del proceso de Gestión del Riesgo (Zhang y Fan, 2014)</b>	<b>PMBok (Project Management Institute, 2017)</b>	<b>IPMA ICB (International Project Management Association, 2015)</b>	<b>PRINCE2 (AXELOS, 2017)</b>	<b>PM2 (European Commission, 2018)</b>	<b>PRAM (Association for Project Management, 2010)</b>	<b>ISO 31000 (2018)</b>
Identificación	Planificar la Gestión de los Riesgos	Desarrollar e Implementar un Sistema de Gestión de Riesgos	Estrategia		Iniciar	Establecimiento del Contexto
	Identificar los Riesgos	Identificar Riesgos y Oportunidades	Identificar Contexto y Riesgos	Identificar los Riesgos	Identificar	Identificación del Riesgo
Evaluación	Realizar los Análisis Cualitativo y Cuantitativo	Evaluar la Probabilidad y el Impacto de los Riesgos y las Oportunidades	Valorar mediante la Estimación y la Evaluación	Evaluar el Riesgo	Evaluar	Análisis y Evaluación del Riesgo
Respuesta	Planificar e Implementar la Respuesta al Riesgo	Evaluar y monitorear los riesgos, las oportunidades y las respuestas implementadas	Planificar	Desarrollar la Respuesta al Riesgo	Desarrollar los Planes de Respuesta Implementar las Respuestas	Tratamiento del Riesgo
	Monitorear los Riesgos		Implementar	Controlar los Riesgos	Controlar el proceso	Seguimiento y Control

Por el contrario, el estándar PRINCE2 (AXELOS, 2017) cuenta con cinco fases para la Gestión del Riesgo, destacando la comunicación como un elemento común en todo el proceso: Estrategia, Identificar Contexto y Riesgos, Valorar mediante la Estimación y la Evaluación, Planificar e Implementar.

La asociación IPMA, *International Project Management Association* (2015), en su modelo de competencias para la Dirección de Proyectos, IPMA ICB, habla de cinco ‘indicadores clave de competencia’: Desarrollar e Implementar un Sistema de Gestión de Riesgos, Identificar Riesgos y Oportunidades, Evaluar la probabilidad e impacto de los riesgos y las oportunidades, Seleccionar estrategias e implementar planes de respuesta para abordar riesgos y oportunidades y Evaluar y hacer seguimiento a riesgos, oportunidades y las respuestas implementadas.

Seis son las fases en las que la asociación APM, *Association for Project Management* (2010), en su Guía para el Análisis y la Gestión de los Riesgos de un Proyecto, *Project Risk Analysis and Management Guide (PRAM Guide)*, divide el proceso de Gestión del Riesgo en las siguientes fases: Iniciar, Identificar, Evaluar, Desarrollar los Planes de Respuesta, Implementar las Respuestas y Controlar el proceso.

En este sentido, la norma ISO 31000 (2018) para la Gestión del Riesgo establece cinco pasos a seguir durante el proceso: Establecimiento del Contexto, Identificación del Riesgo, Análisis y Evaluación del Riesgo, Tratamiento del Riesgo y Seguimiento y Control.



Desde un punto de vista holístico, el riesgo surge de aquellos factores externos que afectan al proyecto. El alcance de este, tanto lo que se incluye dentro de los objetivos, como las restricciones que excluimos del proyecto; y los *stakeholders* relacionados son los principales factores del surgimiento de riesgos.

## 3.2 Riesgo en Proyectos de Construcción

En este apartado, se tratarán los riesgos en los proyectos de construcción. El contenido del capítulo consiste en un análisis sobre las tres fases identificadas en el proceso de Gestión del Riesgo: identificación, evaluación y respuesta al riesgo, pasando una por una y comprobando diferencias y similitudes en lo propuesto por diversos autores y estándares.

### 3.2.1. Identificación del Riesgo

Existen fuentes generales de riesgos, como los que surgen de los tipos de incertidumbre estudiados (Hillson, 2014). La revisión realizada por Hong *et al.* (2016) muestra que las principales fuentes generales de riesgos son suposiciones, parámetros y modelos<sup>3</sup>. Los autores proponen evaluar la incertidumbre mediante los métodos de análisis de escenario, DQI, técnicas *fuzzy*, estadística bayesiana, análisis de sensibilidad y enfoque posibilista y probabilístico<sup>4</sup>.

Por otro lado, además de estudiar los riesgos generales, existen riesgos específicos para el sector de los proyectos de construcción. Asimismo, El-Sayegh (2008), evalúa la repercusión de los riesgos generales en los proyectos de construcción, así como el análisis que realizan Sonmez, Ergin y Birgonul (2007). De ambas, se extrae la idea de que existen riesgos inherentes al proyecto en cuestión, y otros riesgos ambientales externos a la organización del proyecto (F.Acebes *et al.*, 2021).

Por su parte, Idrus, Fadhil Nuruddin y Rohman (2011) dividen los riesgos de un proyecto de construcción en internos y externos, ajustándolos a cada caso particular. A pesar de que reconocen que existen riesgos generales que afectan a todos los proyectos de construcción, tales como crisis monetarias, bancarrota del promotor y desastres naturales como terremotos y tsunamis, no los incluye en su análisis porque normalmente no tienen mucha relevancia en los procesos de licitación. Las clasificaciones propuestas por los diversos autores se pueden observar en la Tabla 6.

Otros autores han incorporado riesgos específicos de la construcción, junto con otros riesgos, a al análisis de sus proyectos. Así, Zhi (1995) resalta la necesidad de incorporar una visión global macronivel sobre la situación política y económica de la región donde tenga lugar un proyecto.

Para ello, el autor desagrega en niveles los riesgos desde aquellos específicos para el País o Región, la Industria de la Construcción, la Organización o Compañía y el Proyecto específico (*Nation/Region, Construction Industry, Company and Project*). A su vez, el autor recomienda incluir en los análisis de riesgos la incertidumbre derivada de las particularidades locales y

---

<sup>3</sup> *Assumption, Parameter and Model.*

<sup>4</sup> *Scenarios analysis, DQI, Fuzzy theory, Analytical uncertainty propagation, Bayesian statistics, Possibilistic approach, Probabilistic approach and Sensitive analysis.*

regionales, entendiendo como riesgos específicos de la industria de la construcción las fluctuaciones del mercado, las leyes y regulaciones, sistemas contractuales y la existencia de estándares y códigos de buenas prácticas (*Market Fluctuations, Law and Regulations, Standards and Codes and Contract System*).

Por su parte, Han y Diekmann (2001) divide el riesgo total en cinco categorías: Políticos, Económicos, Culturales y Legales, Tecnológicos y de Construcción y Otros riesgos generales (*Political, Economic, Cultural/Legal, Technological/Construction and Other Risks*). Específicamente, los riesgos de construcción surgen al entrar en el mercado internacional de la construcción y las diferencias entre el lugar de origen de la compañía y la ubicación del proyecto de construcción.

Bu-Qammaz, Dikmen y Birgonul (2009) profundizan en esa comparación entre distintos países, creando una categoría específicamente para ello. Los autores dividen el riesgo general en las categorías de riesgos de País, Diferencias entre Países, Equipo de Proyecto, Construcción y Contractual (*Country, Inter-Country, Project Team, Construction and Contractual*).

Otro aspecto importante en los procesos de producción es la cadena logística de suministro. Por ello, Gosling, Naim y Towill (2013) identifican cinco fuentes de incertidumbre en las cadenas de distribución: control, requisitos, aspectos externos, procesos y proveedores (*control, demand, external, process, and supply uncertainties*). Si en la Tabla 6 hemos incluido factores generales del riesgo internos y externos, en la Tabla 7 se relacionan los riesgos específicos para los proyectos de construcción que recoge la distinta bibliografía.

**Tabla 6 Clasificaciones de Riesgos propuesta por diversos autores.**

<b>Autor</b>	<b>Principales riesgos</b>	<b>Factores de riesgo</b>
El-Sayegh (2008)	Riesgos internos	Propietarios Diseñadores Contratistas Subcontratistas Proveedores
	Riesgos externos	Político Social & cultural Económico Natural Otros
Sonmez, Ergin y Birgonul (2007)	Factores de riesgo del proyecto	General Contrato Diseño Contratista Financiero Sitio Asociación
	Factores de riesgo del país	Financiero Político Administración Leyes y Reglamentos Recursos Potencial de mercado
Idrus, Fadhil Nuruddin y Rohman (2011)	Riesgos internos	Seguridad Indisponibilidad o recursos Conflicto laboral Materiales defectuosos Fallo del equipo Calidad del trabajo Mala administración
	Riesgos externos	Diferente condición del sitio Condiciones climáticas Cambio en la política gubernamental Impacto social Cambios en la condición económica Retraso en el pago Retrasos de terceros

**Tabla 7 Clasificación de Riesgos de Construcción propuesta por diversos autores**

<b>Autor</b>	<b>Riesgos generales</b>	<b>Riesgos de construcción</b>
Zhi (1995)	Nación/región	Fluctuaciones del mercado
	Industria de la construcción	Ley y Reglamentos
	Compañía	Normas y códigos
	Proyecto	Sistema de contratos
Han y Diekmann (2001)	Riesgos políticos	Diferencias geopolíticas
	Riesgos económicos	Cuestiones laborales, habilidades o huelgas
	Cultural/legal	Disponibilidad de materiales
	Técnico/construcción	Disponibilidad de subcontratistas
	Otros riesgos	Diferente estándar Sistema de medición diferente Requisito nacional
Bu-Qammaz, Dikmen y Birgonul (2009)	País	Condiciones físicas adversas
	Entre países	Diseño
	Equipo del proyecto	Complejidad Gerencial
	Construcción	Escasez de recursos financieros de los clientes
	Contractual	Complejidades técnicas y tecnológicas Indisponibilidad de subcontratistas Falta de disponibilidad de recursos
Mahendra, Pitroda y Bhavsar (2013)	Riesgos técnicos	Productividad laboral
	Riesgos de construcción	Conflictos laborales
	Riesgos físicos	Condición del sitio
	Riesgos organizacionales	Fallos de los equipos
	Riesgos financieros	Cambios de diseño
	Riesgos sociopolíticos	Estándar de calidad demasiado alto
Lee <i>et al.</i> (2017)	Riesgos ambientales	Nuevas tecnologías
	Riesgos políticos	Tipo de edificio
	Riesgos económicos	Tipo de construcción
	Riesgos sociales y culturales	Tipo de contrato para el pago
	Riesgos de construcción	Complejidad de la construcción
	Otros riesgos	Duración de la construcción Fuerza mayor Competencia del Director del Proyecto Cambios del propietario
Hosny, Ibrahim y Fraig (2018)	Riesgos externos	Falta de gestión de la calidad (planificación, aseguramiento y control)
	Riesgos de diseño	Errores laborales, trabajo y tiempos de inactividad
	Riesgos de gestión	Administración
	Riesgos de construcción	Conflictos laborales y conflictos laborales
	Subcontratistas riesgos	Cuestiones de seguridad
	Riesgos del equipo	Fluctuación de los costes laborales
	Riesgos políticos y gubernamentales	Errores de topografía y manejo del sitio
	Riesgos económicos	
Riesgos generados por el propietario		

### 3.2.2. Evaluación del Riesgo

Los principales estándares en Dirección de Proyectos (AXELOS, 2017; Project Management Institute, 2017; European Commission, 2018; ISO 31000, 2018) proponen comenzar con un análisis cualitativo del riesgo para, posteriormente, si la madurez de la organización es la adecuada, proceder a un análisis cuantitativo del riesgo, ya que solo aquellas organizaciones con un alto grado de madurez organizacional podrán realizar este tipo de análisis de forma óptima y provechosa (Cagliano, Grimaldi y Rafele, 2015).

El estudio llevado a cabo por Hong *et al.* (2016) dice que la integración de los métodos de análisis cualitativo y cuantitativo generan una posible solución a la gestión de la incertidumbre. (“*integration of qualitative and quantitative assessment methods provides a possible solution for assessing the uncertainty*”).

Gosling, Naim y Towill (2013) divide su proceso de evaluación del riesgo en tres fases: (1) identificar y (2) categorizar la incertidumbre e (3) identificar la severidad. La severidad es comprendida como la relevancia de la incertidumbre, compuesta por una matriz de posicionamiento de la probabilidad y el impacto de cada riesgo. Este procedimiento de gestión del riesgo es llevado a cabo por un comité de expertos que, mediante la realización de sesiones de *brainstorming*, consiguen llegar a un consenso sobre la probabilidad, impacto y severidad de cada riesgo.

### 3.2.3. Respuesta al Riesgo

En lo relativo al efecto que los riesgos generan sobre los objetivos del proyecto, en términos de impacto en duración y coste del proyecto, una amenaza sería aumentar los costes y plazos de entrega; mientras que una oportunidad se corresponde con reducir costes y la duración de las actividades (Fan, Lin y Sheu, 2008).

Si bien es cierto que en la literatura se habla de estrategias de respuesta individuales al riesgo, la práctica de combinar dichas estrategias es muy beneficiosa para la Gestión del Proyecto (Fan, Lin y Sheu, 2008). En dicho estudio se trata la elección de una estrategia de respuesta óptima hacia el riesgo mediante un modelo analítico. Minimizar el coste de implementación de la respuesta al riesgo es un objetivo claro, condicionado por la restricción de combinar las estrategias de respuesta.

#### 3.2.3.1 Acciones preventivas y correctivas

Sobre las acciones de respuesta al riesgo, Zhang y Fan (2014) resaltan la relevancia que tienen las acciones preventivas para asegurar la calidad, en detrimento de las acciones correctivas, las cuales ocurren cuando el riesgo ya ha ocurrido. Por el contrario, las acciones preventivas persiguen evitar la ocurrencia y minimizar el impacto negativo de las amenazas, al tiempo que aumentar la incidencia de las oportunidades.

En general, si un riesgo ocurre, la calidad de un proyecto se degradará y se cometerán retrasos en las entregas. Por ello, las estrategias de respuesta al riesgo tienen por objetivo minimizar la duración en exceso y asegurar la calidad, incurriendo en un aumento del coste. El precio que pagar por reducir, minimizar o, incluso, eliminar la variabilidad es un aumento de los costes de un proyecto.

Esto hace que la asignación de contingencias en coste sea una necesidad para conseguir el éxito del proyecto.

El Project Management Institute (2017) propone tres acciones de respuesta específicas para las amenazas – riesgos negativos: transferir, evitar y mitigar; y otras tres homologables para las oportunidades – riesgos positivos: compartir, explotar y mejorar. Además, existen otras dos respuestas comunes a ambas: aceptar y escalar. Los autores Zhang y Fan (2014) estudian las acciones estratégicas para el tratamiento de las amenazas, y su equiparable para las oportunidades descritas en la Tabla 8.

**Tabla 8 Acciones de Respuesta al Riesgo.**

<b>Respuesta de riesgo a las amenazas</b>	<b>Respuesta de riesgo a las oportunidades</b>
Escalar	Escalar
Aceptar	Aceptar
Transferencia	Compartir
Mitigar	Mejorar
Evitar	Explotar

La estrategia de ‘escalar’ está orientada a aquellas organizaciones con una amplia madurez en la gestión de carteras de proyectos. La acción de escalar se aplicaría a aquellos riesgos situados más allá de las competencias de la Dirección del Proyecto o fuera del alcance de este. Por otro lado, ‘aceptar’ implica que la severidad del riesgo es lo suficientemente baja como para no tomar ninguna decisión.

Transferir una amenaza, o compartir una oportunidad, implica conferir la responsabilidad total o parcialmente sobre las consecuencias de un riesgo a un tercero ajeno al proyecto, generalmente mediante la contratación de un seguro para eliminar amenazas, y una asociación temporal entre empresas para aprovechar las oportunidades.

Por su parte, las acciones mitigadoras actúan de dos formas: reduciendo la probabilidad o el impacto de una amenaza; mientras que la acción de ‘mejorar’ aumenta la probabilidad o el impacto de un evento positivo. Según los autores Zhang y Fan (2014), ambas son estrategias muy utilizadas para reducir la contingencia en coste, habida cuenta de que están enfocadas a reducir la incertidumbre.

Finalmente, ‘evitar’ implica la eliminación completa de la probabilidad de ocurrencia del riesgo. Generalmente, la acción a tomar está relacionada con extraer el riesgo del alcance. En contraposición, ‘explotar’ supone aumentar la probabilidad de ocurrencia al máximo posible, de tal forma que se garanticen los beneficios derivados de dicha oportunidad. Ambas respuestas necesitan una movilización de los recursos de la organización para reducir la incertidumbre.

## Capítulo 4 Estimación de las Contingencias de Coste

Este capítulo tiene como objetivo principal presentar y resumir el método desarrollado para la estimación de las contingencias de coste para la Gestión del Riesgo de los proyectos. A lo largo de todo este capítulo, se presentarán la estructura que vertebra este método y se desagregarán las distintas fases necesarias para ejecutar la Gestión del Riesgo, así como se describirán las interrelaciones que existen entre las fases propuestas. Asimismo, se comenzará introduciendo las contingencias de coste y analizando el tratamiento que distintos autores han aplicado al estudio de estas.

Al comienzo del proyecto, en la fase de planificación, existe una falta de datos e información, por lo que es necesario realizar una estimación de contingencias para evitar que el proyecto se desvíe en sus objetivos de coste (Kwon y Kang, 2019). El Project Management Institute (2017) diferencia las contingencias en dos categorías: reserva de contingencia para riesgos identificados (*known-unknowns*) y reserva de gestión para riesgos desconocidos (*unknown-unknowns*).

En lo referente a los costes de proyectos de construcción, Moret y Einstein (2016) tratan los costes de construcción como independientes entre sí. Profundizando en ello, los costes podrían no tener correlación entre ellos, o que esta exista de forma positiva o negativa.

En su estudio, afirma que la correlación entre costes ha de ser analizada para evitar una infravaloración de estos. Igualmente, la evaluación de los costes y duraciones de los riesgos en proyectos de construcción ha de ser abordada mediante la aplicación de tres métodos: porcentaje de contingencia y métodos de estimación cualitativos y cuantitativos.

La estimación de contingencias se puede llevar a cabo por multitud de métodos, siendo los más comunes la Simulación de Monte Carlo, la Regresión Estadística, Algoritmos Genéticos y el tradicional porcentaje (Baccarini, 2006; Thal, Cook y White, 2010; Baccarini y Love, 2014).

Del estudio de Lam y Siwingwa (2017) se pueden obtener las siguientes conclusiones: la asignación de contingencias de coste mediante un porcentaje determinado es un método difícilmente de defender o de justificar, ya que su origen radica en la observación y experiencia, haciendo inexistente la objetividad; mientras que un análisis de regresión estadística se ajusta mejor a modelos con información prácticamente nula o inexistente, como en las primeras fases de planificación de los proyectos.

El método de asignación porcentual de contingencias es muy común, seguido mayoritariamente por aquellas organizaciones con nula o escasa madurez con respecto al riesgo (Cagliano, Grimaldi y Rafele, 2015). El porcentaje utilizado puede modificar de un proyecto a otro o, incluso dentro del mismo proyecto: el porcentaje de asignación se puede establecer según el valor de la probabilidad de ocurrencia de los riesgos, en función del coste de cada uno de los WP a los que afectan (Allahi, Cassettari y Mosca, 2017).

Tanto la simulación de Monte Carlo (MCS), como los modelos de regresión son buenos métodos para estimar el presupuesto total del proyecto, aunque fallan en no considerar un análisis de los riesgos de coste (Kwon y Kang, 2019). Aun así, la simulación de Monte Carlo se ha demostrado válida para estimar y gestionar las contingencias de un proyecto (Barraza *et al.*, 2007). Los mismos

autores definen las contingencias en coste mediante la diferencia entre el máximo percentil de cada actividad, obtenidos mediante el método de Monte Carlo, y su coste esperado.

Otros autores proponen la creación de un modelo probabilístico que incorpore incertidumbre de costes para asignar las contingencias en función del nivel de confianza elegido (Touran, 2003). Sea como fuere, el valor de los percentiles con respecto a los resultados obtenidos de una simulación de Monte Carlo suele depender de la aversión al riesgo y del nivel de madurez organizacional, siendo un percentil P50, P70 y P80 los más utilizados (Eldosouky, Ibrahim y Mohammed, 2014), destacando el uso mayoritario del percentil P80 (Lorance y Wendling, 2001; Kwon y Kang, 2019; Traynor y Mahmoodian, 2019).

La estimación de las contingencias de coste han de llevarse a cabo desde un enfoque flexible y racional (Idrus, Fadhil Nuruddin y Rohman, 2011). Una forma de monitorear y controlar las reservas de contingencia se realiza mediante la Metodología del Valor Ganado (EVM).

En este sentido, Hammad, Abbasi y Ryan (2016b) proponen realizar la distribución de las contingencias mediante un estilo *top-down*. Esto implica calcular las contingencias totales necesarias del proyecto, para continuar con la asignación de una parte a cada paquete de la EDT (WBS).

En su estudio, se asignan las contingencias a cada WP en función de la incertidumbre que aportan al conjunto del proyecto, centrándose en la proporción en costes de cada actividad sobre el presupuesto total y si se encuentra en el camino crítico. Los mismos autores, Hammad, Abbasi y Ryan (2016a) exponen los resultados obtenidos de la puesta en marcha de su metodología en asignar las contingencias en un proyecto.

La importancia de asignar contingencias individualmente a cada paquete de trabajo de la WBS es destacada por Barraza, Asce y Bueno (2007). Se facilita la mejora, eficiencia y rapidez de la toma de acciones correctivas. A su vez, el proceso de gestión de las contingencias es más dinámico, siempre que se evite contar con el grueso de nuestra contingencia asignado al total del proyecto.

## **4.1 Estructura del Método Propuesto**

En este apartado se introducirán los pasos del proceso que forman parte de la estructura del método y las relaciones que se establecen entre ellos. Para ello, se tendrá en cuenta el análisis de la literatura realizado anteriormente sobre las fases de la Gestión del Riesgo.

La propuesta que planteamos para el cálculo de las contingencias de coste de los proyectos se dividirá en tres fases: (1) Identificación de riesgos, (2) Evaluación del riesgo y (3) Respuesta al riesgo, que se corresponden con las identificadas por Zhang y Fan (2014) como fases principales en los procesos de gestión del riesgo.

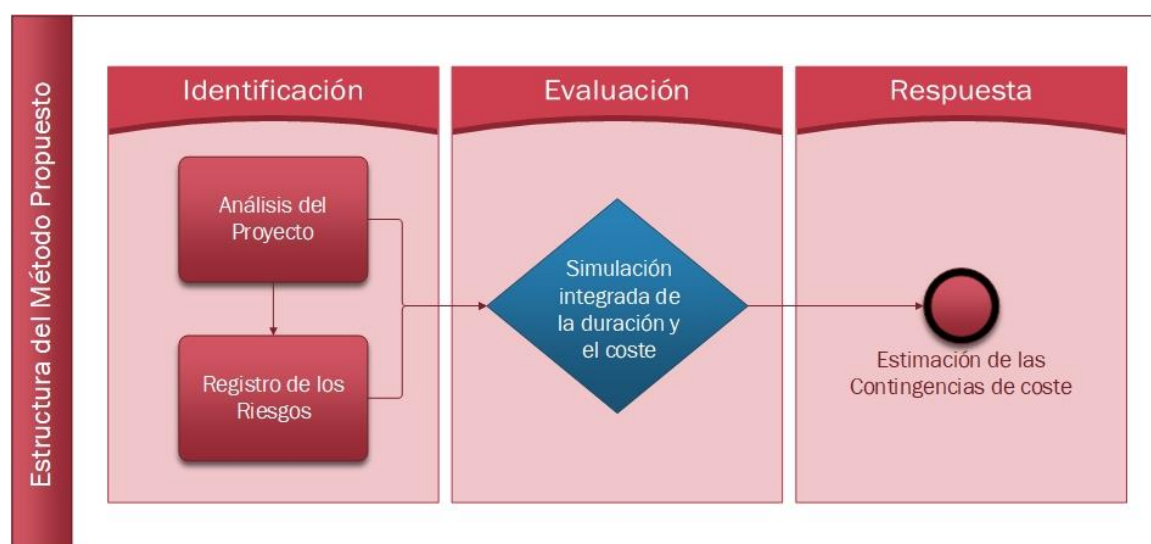
En cada una de las distintas fases, se llevan a cabo tareas para cumplir con el objetivo de cada fase y poder avanzar a la siguiente, del mismo modo a lo presentado en la Tabla 3. Para estimar las contingencias de coste de un proyecto, el proceso que sugerimos consta de las siguientes cuatro tareas: (1) análisis del proyecto, (2) registro de los riesgos, (3) simulación integrada de la duración y el coste y (4) análisis de resultados para la estimación de las contingencias de coste. Un diagrama de flujo del proceso propuesto por este método se describe en la Figura 1.



Para comenzar, en la fase de identificación se realizan dos tareas: (1) Análisis del Proyecto y (2) Registro de los Riesgos. Estas dos actividades se relacionan entre sí de forma directa, puesto que el Registro de los Riesgos (Tarea 1), se ve alimentado por la información extraída tras realizar un Análisis del proyecto (Tarea 2).

La primera tarea se encarga de analizar el proyecto para conocer las particularidades de este, el sector en el que se lleva a cabo, las actividades críticas, un análisis del presupuesto, proveedores y clientes, criterios de éxito y objetivos principales, así como los principales intereses de los *stakeholders* asociados. De toda la información que se puede extraer, habrá que prestar especial atención a la duración y coste de las actividades del proyecto, desengranando la duración en un análisis del cronograma y la composición del presupuesto.

El resto de la información del proyecto se utilizará para analizar el escenario en el que pueden surgir los riesgos del proyecto, focalizando el estudio en el sector en el que se opere, bien sea en proyectos de construcción, consultoría, transformación digital, proyectos industriales o de innovación, etc. Con toda la información obtenida y mediante el empleo de diversas técnicas de identificación de riesgos, se podrá elaborar un Registro de Riesgos y completar así la segunda tarea, realizando un estudio sobre la probabilidad y el impacto de la ocurrencia de los riesgos.



**Figura 1 Esquema del método propuesto.**

La Tarea 3, ‘Simulación integrada de la duración y el coste’, se enmarca en la fase de Evaluación del Riesgo. En ella, se empleará el método de la Simulación de Monte Carlo, o *Monte Carlo Simulation* (MCS), una técnica cuantitativa de evaluación del riesgo válida para incorporar los distintos tipos de incertidumbre que afectan al proyecto.

El objetivo que persigue este método es el de poder analizar posteriormente la probabilidad de alcanzar distintos escenarios y qué escenario es más probable de ocurrir. Se incorporará la probabilidad y el impacto asociado a cada riesgo, extraído del Registro de Riesgos realizado en la tarea anterior

Finalmente, en la Tarea 4, ‘Estimación de las Contingencias de Coste’, se realiza el análisis de los escenarios presumiblemente más factibles. De forma resumida, la Contingencia en Costes (CC) se

estima mediante la diferencia entre el coste aceptado como más probable menos el valor del coste planificado. El coste que se presupone más probable es resultado del análisis de la simulación realizada. Una explicación más detallada se expone en el apartado siguiente, donde se profundizará en las características de cada tarea y qué requerimientos implica.

## 4.2 Análisis del proyecto

El primer paso en el proceso de Gestión del Riesgo de un proyecto es analizar el proyecto con el que se está trabajando, centrándose en los términos que establece el Triángulo de Hierro (*iron triangle* o *triple constraint*) para la Dirección de Proyectos. Es decir, se trata de conocer al detalle el alcance, la duración, el coste y la calidad planificados (Chapman y Ward, 2003). De todos los factores para tener en cuenta, el alcance del proyecto fija la duración y el coste las actividades que son necesarias para completar con éxito el proyecto.

Dentro del alcance del proyecto, el Project Management Institute (2017) recomienda realizar una *Work Breakdown Structure* (WBS) o ‘Estructura de Desglose del Trabajo’ (EDT). La EDT está conformada por los Paquetes de Trabajo, o *Working Packages* (WP) y, a su vez, estos se componen de las actividades necesarias a realizar durante la ejecución del proyecto.

Cada una de las actividades de la WBS tiene su propio alcance y triángulo de Calidad – Tiempo – Coste. En este sentido, la calidad es normalmente medida de forma subjetiva; mientras que el coste y el tiempo pueden ser estimados objetivamente (Seyedhoseini, Noori y Hatefi, 2009). En este punto, debemos estudiar la duración y el coste de las actividades para poder incorporarlos a un análisis cuantitativo del riesgo.

### 4.2.1. Selección de herramientas *software*

Al final de esta fase, deberíamos contar con alguna herramienta para la programación de las actividades de un proyecto, como un diagrama de Gantt con camino crítico, *Critical Path Method* (CPM-Gantt). Esto nos permitirá construir un cronograma y conocer la precedencia, duración y holgura de las actividades, lo que nos permitirá estimar el camino crítico y las fechas de comienzo y finalización de las actividades.

Las programaciones CPM se pueden realizar con multitud de métodos y herramientas *software* (ver Tabla 9). Algunos de ellos, como Crystal Ball, o @RISK se pueden integrar como un complemento de Microsoft Excel. Otros como MS Project o Primavera son *softwares* independientes. La Simulación de Monte Carlo (MCS) es una técnica integrada en todos los mencionados anteriormente, a excepción de MS Project.

**Tabla 9 Principales *softwares* de estimación del camino crítico.**

<b>Software</b>	<b>Análisis CPM</b>	<b>Complemento de Excel</b>	<b>MCS</b>
Crystal Ball	✓	✓	✓
@RISK	✓	✓	✓
MS Project	✓	No	No
Primavera	✓	No	✓

Como este método propuesto necesita integrar la duración de las actividades, puesto que una mayor duración implica un mayor coste, lo recomendable sería escoger un paquete *software* capaz de realizar MCS de forma integrada. Otra opción – la escogida para poner en práctica este método – es desarrollar un módulo de MATLAB® que integre ambos análisis de duración y coste.

MATLAB® es la abreviatura de *matrix laboratory* o ‘laboratorio de matrices’. El lenguaje de programación del *software* MATLAB® trabaja principalmente con matrices, evitando procesar los números uno a uno. Por este motivo, se ha buscado la elaboración y presentación de la información en forma de tablas, lo que facilita el proceso de análisis de la simulación.

#### 4.2.2. Definición de los paquetes de trabajo (WP)

De la *Work Breakdown Structure* (WBS), o EDT, la cual forma parte del alcance, surgen los paquetes de trabajo o *Working Packages* (WP) y las actividades necesarias para la ejecución del proyecto. Las actividades que componen los paquetes del trabajo son definidas por su propio Triángulo de Hierro, estableciendo su propio alcance, duración y coste.

En este apartado, incorporaremos a la simulación solamente la duración y el coste de las actividades. Necesitamos, por tanto, definir el cronograma y el presupuesto general para cada paquete de trabajo con el objetivo de incorporar esa información a la simulación de Monte Carlo.

##### 4.2.2.1 Incertidumbre en la Duración del proyecto

La duración del proyecto viene definida por dos aspectos: la fecha de comienzo y la fecha de finalización. Del mismo modo que la fecha de comienzo del proyecto se corresponde con la fecha de inicio del paquete de trabajo que antes se ejecuta, la fecha de finalización coincide con la fecha de fin del paquete de trabajo que más tarde finaliza.

A su vez, los paquetes de trabajo están formados por un conjunto de actividades que se relacionan entre ellas y entre otras actividades pertenecientes a distintos paquetes de trabajo. La fecha de inicio de cada paquete de trabajo se corresponde con la fecha más temprana de comienzo de las actividades pertenecientes a estos; la fecha de finalización coincidiría con la fecha más tardía de finalización de las actividades de cada paquete.

A la duración de las actividades le afecta la incertidumbre identificada anteriormente como aleatoria. Es decir, la incertidumbre propia de las actividades del proyecto, las cuales se van a ejecutar y, por la propia naturaleza del proceso de estimación, se puede incurrir en errores de estimación.

Los métodos más comunes para tratar la incertidumbre forman parte de las técnicas cuantitativas de Gestión de Riesgos (Hillson, 2014; Padalkar y Gopinath, 2016). Al igual que lo que proponen Alleman, Coonce y Price (2018b), el objetivo último de este método es asignar un margen de contingencia para el coste total del proyecto.

En este proyecto, los parámetros que mediremos para realizar la evaluación del riesgo serían la duración de las actividades y el coste asociado a cada una de ellas. La duración de las actividades se puede modelar mediante funciones de distribución probabilísticas (Acebes *et al.*, 2014). En el

apartado 4.4 Simulación integrada de la duración y el coste, se explicará cómo incorporar la incertidumbre aleatoria en duración y la duración de las actividades al modelo de simulación.

La duración se establece como el tiempo que transcurre entre la fecha de comienzo y la fecha de finalización del elemento del que se trate: proyecto, paquete de trabajo o actividad. Las unidades de medida de la duración dependerán del tipo de proyecto, del sector en el que se opere, del nivel de detalle deseado, de la madurez de la organización, etc.

Una plantilla para recoger la información relativa a la duración de las actividades se encuentra en la Tabla 10, en donde se identifica la actividad y se añadirá la siguiente información: el tipo de función de distribución de probabilidad (PDF) utilizado, el valor planificado o valor esperado de la duración de cada actividad.

Dependiendo del tipo de PDF aplicado, se podrá incluir incertidumbre mediante la varianza, o bien se podrán establecer unos límites mínimos (Min) y máximos (Máx) para los posibles valores que se simularán, o bien el valor más probable (MP). Para concluir, han de señalarse las actividades precedentes a cada una en la columna de 'Precedencias'.

**Tabla 10 Duración e incertidumbre en las actividades.**

ID	Actividad	Tipo de PDF	Valor planificado	Varianza	Min	MP	Máx	Precedencias
A1								
A2								
A3								
...								
	<i>Proyecto</i>							

#### 4.2.2.2 Incertidumbre en el Coste del proyecto

El coste de un proyecto puede ser definido como la suma de los costes de las actividades que lo forman. Algunos *softwares* permiten incluir análisis de costes y dividirlos en distintos tipos: coste fijo total, fijo por uso de un recurso determinado, variable total, variable por la duración de un recurso determinado, coste por materia prima, coste por adquisiciones, etc.

Para facilitar la incorporación de la incertidumbre a la simulación, el coste del proyecto se dividirá en dos categorías: coste fijo y coste variable. La suma de ambos supondrá el coste total del proyecto, que será medido en las unidades monetarias en las que se trabaje. En la Tabla 11 se identifica a la actividad y se incluyen sus costes fijos y variables. El coste total se corresponde con la suma de ambos.

El coste fijo es equivalente a la suma de los costes fijos debidos al uso de un recurso determinado, el coste de adquisición, etc. Por otro lado, el coste variable es el coste asociado a la duración efectiva, siendo esta el tiempo necesario para realizar un determinado trabajo.

Por ejemplo, en un proyecto de construcción, cierta maquinaria tiene un coste fijo, debido a su alquiler, y otros costes variables e imputables al tiempo de uso de la maquinaria (coste de operarios, etc.). El coste total sería la suma de todos los costes identificados.

**Tabla 11 Coste variable, coste fijo y coste total de las actividades.**

ID	Actividad	Coste Variable	Coste Fijo	Coste Total
1				
2				
3				
...				
	Proyecto			

Igual que se ha hecho con la duración, se podría haber modelado el coste con funciones de distribución. En nuestro caso, modelamos el coste para que dependa de la duración de las actividades: la incertidumbre en la duración se traspasa al coste.

A partir de esta asociación, si la duración tiene incertidumbre, lo tendrá también el coste. La parte del coste que se vincula a la incertidumbre de la duración es el coste variable. El coste fijo es independiente y depende únicamente de la naturaleza de cada actividad.

### 4.3 Registro de los riesgos

La *Recommended Practice* (AACE International, 2011) recomienda realizar un ‘registro de riesgos’ tal que se mantenga actualizada la información correspondiente a un riesgo. Para comenzar, lo primero es identificar el riesgo que hemos de tratar.

Posteriormente, es necesario incluir aquellas actividades o paquetes de trabajo que se vean afectados por la ocurrencia del riesgo, pudiendo darse el caso de que sea afectado el proyecto en su conjunto. Para finalizar, se incluirán los detalles de la probabilidad de ocurrencia y su impacto en materia de coste y duración del conjunto de actividades afectadas.

#### 4.3.1. Identificación de riesgos

Para el proceso de identificación, la información relativa a los riesgos se recaba mediante talleres *workshops* y entrevistas con expertos en riesgos (AACE International, 2011; Van, Le-Hoai y Dang, 2019). Otra forma de identificar riesgos, así como de complementar la información del registro con un desglose de costes, duración, calidad, alcance y actividades o paquetes de trabajo afectados (Seyedhoseini, Noori y Hatefi, 2009), es mediante referencia a proyectos análogos, lecciones aprendidas de otros proyectos de la organización, estimaciones ingenieriles, aplicación de juicio de expertos, estudios de mercado e información facilitada por proveedores y subcontratas, entre otros (AACE International, 2011; Cagliano, Grimaldi y Rafele, 2015).

Una vez que hemos creado nuestra primera lista de riesgos, otros autores proponen desarrollar una *Risk Breakdown Structure* (RBS) en varios niveles, de acuerdo a las necesidades del proyecto (Hillson, 2003; El-Sayegh, 2008). En ese sentido, lo más común es establecer una RBS jerárquica, imitando la estructura de la WBS con el objetivo de organizar las diferentes categorías del riesgo (Han y Diekmann, 2001; El-Sayegh, 2008; Hillson, 2009).

El objetivo es identificar riesgos individuales, organizados por categorías, para estudiar cómo pueden afectar a una o varias actividades y paquetes de trabajo de la *Work Breakdown Structure* (WBS) del proyecto, en aras de generar claridad (Moreno-Cabezali y Fernandez-Crehuet, 2020). Las herramientas utilizadas deben enfocarse a lograr este objetivo.

El uso de la RBS está muy extendido (Hillson, 2003). Lee *et al.* (2017) realizan una RBS integrando la información del tipo de riesgo y unidades de medida. Este aspecto resulta muy útil cuanto mayor es el grado de desconocimiento de un riesgo, pues permite acotar el impacto que podría generar en un proyecto.

Otros autores desarrollan su propia *Risk Breakdown Structure* adaptada a las particularidades de cada proyecto. De este modo, Bu-Qammaz, Dikmen y Birgonul (2009) generan una RBS para identificar riesgos en proyectos de construcción internacionales, *International Construction Project Risk*, (ICPR). Igualmente, Hosny, Ibrahim y Fraig (2018) la utilizan para reconocer las causas y los efectos de los riesgos.

Sea cual sea el método utilizado, proponemos anotar la identificación de los riesgos mediante la plantilla expuesta en la Tabla 12. En ella, se identificarán los riesgos con un identificador único ID, se les nombrará siguiendo la columna 'Riesgo' y se explicará brevemente en qué consiste dicho riesgo. A continuación, se rellenará la casilla 'Tipo (A/O)' en función de si se trata de una amenaza (A) o una oportunidad (O).

Por último, se nombrarán las actividades y/o los paquetes de trabajo que se verían afectados por la ocurrencia del riesgo, indicando su identificador ID y el nombre de dichos paquetes de trabajo involucrados. En el apartado siguiente, se estudiará la probabilidad de ocurrencia y el impacto de los riesgos previamente identificados y anotados en la anterior tabla.

**Tabla 12 Identificación, explicación y clasificación del riesgo.**

ID Riesgo	Consecuencias	Tipo (A/O)	ID Actividad afectada
1			
2			
3			
...			

#### 4.3.2. Gestión de la Incertidumbre de la Probabilidad y el Impacto

Para comenzar, la probabilidad de un riesgo se define por una función de distribución de probabilidad, la cual debe reflejar de la manera más realista posible el porcentaje de probabilidad de ocurrencia de dicho evento (Baccarini y Love, 2014). Lo mismo ocurre con el impacto, diferenciándose por el área al que afecta, ya sea el coste o la duración.

La forma de incorporar estas variables a una simulación de Monte Carlo es mediante funciones de distribución de probabilidad, las cuales son las encargadas de modelar la incertidumbre. Las funciones de distribución pueden medirse en distintas unidades.

De este modo, la probabilidad será medida por un porcentaje (%), el coste será medido en unidades monetarias, y la duración será medida en unidades temporales, bien sean horas, días, semanas, etc. Estas unidades de medida de la duración dependerán de la naturaleza propia del proyecto.

Dependiendo del tipo de riesgo del que se trate, este surgirá de algún tipo de incertidumbre identificado en la revisión del estado del arte (Capítulo 2, Marco teórico). Así, se distinguen tres tipos de incertidumbre que son susceptibles de ser modeladas e incorporadas a una simulación de Monte Carlo: incertidumbre aleatoria, incertidumbre epistémica e incertidumbre ontológica. La incertidumbre modelada se convertirá en las entradas del método de Monte Carlo, en forma de probabilidad, duración y coste.

#### **4.3.2.1 Incertidumbre aleatoria**

La incertidumbre aleatoria surge de la variabilidad (Chapman y Ward, 2004; Alleman, Coonce y Price, 2018b). Es decir, la aleatoriedad propia de un sistema o de su entorno generan la incertidumbre aleatoria. Este hecho, partir de un sistema o del entorno que lo rodea, supone que sea irreducible y que la única forma de tratar con ella es mediante la asignación de un margen de contingencias (Alleman, Coonce y Price, 2018b).

La forma más común de modelar la incertidumbre aleatoria para la duración de las actividades es mediante las funciones de distribución probabilísticas (Acebes *et al.*, 2014): Beta, Triangular, Normal y Uniforme, mientras que la variabilidad del coste se ha modelado con funciones Beta, Triangular, Lognormal, y Pearson-type (Ordóñez Arízaga, 2007).

Un análisis sobre las funciones de distribución probabilísticas, o *Probability Distribution Function (PDF)*, más utilizadas en incorporar la variabilidad derivada de la incertidumbre aleatoria es expuesta en la Tabla 4. Todas ellas tienen en común el uso de la simulación de Monte Carlo como la herramienta con la que llevar a cabo el estudio de la gestión de riesgos.

Incorporaremos la incertidumbre aleatoria en la duración de las actividades. Para los riesgos identificados durante el proceso de identificación del riesgo, incorporaremos, además, la incertidumbre epistémica y estocástica.

#### **4.3.2.2 Incertidumbre epistémica**

La incertidumbre epistémica surge de la falta de conocimiento e información de un sistema o de su entorno (Alleman, Coonce y Price, 2018b; Damnjanovic y Reinschmidt, 2020). Hulett (2012) propone tratar la incertidumbre epistémica como una función triangular para facilitar su incorporación a un modelo de simulación.

En este modelo, dependiendo de la estrategia con respecto al riesgo que siga la organización -más o menos agresiva en relación con la aversión al riesgo-, los límites superior e inferior de una función triangular sufrirán modificaciones, pudiéndose establecer distintas categorías semánticas prefijadas.

La definición matemática de las categorías semánticas tiene relación con la aversión o el apetito al riesgo de cada organización. Hulett (2012) propone modelar las categorías con funciones triangulares. Para establecer un método de asignación de los límites de cada intervalo para el impacto, propone el aumento del valor planificado para la duración y el coste. El aumento al que se somete tiene relación con la aversión al riesgo de la organización (ver Tabla 13).

A pesar de que la incertidumbre epistémica alude a una falta de conocimiento, la probabilidad y el impacto pueden ser asignados a un rango de valores. Cada intervalo de este rango está asociado a una definición semántica, específica para cada proyecto y el contexto en el que se desarrolle.

**Tabla 13 Variaciones de los valores proporcionales según Hulett (2012).**

Nivel de aversión al riesgo	Mínimo (%)	Más probable (%)	Máximo (%)
Muy bajo	50	100	100
Bajo	75	100	105
Medio	90	100	110
Alto	95	100	125
Muy alto	100	100	150

El número de niveles puede ser del tamaño que el modelador considere porque reflejan la aversión al riesgo de cada organización (Project Management Institute, 2017). Un ejemplo cada uno de los cinco niveles: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, incluyendo un sexto nivel como ‘riesgo nulo’, se expone en la Figura 2.

La incertidumbre epistémica ha sido tradicionalmente tratada mediante técnicas *Fuzzy* (Curto *et al.*, 2020). En ellas, se definen intervalos que generalmente se solapan, pues son técnicas orientadas a tratar riesgos donde no se tiene muy claro qué categoría se les ha de asignar. Sin embargo, los intervalos pueden ser consecutivos si no se aplican estas técnicas (ver Figura 2).

ESCALA	PROBABILIDAD	+/- IMPACTO SOBRE LOS OBJETIVOS DEL PROYECTO		
		TIEMPO	COSTO	CALIDAD
Muy alto	>70%	>6 meses	>\$5M	Impacto muy significativo sobre la funcionalidad general
Alto	51-70%	3-6 meses	\$1M-\$5M	Impacto significativo sobre la funcionalidad general
Mediano	31-50%	1-3 meses	\$501K-\$1M	Algún impacto sobre áreas funcionales clave
Bajo	11-30%	1-4 semanas	\$100K-\$500K	Impacto menor sobre la funcionalidad general
Muy bajo	1-10%	1 semana	<\$100K	Impacto menor sobre las funciones secundarias
Nulo	<1%	Sin cambio	Sin cambio	Ningún cambio en la funcionalidad

**Figura 2 Ejemplo de definición de escalas para la probabilidad y el impacto. Fuente: Project Management Institute (2017)**

En función del número de niveles que apliquemos, obtendremos intervalos más o menos precisos. A su vez, esto provoca que aumente o disminuya la dificultad de decidir en qué intervalo incluimos las decisiones que se toman sobre el riesgo. En nuestro método, utilizaremos la asignación de escalas de probabilidad e impacto según propone el Project Management Institute (2017), aunque se modificarán los valores para cada intervalo.

Cada intervalo tiene una definición específica para cada proyecto. En el ejemplo de la Figura 2, observamos que para los riesgos con una probabilidad ‘muy baja’ se estima su ocurrencia en un máximo del 10% de las ocasiones.



De forma independiente, para ese mismo riesgo podría asignarse un impacto alto en duración, lo que supondría una diferencia de entre 3 y 6 meses a lo planificado; mientras que su impacto en costes podría ser situado en cualquier otra categoría, bien sea nulo, muy bajo, bajo, medio, etc. Por consiguiente, cuando no se cuente con información exacta sobre un riesgo, se puede asignar cada variable (probabilidad, impacto en duración e impacto en costes) con una mayor facilidad a una categoría semántica previamente definida.

Sobre la idea de modelar la incertidumbre epistémica de los riesgos como funciones de distribución estadística existen autores que utilizan 3 categorías semánticas, mientras que otros utilizan 5 categorías (ver Tabla 14), correspondientes al número de intervalos para la probabilidad y el impacto, el método utilizado para evaluar los riesgos y las funciones de distribución probabilística que emplean para definir y modelar cada categoría semántica.

**Tabla 14 Incertidumbre Epistémica: Funciones de distribución y número de intervalos.**

Autor	Número de Intervalos	Método	PDF
Han y Diekmann (2001)	5	Go/No-Go Decision Model	Triangular
El-Sayegh (2008)	5	Statistical Correlation	-
AACE International (2011)	-	MCS	Triangular
Idrus, Fadhil Nuruddin y Rohman (2011)	5	Fuzzy Expert System	-
Eldosouky, Ibrahim y Mohammed (2014)	-	MCS	Uniform
Allahi, Cassettari y Mosca (2017)	3	MCS	Triangular
EL-Matbaegy <i>et al.</i> (2017)	5	Statistical Correlation	-
Hosny, Ibrahim y Fraig (2018)	5	Probability & Impact Matrix	-
Moreno-Cabezali y Fernandez-Crehuet (2020)	5	Fuzzy Logic-Based Model,	-

Si podemos asignar una PDF al riesgo identificado, incluiremos los valores requeridos para poder simular cada función: valores mínimos, más probables y máximos, valores esperados y varianza asociada o el valor determinista conocido, conforme a la Tabla 15, para la probabilidad, y según la

Tabla 16 y la Tabla 17 para impacto en duración y en costes, respectivamente.

Dependiendo de las funciones de distribución que utilicemos para definir cada categoría semántica, tendremos que definir los límites de las categorías. En el ejemplo de la Figura 2, la probabilidad muy baja está comprendida en el intervalo del 1-10%; mientras que la probabilidad baja se encuentra entre el 11-30% y la probabilidad media entre el 31-50%.

Si el límite mayor del intervalo ‘muy bajo’ del ejemplo se sitúa en el 10%, superarlo implicaría pasar a la siguiente categoría, ‘probabilidad baja’. La probabilidad ‘baja’ (11-30%) comienza inmediatamente por encima del 10%. Por tanto, el límite superior de una categoría debería suponer el límite inferior de la siguiente.

En un ejemplo de aplicación práctica, Eldosouky, Ibrahim y Mohammed (2014) toman este modelo para definir la incertidumbre en la duración de las actividades del proyecto con algunas restricciones. Los límites de la función triangular, mínimo y máximo, se corresponderían con el 90% y el 110% del valor más probable estimado, respectivamente, lo que equivaldría al nivel medio de aversión al riesgo. Además, se pueden incluir funciones uniformes para algunos casos determinados. Este tipo de distribuciones sería una variante del modelo, en la cual coinciden los valores mínimo y máximo con el más probable.

**Tabla 15 Probabilidad para los riesgos identificados.**

ID	Riesgo	Probabilidad (%)				
		Tipo PDF	Valor esperado	Varianza	Min	MP
1						
2						
3						
...						

**Tabla 16 Impacto en la duración para los riesgos identificados.**

ID	Riesgo	Actividad afectada	Impacto en Duración (días)				
			Tipo PDF	Valor esperado	Varianza	Min	MP
1							
2							
3							
...							

**Tabla 17 Impacto en el coste para los riesgos identificados.**

ID	Riesgo	Actividad afectada	Impacto en Coste (EUR)				
			Tipo PDF	Valor esperado	Varianza	Min	MP
1							
2							
3							
...							

Así, cada organización debería establecer un rango de valores para los cuales definir la probabilidad y el impacto de los riesgos. En este método, proponemos establecer cinco niveles: Muy Bajo (MB), Bajo (B), Medio (M), Alto (A) y Muy Alto (MA) para la probabilidad, el impacto en duración y el impacto en costes (ver Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20, respectivamente), los tres elementos que incorporaremos a la simulación de Monte Carlo y que emulan a las propuestas por el Project Management Institute (2017) (ver Figura 2).

Los límites de los intervalos se definen previamente. De este modo, los expertos podrían determinar qué actividades se encuentran con un nivel de riesgo determinado. Si el riesgo es bajo, se espera que la actividad pueda realizarse con relativa normalidad. Por el contrario, si el riesgo es alto o muy alto, la actividad afectada y sus sucesoras se pondrían en una situación de peligro y no se podría asegurar su normal ejecución.

Estos valores mínimos y máximos de cada intervalo se corresponden con los valores que se llevarán a la PDF correspondiente, cuando llegue el momento de realizar la simulación. Al contar con dos valores (mínimo y máximo), se podrían modelar como funciones de distribución uniforme.

**Tabla 18 Plantilla de niveles para la probabilidad (%).**

Nivel	Observaciones	Probabilidad (%)
Muy Bajo (MB)	Impacto menor sobre funciones secundarias	Mín MB – Máx MB
Bajo (B)	Impacto menor sobre la funcionalidad general	Mín B – Máx B
Medio (M)	Algún impacto sobre áreas funcionales claves	Mín M – Máx M
Alto (A)	Impacto significativo sobre la funcionalidad general	Mín A – Máx A
Muy Alto (MA)	Impacto muy significativo sobre la funcionalidad general	> Máx A

**Tabla 19 Plantilla de niveles para el impacto en duración.**

Nivel	Observaciones	Impacto en Duración
Muy Bajo (MB)	Impacto menor sobre funciones secundarias	Mín MB – Máx MB
Bajo (B)	Impacto menor sobre la funcionalidad general	Mín B – Máx B
Medio (M)	Algún impacto sobre áreas funcionales claves	Mín M – Máx M
Alto (A)	Impacto significativo sobre la funcionalidad general	Mín A – Máx A
Muy Alto (MA)	Impacto muy significativo sobre la funcionalidad general	> Máx A

**Tabla 20 Plantilla de niveles para el impacto en costes.**

Nivel	Observaciones	Impacto en Costes
Muy Bajo (MB)	Impacto menor sobre funciones secundarias	Mín MB – Máx MB
Bajo (B)	Impacto menor sobre la funcionalidad general	Mín B – Máx B
Medio (M)	Algún impacto sobre áreas funcionales claves	Mín M – Máx M
Alto (A)	Impacto significativo sobre la funcionalidad general	Mín A – Máx A
Muy Alto (MA)	Impacto muy significativo sobre la funcionalidad general	> Máx A

#### 4.3.2.3 Incertidumbre estocástica

La incertidumbre de eventos o incertidumbre estocástica se basa en la ocurrencia de eventos con consecuencias conocidas (Hillson, 2020). Se trata de aquellos eventos en los que conocemos o podemos asegurar con cierta precisión la probabilidad o el impacto asociado a la ocurrencia del evento.

La forma más común de tratar este tipo de incertidumbre es mediante el estudio de los futuros posibles escenarios estadísticamente más probables, posicionando a la simulación como una buena alternativa en la estimación de posibles contingencias (Hillson y Simon, 2012).

La incertidumbre estocástica se da en riesgos en los que conocemos su probabilidad de ocurrencia o su impacto asociado con manifiesta certeza. En otras palabras, no tenemos dudas de la probabilidad ni del impacto que generaría en nuestro proyecto, y ocurriría si ese riesgo se materializa.

Así lo han modelado Kwon y Kang (2019) y utilizado en una simulación de Monte Carlo, en la que asignan un porcentaje determinado a la probabilidad de ocurrencia de los riesgos identificados. Del

mismo modo que se ha modelado el resto de los tipos de incertidumbre, la incertidumbre estocástica también se define por una función de distribución.

#### **4.4 Simulación integrada de la duración y el coste**

En este apartado se abordará el procedimiento de incluir la información recabada en el *software* donde implantemos la simulación de Monte Carlo. Primeramente, se comenzará con la información relacionada con el proyecto. Posteriormente, se incorporarán los riesgos y, finalmente, se realizará la simulación y se analizarán los resultados.

Independientemente del *software* con el que realizaríamos la simulación de Monte Carlo, primeramente, se incluirán las actividades del proyecto, junto a sus precedencias, duraciones y costes asociados. Todos los *softwares* planteados para la realización de la simulación necesitan que inicialmente se incluya la información del proyecto, ya sea Crystal Ball, @RISK, MS Project, Primavera, o el módulo de MATLAB® desarrollado *ad hoc*.

En este punto, lo ideal sería realizar una simulación previa a la inclusión de los riesgos. El objetivo de este paso intermedio es poder comparar los resultados esperados y estudiar la diferencia que puede existir entre incluir los riesgos o no hacerlo.

Dependiendo del *software* utilizado, deberíamos encontrar la forma de modelar la probabilidad y el impacto de cada uno de los riesgos, habida cuenta de las particularidades de cada aplicación informática. El desarrollo del módulo de MATLAB® que se propone para implementar el método propuesto en este trabajo se encuentra fuera del alcance de este, por lo que no será expuesto.

Una vez alcanzado este punto, repetiremos la simulación incorporando todos los tipos de incertidumbre del mismo modo al establecido en este capítulo. Las conclusiones serán expuestas a continuación, en el capítulo siguiente.

#### **4.5 Análisis de resultados y estimación de contingencias**

En este método, se analizarán los distintos percentiles y se analizará cuál de ellos se puede ajustar en mejor medida al apetito al riesgo de cada organización. Para ello, se comparará la utilización de un percentil P50 con el percentil P80 y otros valores destacados para la estimación de las contingencias de coste.

La aplicación de MATLAB® nos permitirá obtener los percentiles más destacados de la simulación de Monte Carlo y las gráficas de distribución acumulada para la duración y el coste. Las gráficas obtenidas serán analizadas utilizando la tabla de resultados para cada percentil. El objetivo principal consiste en establecer las contingencias de coste para el análisis de los riesgos identificados.

Además, se compararán los resultados obtenidos de los escenarios futuros más probables con los resultados planificados para una ejecución del proyecto en el que no ocurrirían los riesgos. Este paso ayudará a comprender la relevancia que tiene el riesgo externo en los proyectos y cuán importante es practicar una gestión integral del riesgo.

Dichos escenarios futuros más probables vienen dados por los valores para la duración y el coste estimados para cada percentil seleccionado. Por otro lado, el objetivo principal es definir un percentil adecuado para las contingencias de coste y compararlo con las contingencias que

obtendríamos si siguiésemos el método tradicional de reservar un porcentaje determinado sobre el coste total.

El método tradicional está enfocado hacia proyectos generales, por lo que obvia cualquier particularidad debida al contexto del proyecto. Este trabajo persigue incluir esas particularidades a la hora de seleccionar una reserva presupuestaria para hacer frente a los riesgos que se generen a lo largo del ciclo de vida del proyecto.



## **Capítulo 5 Caso de Estudio: Proyecto de Construcción del Aulario IndUVA**

En este capítulo se expondrá el caso de estudio aplicado para la aplicación del método propuesto en este trabajo. El objetivo principal es seguir los pasos y procesos expuestos en los capítulos anteriores y analizar los resultados para estimar las contingencias de coste. A medida que se desarrolle el capítulo, se desagregará la información obtenida de un proyecto real de construcción.

Este capítulo se organizará como sigue: primeramente, se realizará un análisis del proyecto y su entorno, su composición, sector económico en el que opera, etc. Posteriormente, se presentará la herramienta utilizada para realizar la simulación de Monte Carlo. Seguidamente, se definirá la incertidumbre en las actividades, analizando la duración y el coste de estas y de los paquetes de trabajo asociados.

A continuación, se realizará el análisis de los riesgos del proyecto. Comenzando por la identificación de nuevos riesgos, se hará un estudio sobre la probabilidad de ocurrencia y el impacto asociado en materia de duración y coste junto con la gerencia de la empresa tenedora del proyecto. Para concluir el capítulo, se presentarán y analizarán los resultados obtenidos del proceso de simulación para obtener un valor de contingencias en coste.

### **5.1 Análisis del proyecto**

El objetivo de este primer paso es establecer unas líneas generales de alcance, duración y coste del proyecto objeto de estudio. En este apartado, se presentará el proyecto y sus objetivos particulares, partiendo de un análisis de antecedentes históricos y el contexto en el que se produce el proyecto, así como el sector económico en el que opera.

El proyecto de estudio consiste en la construcción del edificio Aulario de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Valladolid, IndUVA. El edificio se encuentra dentro de la delegación territorial de la Escuela de Ingenierías Industriales (EII) de la Universidad de Valladolid (UVA).

El Aulario IndUVA, sito en Paseo de Prado de la Magdalena s/n, 47011 Valladolid (España), se ubica en el ala norte de la sede Mergelina de la EII, antigua Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid, un campus en rehabilitación de aproximadamente 6000 metros cuadrados. La construcción original data de 1969, aunque en el año 1989 se realizaron una serie de reformas importantes. El nuevo edificio se inauguró oficialmente el 10 de septiembre de 2018.

En contraste con la antigua construcción, la cual contaba con siete plantas sobre rasante de diseño irregular, el nuevo torreón cuenta con un total de cinco plantas y dispone de 34 aulas destinadas a la docencia, con una capacidad máxima que alcanza los 2500 estudiantes

El Aulario IndUVA ha sido diseñado con los más altos estándares de sostenibilidad y cuenta con numerosos reconocimientos de construcción sostenible, entre los que destacan la clasificación EECN, Edificio de Consumo de Energía prácticamente Nulo, y la consecución con la máxima

puntuación en Certificación Verde de GBCe, un sello de calidad y sostenibilidad de elevado prestigio.

Por tanto, el proyecto consiste en la construcción de un nuevo edificio energéticamente sostenible en un campus universitario en plena rehabilitación, lo que dificulta el aislamiento térmico y acústico. Para conseguirlo, se han llevado a cabo técnicas pioneras e innovadoras de construcción y materiales de última generación en la ciudad de Valladolid (España), lo que ha permitido alcanzar altas cotas de calidad.

La construcción fue llevada a cabo por la empresa SANJOSE Constructora, una prestigiosa empresa española del sector de la construcción, con delegación territorial local en calle Juan Martínez Villergas, 8 – Entreplanta, 47014, Valladolid (España). Tras más de 50 años de historia, actualmente se sitúa en el puesto 128 del ranking mundial *Top International Contractors* de la prestigiosa revista estadounidense *Engineering News-Record (ENR)*.

Para la realización de este trabajo, trabajamos junto con el gerente del proyecto de construcción del Aulario IndUVa, D. Alberto Sánchez Barbero y su equipo de trabajo. Además, conformamos un Comité de Análisis del Proyecto junto con D. Carlos Alfonso Herguedas Pastor, arquitecto técnico de la Universidad de Valladolid, promotora de la obra. Esto nos permitió contar con el punto de vista y la experiencia de ambas partes, constructora y promotora, y poder realizar un análisis más completo del proyecto.

### **5.1.1. Definición de los paquetes de trabajo (WP)**

El proyecto se compone de un total de 14 paquetes de trabajo. En conjunto, el proyecto se desagrega en 59 actividades. Por motivos de simplificación, se omitirá la información relativa a las actividades y, en su lugar, se expondrá la información agregada por paquetes de trabajo. Los paquetes de trabajo del proyecto de construcción del Aulario IndUVa se presentan a continuación, junto a un identificador ID, en la siguiente Tabla 21.

La fecha planificada para el comienzo del proyecto es el 2 de diciembre de 2016, mientras que se estimó que durase hasta el 1 de junio de 2018, lo que suponen 546 días naturales. Es decir, el proyecto se estima que dure un año y medio o 18 meses. En total, el proyecto se planificó para un total de 383 días laborales, la unidad de medida de este proyecto.

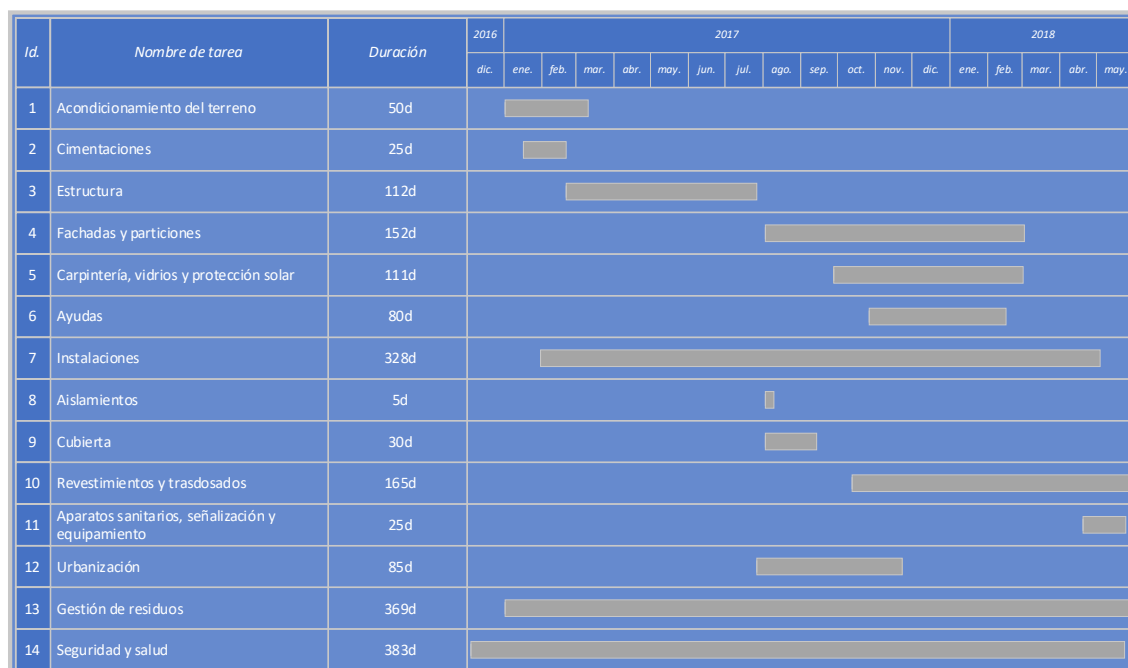
La forma en que se relacionan las actividades y los paquetes de trabajo mediante precedencias se expone gráficamente en el siguiente diagrama de Gantt, expresado en la Figura 3. Se puede observar en la figura que las fases 14. Seguridad y salud y 13. Gestión de residuos se ejecutan en la práctica totalidad del proyecto. La siguiente fase más extensa es 7. Instalaciones. El resto de las fases no superan los 8 meses de ejecución.

En este estudio, no se presentará la información relacionada con las actividades del proyecto con el objetivo de reducir la complejidad y preservar la privacidad de la información proporcionada por la empresa constructora y la universidad. En su lugar, se está presentando la información agregada por paquetes de trabajo.



**Tabla 21 Paquetes de trabajo identificados para el proyecto de construcción del Aulario IndUva.**

ID Paquete de trabajo
1 Acondicionamiento del terreno
2 Cimentaciones
3 Estructura
4 Fachadas y particiones
5 Carpintería, vidrios y protección solar
6 Ayudas
7 Instalaciones
8 Aislamientos
9 Cubierta
10 Revestimientos y trasdosados
11 Aparatos sanitarios, señalización y equipamiento
12 Urbanización
13 Gestión de residuos
14 Seguridad y salud
<i>Proyecto</i>



**Figura 3 Diagrama de Gantt para los paquetes de trabajo.**

Para la realización de este trabajo, se propone la función Lognormal como una función matemáticamente válida para incorporar la incertidumbre aleatoria de la duración de las actividades, según proponen Trietsch *et al.* (2012), Colin y Vanhoucke (2016) y Traynor y Mahmoodian (2019) (ver Tabla 4) . Esta función es definida por el parámetro,  $\mu$ , y su varianza,  $\sigma^2$ , según la ecuación (1).

$$X \sim \text{Lognormal}(\mu, \sigma^2) \quad (1)$$

En esta ecuación,  $\mu$ , equivale a la duración estimada de cada actividad, mientras que la varianza,  $\sigma^2$ , se corresponde con un número aleatorio perteneciente al intervalo  $[0,1, 0,3]$ , siguiendo el modelo dispuesto por Ordóñez Arízaga (2007), Trietsch *et al.* (2012), Colin y Vanhouck (2016) y Traynor y Mahmoodian (2019). La varianza debe estar acotada en dicho intervalo porque es la responsable de incluir la incertidumbre aleatoria en las actividades. De este modo, según los autores mencionados, la cantidad de incertidumbre introducida se acerca al error que se comete cuando realizamos una estimación sobre la duración de las tareas.

### 5.1.2. Coste del proyecto

El coste del proyecto viene definido por la suma del coste de las actividades de este. En la Tabla 22 se indican la duración y el coste variable, fijo y total para cada uno de los paquetes de trabajo. El coste es medido en euros € (EUR), la moneda de curso legal de la Eurozona, en la que se encuentra España y en la que operan la constructora y el promotor.

**Tabla 22 Duración y coste del proyecto de construcción del Aulario IndUva.**

ID	Paquete de trabajo	Duración	Coste Variable	Coste Fijo	Coste Total
1	Acondicionamiento del terreno	50	52.976,76 €	48.821,90 €	101.798,66 €
2	Cimentaciones	25	10.463,36 €	53.764,17 €	64.227,53 €
3	Estructura	112	138.017,78 €	849.450,16 €	987.467,94 €
4	Fachadas y particiones	152	73.301,94 €	782.100,02 €	855.401,96 €
5	Carpintería, vidrios y protección solar	111	10.211,80 €	194.070,02 €	204.281,82 €
6	Ayudas	80	30.872,00 €	1.020,00 €	31.892,00 €
7	Instalaciones	328	59.344,20 €	1.010.772,68 €	1.070.116,88 €
8	Aislamientos	5	12.832,99 €	91.087,44 €	103.920,43 €
9	Cubierta	30	14.193,38 €	68.984,83 €	83.178,21 €
10	Revestimientos y trasdosados	165	48.665,85 €	120,00 €	353.069,95 €
11	Aparatos sanitarios, señalización y equipamiento	25	204,84 €	9.005,40 €	9.210,24 €
12	Urbanización	85	3.932,67 €	13.895,00 €	17.827,67 €
13	Gestión de residuos	369	1.900,00 €	25.783,27 €	27.683,27 €
14	Seguridad y salud	383	4.894,28 €	20.917,81 €	25.812,09 €
	<i>Proyecto</i>	383	<i>461.811,84 €</i>	<i>3.474.076,81€</i>	<i>3.935.888,65 €</i>

El proyecto se licita por un total de 3.935.888,65€, siendo el paquete de trabajo 7. Instalaciones el más costoso con más de un millón de euros, lo que supone aproximadamente el 27% del total. En cuanto a la proporción de costes variables y costes fijos, aproximadamente el 88% del presupuesto total se compone de costes fijos: materiales, maquinaria y elementos auxiliares necesarios para la ejecución de la obra.

El 12% restante se corresponde con los costes variables, generados por el coste incurrido en función de la duración del proyecto. Algunos costes están asociados al tiempo de ejecución y están presentes hasta que se termina la actividad, como son los gastos de personal y equipamientos si se detiene la obra o se alarga por un tiempo superior al planificado.

## **5.2 Registro de los riesgos**

En este apartado se expondrán los datos obtenidos de las reuniones con el Comité de Evaluación del Proyecto, en el que se analizaron las fuentes de riesgos y se estimaron la probabilidad y el impacto que tendría cada uno de los riesgos identificados. Del mismo modo, se expondrá la forma en la que dicha información será modelada en el programa de MATLAB®.

### **5.2.1. Identificación de riesgos**

Mediante la técnica de entrevista y juicio de los expertos en la materia, se obtuvo la información que se detalla en la Tabla 23. En ella, se identifica los riesgos con su ID particular y se explica brevemente el motivo de su aparición. Además, se añade el tipo de riesgo, amenaza (A) u oportunidad (O), así como los paquetes de trabajo a los que afectaría el riesgo en caso de producirse.

### **5.2.2. Gestión de la Incertidumbre de la Probabilidad y el Impacto**

En este apartado, se presentará la probabilidad y el impacto de cada riesgo conforme a lo establecido en el Capítulo 4 más atrás, Estimación de las Contingencias de Coste. Este apartado comenzará con un análisis sobre la incertidumbre aleatoria, seguido del establecimiento de los límites aceptables para distintos niveles de probabilidad e impacto, relacionados con la incertidumbre epistémica. A continuación, se realizará un estudio de los eventos de tipo estocásticos para finalizar con la integración de todos los tipos de incertidumbre.

#### **5.2.2.1 Incertidumbre epistémica**

En este apartado, se establecerán los límites para los niveles de probabilidad e impacto requeridos para el proyecto. Estos niveles afectan a riesgos que no sabemos cuánto pueden afectar ni con qué probabilidad lo harán. Simplemente conocemos su probabilidad e impacto gracias a la experiencia adquirida por proyectos anteriores y siempre en términos cualitativos: muy alto, alto, medio, bajo o muy bajo.

**Tabla 23 Riesgo y explicación, clasificación en amenaza u oportunidad y paquetes de trabajo afectados del proyecto de construcción del Aulario IndUVa.**

ID Riesgo	Observaciones	Tipo	ID Paquete de trabajo afectado
1	Disponibilidad de mano de obra Las subcontratas pueden tener otras necesidades de personal y su implicación en el proyecto se puede ver afectada	A/O	3 Estructura 4 Fachadas y particiones 5 Carpintería, vidrios y P. Solar 8 Aislamientos
2	Disponibilidad de materiales y equipamientos Se pueden dar retrasos en ciertos suministros estratégicos para asegurar el proyecto, como restricciones a la importación de mercancías o bloqueo del comercio internacional	A	5 Carpintería, vidrios y P. Solar 7 Instalaciones 10 Revestimientos y trasdosados 11 Aparatos sanitarios, S&E
3	Legalización de instalaciones Las autoridades locales se pueden demorar a la hora de legalizar las instalaciones debido a trámites burocráticos	A	10 Revestimientos y trasdosados
4	Restos arqueológicos El hallazgo de restos de carácter arqueológico puede paralizar la obra hasta que se determine si poseen o no relevancia histórica-cultural	A	1 Acondicionamiento del terreno 2 Cimentaciones
5	Agua en nivel freático La existencia de bolsas de agua en el nivel freático del suelo paralizaría la obra hasta que se eliminasen y permitiese seguir con las cimentaciones	A	1 Acondicionamiento del terreno 2 Cimentaciones
6	Inclencencias meteorológicas Las grandes heladas, nevadas e inundaciones paralizarían el proyecto en sus primeras fases de la cimentación, impidiendo trabajar a la maquinaria y los operarios	A/O	2 Cimentaciones
7	Roca en el subsuelo La aparición de roca en el subsuelo pararía la obra hasta que sea eliminada	A	1 Acondicionamiento del terreno 2 Cimentaciones
8	Accidente La ocurrencia de un accidente laboral paralizaría inmediatamente la obra por un tiempo indefinido, hasta que se esclareciesen los motivos de este y se establezcan las medidas de seguridad adicionales necesarias para reiniciar la actividad	A	Proyecto
9	Falta de documentación La falta de la documentación obligatoria y necesaria para realizar cualquier construcción impediría el normal desarrollo de la obra. Entre esa documentación se encontrarían las altas de autónomos y asalariados en la Seguridad Social, o los permisos especiales de obra	A	5 Carpintería, vidrios y P. Solar 11 Aparatos sanitarios, S&E 14 Seguridad y salud
10	Encontrar amianto inesperadamente La aparición inesperada e indocumentada en los planos de asbestos o amianto obliga a detener la obra hasta que sea correctamente extraído y eliminado por el alto peligro para la salud pública que presentan dichos materiales	A	1 Acondicionamiento del terreno
11	Variación de precio de las materias primas El precio de las materias primas está sujeto a constantes variaciones en el mercado internacional, lo que, en ciertas ocasiones, obliga a revisar los precios acordados con las subcontratas	A	Proyecto
12	Cambios en normativa Los cambios en el ordenamiento jurídico pueden generar una oportunidad, en el sentido de que se genera una urgencia en cumplir con la legalidad vigente y evitar tener que adaptarse a los nuevos cambios planteados	O	14 Seguridad y salud
13	Problemas de medición de cimentaciones Las mediciones de las cimentaciones del edificio pueden no ajustarse a la realidad por variaciones en las condiciones o en el entorno del proyecto	A	2 Cimentaciones

Estas categorías semánticas han de ser definidas previamente de forma matemática. Una vez que hayamos definido numéricamente los tramos, podremos modelar las categorías mediante funciones de distribución.

Para la realización de este método, proponemos el uso de las funciones Triangular y Uniforme como una función válida para modelar la incertidumbre epistémica, donde los valores mínimos, más probable y máximos pueden representar la probabilidad y el impacto en duración y coste.

Tenemos, pues, tres variables a tratar: probabilidad de ocurrencia, impacto en duración e impacto en costes. Todos ellos serán incorporados a la simulación en función de la PDF que mejor los define.

La función de distribución Triangular es modelada por el valor mínimo que puede tomar, *min*, el valor más probable, *ML* o *Most Likely*, y el valor máximo, *max*, según la siguiente ecuación (2).

$$X \sim \text{Triangular}(\min, ML, \max) \quad (2)$$

Por su parte, la función de distribución uniforme continua se define como el conjunto de valores comprendidos en un rango limitado por (*a*), su límite inferior, y por (*b*), el límite superior, como se expone en la ecuación (3). Este conjunto de posibles valores se caracteriza por tener la misma probabilidad de ocurrencia. Es decir, nos encontramos con que ningún valor es presumiblemente más probable de aparecer que cualquier otro.

$$X \sim \text{Unif} (a, b) \quad (3)$$

Por consiguiente, el Comité del proyecto estableció los siguientes niveles para la probabilidad, expuesto en la Tabla 24 y para el impacto. En cada caso, las funciones de distribución serán uniformes, donde el valor mínimo del intervalo será el valor mínimo de la función uniforme e, igualmente, el valor máximo del tramo se corresponderá con el valor máximo de la PDF uniforme. El impacto en duración, medido en días laborales, se muestra en la Tabla 25. Por el contrario, los niveles para el impacto en costes son determinados conforme a la Tabla 26.

**Tabla 24 Niveles de probabilidad para el proyecto analizado.**

<u>Nivel</u>	<u>Probabilidad</u>
Muy Bajo (MB)	0% - 5%
Bajo (B)	5% - 12%
Medio (M)	12% - 20%
Alto (A)	20% - 35%
Muy Alto (MA)	35% - 100%

**Tabla 25 Niveles de impacto en duración para el proyecto analizado.**

<u>Nivel</u>	<u>Impacto en Duración</u>
Muy Bajo (MB)	0 – 15 días
Bajo (B)	15 – 30 días
Medio (M)	30 – 45 días
Alto (A)	45 – 60 días
Muy Alto (MA)	> 60 días

**Tabla 26 Niveles de impacto en costes para el proyecto analizado.**

<u>Nivel</u>	<u>Impacto en Coste</u>
Muy Bajo (MB)	0 – 2k €
Bajo (B)	2k – 6k €
Medio (M)	6k – 20k €
Alto (A)	20k – 60k €
Muy Alto (MA)	> 60k €

### 5.2.2.2 Incertidumbre estocástica

Los eventos con incertidumbre estocástica son conocidos y se puede afirmar con cierta seguridad un determinado valor para la probabilidad y el impacto. Estos riesgos serán presentados en conjunto en el apartado siguiente, en donde se integren todos los tipos de incertidumbre descritos.

En este caso, la probabilidad de ocurrencia se trata con la función de distribución de Bernoulli o distribución dicotómica (Kwon y Kang, 2019), la cual se define por la siguiente ecuación (4):

$$X \sim \text{Bernoulli}(p) \quad (4)$$

Donde ( $p$ ) es la probabilidad de ocurrencia que, en el caso en el que suceda, la función devuelve el valor 1 (éxito). El éxito significa que ocurrirá un determinado evento y acarreará unas consecuencias determinadas, configurada por un modelo determinista en el que se incide en un impacto determinado y conocido

En la situación contraria, si la función de Bernoulli no alcanza a ocurrir, se devuelve un 0, lo que representa un fracaso en la ocurrencia del evento. Si se da este caso, no se incurre en ningún impacto. El riesgo debería tratarse como que no ha ocurrido.

De acuerdo con Allahi, Cassettari y Mosca (2017), esta es la forma más común de introducir la incertidumbre estocástica en los análisis de riesgos. De hecho, este es el modo en el que incorporaremos la incertidumbre estocástica en la simulación posterior.

### 5.2.3. Integración de todos los tipos de incertidumbre

El Comité de proyecto ha completado la información necesaria para rellenar la Tabla 27. En ella, se integran todos los tipos de incertidumbre. La información que en ella se recoge será la que se haya de incorporar a la simulación, modelando la información disponible en función de las funciones de distribución que se les hubiese asignado.

En el caso de que en la Tabla 27 se presentan los 3 valores disponibles para el mínimo, el más probable y el máximo, se trata de una función triangular. Sin embargo, si solamente se encuentran dos valores: el mínimo y el máximo, implica que se trata de una función uniforme. No obstante, cuando solo se especifique un valor, el valor más probable, se tratará de una función de Bernoulli. Por el contrario, cuando no se muestre ningún valor, no existirá el impacto en duración o en coste. La probabilidad siempre tiene que existir por la propia naturaleza del concepto de riesgo.

Para los riesgos de tipo epistémico con valores desconocidos, se ha rellenado la columna de nivel de Riesgo (NR). Todas las funciones descritas en el párrafo anterior serán modeladas conforme a lo establecido en este Capítulo 5 y el anterior Capítulo 4.

**Tabla 27 Riesgos del proyecto de construcción del Aulario IndUVa.**

ID	Riesgo	Tipo de Incertidumbre	Probabilidad (%)			Impacto en Duración (días)			Impacto en Costes (€)		
			NR	PDF	Min MP Max	NR	PDF	Min MP Max	NR	PDF	Min MP Max
1	Disponibilidad de mano de obra	Epistémica	-	Triang	85 95 100	B	Triang	-5 5 10	-	-	- - -
2	Disponibilidad de materiales y equipamientos	Estocástica	-	Triang	85 95 100	-	Unif	0 - 5	-	-	- - -
3	Legalización de instalaciones	Epistémica	MA	Unif	35 - 100	-	Unif	15 - 30	MB	Unif	0 - 2000
4	Restos arqueológicos	Epistémica	MB	Unif	0 - 15	-	Triang	30 50 100	-	Unif	50000 - 100000
5	Agua en nivel freático	Epistémica	B	Unif	5 - 20	-	Bernoulli	- 10 -	M	Unif	6000 - 20000
6	Inclemencias meteorológicas	Estocástica	-	Triang	85 95 100	-	Triang	-5 5 10	-	-	- - -
7	Roca en el subsuelo	Epistémica	B	Unif	5 - 12	-	Bernoulli	- 10 -	-	Bernoulli	- 25000 -
8	Accidente	Epistémica	MB	Unif	0 - 15	MB	Unif	0 - 15	-	-	- - -
9	Falta de documentación de construcción	Epistémica	-	Bernoulli	- 25 -	-	Bernoulli	- 5 -	B	Unif	2000 - 7500
10	Encontrar amianto inesperadamente	Epistémica	MB	Unif	0 - 15	-	Triang	20 30 50	A	Unif	30000 - 60000
11	Variación de Precio materias primas	Estocástica	-	Triang	85 95 100	-	-	- - -	-	Triang	62000 77500 93000
12	Cambios en normativa	Epistémica	MB	Unif	0 - 5	-	Bernoulli	- -20 -	-	-	- - -
13	Problemas de medición de cimentaciones	Estocástica	-	Bernoulli	- 20 -	-	Triang	7 10 15	-	Unif	25000 - 50000



### 5.3 Análisis de resultados y estimación de contingencias

En este apartado, se compararán los resultados obtenidos en ambas simulaciones con el resultado planificado, que no tiene en cuenta la ocurrencia de riesgos. Se hará un repaso y una comparativa de las gráficas y los datos extraídos de la simulación de Monte Carlo realizada en un módulo de MATLAB® y, finalmente, se realizará un análisis de la estimación del nivel de contingencias en coste para este proyecto de construcción.

Según lo expuesto en este trabajo, se incorporará al módulo de MATLAB® la información proporcionada para la incertidumbre y los riesgos. Comenzando por un análisis de cómo afecta únicamente la incertidumbre aleatoria al proyecto, se compararán los resultados con la simulación integrada de todos los tipos de incertidumbre.

Los resultados serán presentados y analizados en el siguiente apartado. Los datos de nuestro proyecto real los introducimos en la aplicación MATLAB®, con la que realizamos Simulación de Monte Carlo.

A partir de entonces, los próximos valores responden a los resultados de la simulación de Monte Carlo, propiamente dichos. Se empezará analizando el valor medio de la duración del proyecto. Se tomarán las duraciones de cada una de las iteraciones de la simulación y se hallará la mediana, que equivale al percentil P50 de dicha simulación. Otros percentiles importantes también serán estudiados, como el P70 y el P80.

Un valor de la desviación del error se encuentra en la varianza de la duración del proyecto. Esta es una medida de dispersión, lo que nos aporta una visión de la disparidad o concentración de los resultados en torno al valor promedio.

La misma situación se presenta con el valor medio del coste y la varianza del coste del proyecto. En este caso, el coste total de cada iteración se compone de la suma de los costes fijos y costes variables de cada paso del proceso de simulación. El promedio de todos los valores se correspondería con la variable 'Valor Medio del Coste del proyecto'.

En el caso de la varianza del coste del proyecto, el proceso es el mismo que el utilizado con la varianza de la duración. La varianza del coste arroja información sobre la dispersión o concentración de los valores de cada iteración con respecto a la media, previamente calculada.

La tabla de percentiles de la función de distribución acumulada de los resultados nos dará información sobre la duración y el coste. Los percentiles son medidas de posición estadística. Es decir, se trata de un valor por debajo del cual se encuentra un determinado porcentaje acumulado de los resultados.

La mediana de la duración se corresponde con el percentil P50, lo que equivale a que el 50% del valor de la duración de todas las iteraciones se encuentra por debajo, y el 50% restante lo hace por encima de ese valor. Lo mismo ocurre con el valor del coste medio, correspondiéndose con el P50 para el valor del coste.

Además, podremos obtener las curvas del Valor Planificado (PV) del proyecto, en donde se verá la distribución del trabajo realizado a lo largo del tiempo. Las gráficas de duración y coste total también se analizarán.

A continuación, se presentarán y analizarán los resultados obtenidos de esta primera simulación. Los datos serán comparados posteriormente con los generados cuando se tengan en cuenta todas las fuentes de riesgo identificadas.

### 5.3.1. Simulación inicial

Para comenzar, se realizó una simulación de Monte Carlo inicial incorporando solamente la incertidumbre aleatoria de las actividades, la cual ha sido modelada con una función de distribución Lognormal. Esta simulación no incluye los riesgos derivados de las incertidumbres epistémica ni estocástica, lo que nos permite hacernos una idea únicamente del efecto de la incertidumbre aleatoria propia de las actividades del proyecto.

#### 5.3.1.1 Simulación de Duración y Coste

Este apartado comenzará analizando los primeros resultados obtenidos. El módulo de MATLAB® nos permitirá obtener un total de 20 percentiles, presentados en forma de tabla, desde el P5 hasta el P100. Esto supone que, entre cada uno de los percentiles presentados, exista un incremento del 5%. Contar con tal cantidad de información nos permite estudiar a fondo el proyecto y comprobar el efecto de la incertidumbre en el proyecto.

En la Tabla 28 se muestran los resultados estadísticos básicos sobre la duración media y variabilidad del proyecto, obtenidos después de realizar la simulación. A mayores, se incluyen las unidades de medida, para poner en contexto la información presentada.

Lo primero que observamos es la diferencia entre los valores planificados y los valores simulados. Esta diferencia consiste en que el valor medio obtenido tras la simulación es mayor que el valor esperado y es solo debida a la incertidumbre aleatoria de las actividades.

**Tabla 28 Resultados de la simulación para la incertidumbre aleatoria.**

<b>Variable</b>	<b>Valor obtenido</b>	<b>Unidades de medida</b>
Duración planificada	383	Días laborales
Coste planificado	3937437	Euros (EUR)
Valor medio de la Duración del proyecto	391	Días laborales
La varianza de la Duración del proyecto	762	Días laborales
El Valor Medio del Coste del proyecto	3.9482e+06	Euros (EUR)
La varianza del Coste del proyecto	5.1791e+08	Euros (EUR)

En la Tabla 29, se muestran los percentiles más destacados. En esta primera simulación, se destaca que el percentil P95 alcanza los valores de 440 días y 3.987.500€. El percentil P95 nos da una idea del valor colocado en el peor escenario.

Otro valor importante que destacar es el P50. En este escenario, se puede asegurar que en el 50% de las ocasiones, el proyecto durará un total de 389 días y supondrá un coste total de 3.947.522€.

Estos valores están cercanos a los planificados, 383 días y 3.937.437€, pues solo se deben a la incertidumbre aleatoria propia de las actividades del proyecto, aunque son superiores a estos.

Los 383 días planificados se corresponden con el percentil P41, lo que implica que, en aproximadamente el 60% de las ocasiones, el proyecto sufrirá retrasos. El coste planificado, 3.937.437€, se sitúa en el percentil P33, ya bastante más alejado de la mediana P50, lo que implica un sobrecoste en casi el 70% de los posibles escenarios.

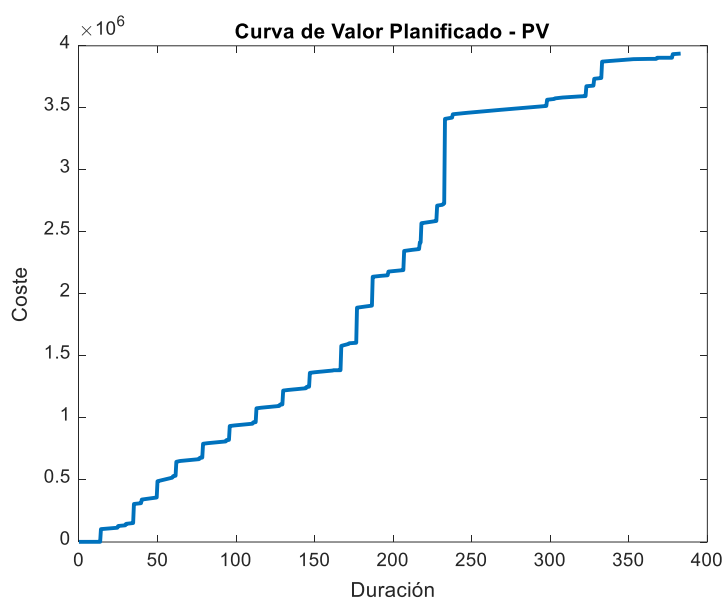
**Tabla 29 Percentiles de la duración y el coste para la incertidumbre aleatoria.**

Percentil	Duración	Coste
5.0	350.557	3912632.662
10.0	357.969	3919732.901
15.0	363.312	3924822.360
20.0	367.832	3928901.087
25.0	371.910	3932404.324
30.0	375.627	3935576.786
35.0	379.047	3938715.929
40.0	382.520	3941779.356
45.0	385.690	3944749.936
50.0	389.130	3947522.474
55.0	392.588	3950182.693
60.0	396.046	3952925.995
65.0	399.653	3955909.318
70.0	403.799	3959168.362
75.0	408.271	3962601.664
80.0	413.682	3966655.922
85.0	419.601	3971417.626
90.0	427.714	3977574.649
95.0	440.178	3987500.534
100.0	549.220	4058485.819

Con respecto al incremento en la duración, solo se incrementa en poco más de siete días y medio. Este incremento supone únicamente un 1,98% con respecto al valor planificado, un valor perfectamente asumible en un proyecto de construcción, en principio.

### 5.3.1.2 Valor planificado (PV)

En la Figura 4, se encuentra la curva de Valor Planificado – PV según el método del Valor Ganado (EVM) para la planificación realizada. Esta gráfica ofrece información relativa al desarrollo del trabajo completado (eje horizontal), en función del coste incurrido (eje vertical), a lo largo del tiempo.



**Figura 4 Curva de Valor Planificado (PV) del resultado de la simulación.**

Como se puede observar, el incremento del trabajo realizado permanece constante hasta aproximadamente el día 250. En este momento, se produce un salto importante y se genera un salto en el gasto cualitativamente importante del coste del presupuesto. Posteriormente, el incremento permanece constante hasta alcanzar el valor planificado de la duración, los 383 días laborales que se estimaron anteriormente.

La gráfica del Valor Planificado (PV) no se ve modificada por la existencia o no de riesgos, ni por la variabilidad aportada por la incertidumbre. Esta condición hace que no se modifique para el caso en el que los riesgos han sido incluidos, puesto que solo responde a la planificación del proyecto.

### 5.3.1.3 Duración total acumulada

La siguiente información que obtenemos se encuentra en la Figura 5, donde se muestra la duración total de la simulación, incluyendo la variabilidad de las actividades. En el eje horizontal, se encuentra la duración del proyecto, mientras que, en el eje vertical, se encuentra el número de muestras o iteraciones en las que se repite cada valor de la duración. La línea roja indica la probabilidad acumulada para la variable estudiada, la duración total del proyecto.

Vemos que la curva de la gráfica no presenta una distribución normal estándar, sino que presenta una cola en los valores finales, hacia valores mayores de la duración total. Esta cola es la responsable de que aumente la duración del proyecto, ya que es debida a la inclusión de la incertidumbre aleatoria en las actividades.

Esta tendencia hacia los valores más altos en la duración es debida a la existencia de caminos paralelos. En estas situaciones, para que exista un adelanto en el proyecto, se ha de dar la casualidad de que todos los caminos paralelos tengan adelanto. Por el contrario, basta con que solo uno de ellos sufra un retraso para que la duración total del proyecto se retrase.

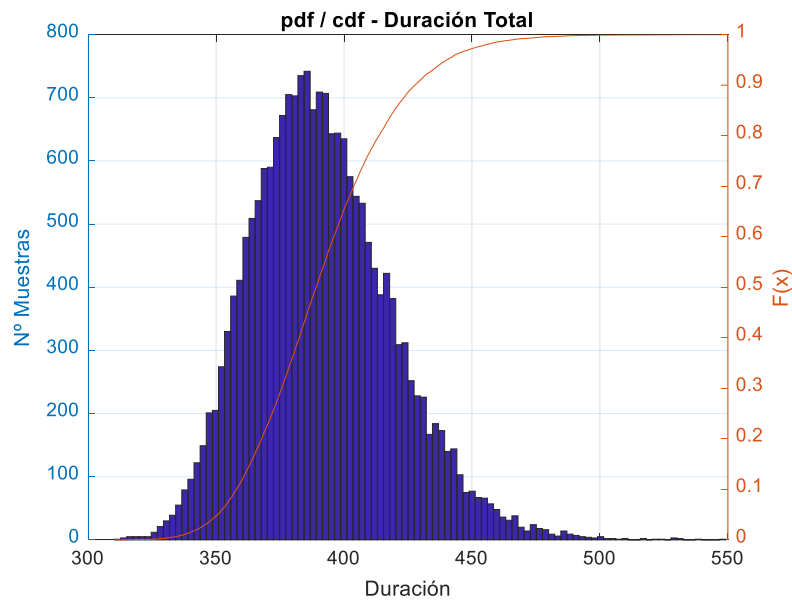


Figura 5 Duración total para la incertidumbre aleatoria.

### 5.3.1.4 Coste total acumulado

En la Figura 6 se muestra la curva de distribución acumulada para el coste total. En ella, podemos cotejar la situación de los percentiles más importantes. En el caso del percentil P50, con un valor de 3.947.522€, podemos localizarlo cerca de la mediana, en el centro de la curva. Sin embargo, el percentil P80 tiene un valor de 3.966.655€, mientras que el escenario con un valor más alto, P95, se sitúa en los 3.987.500€. Como todos están situados por debajo de los cuatro millones de euros, podemos concluir que superar esa cantidad es un escenario muy improbable.

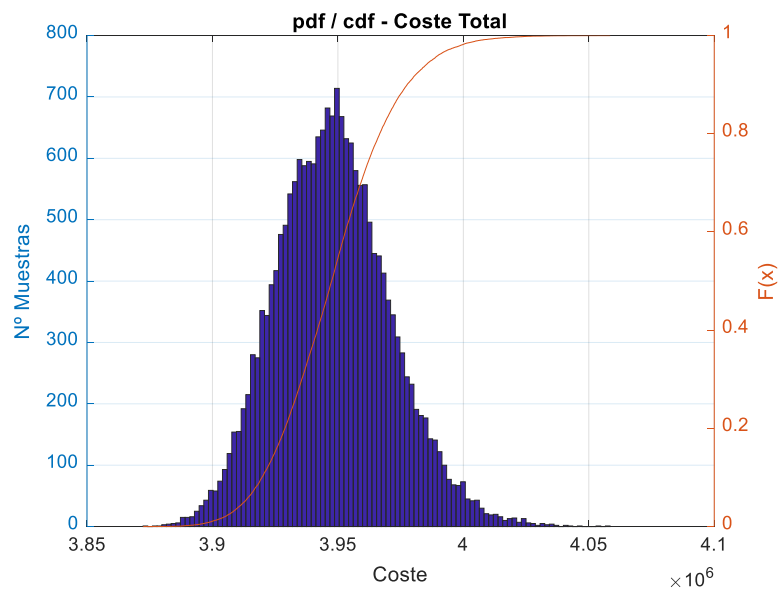
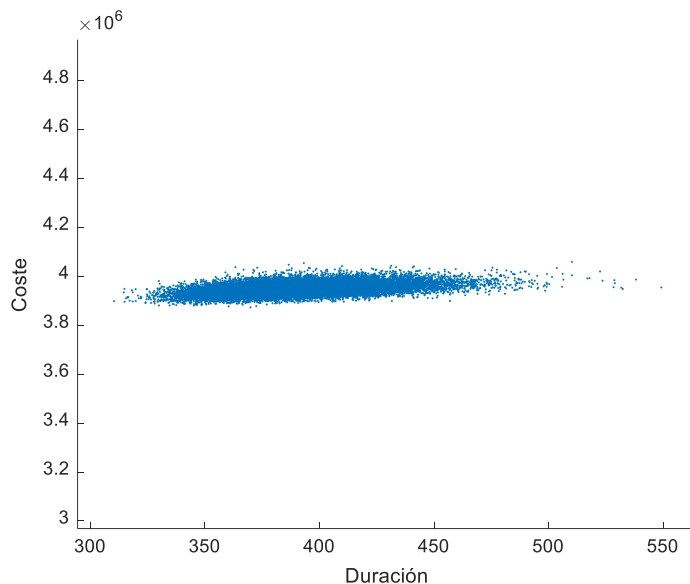


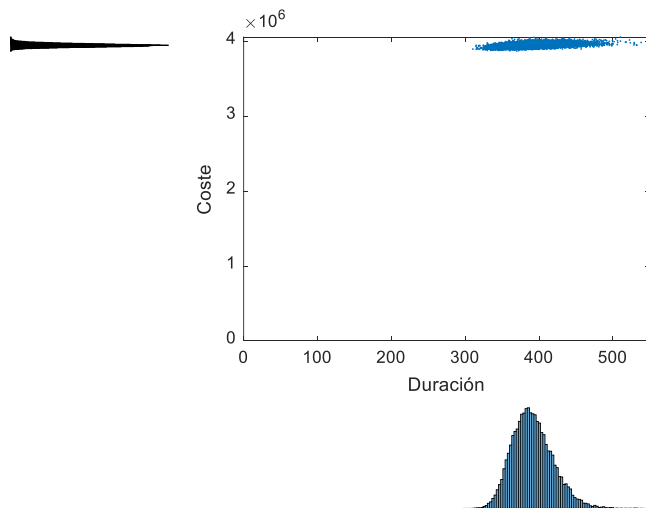
Figura 6 Coste total para la incertidumbre aleatoria.

### 5.3.1.5 Análisis conjunto de Duración y Coste

Como resultado de la simulación, podemos representar la nube de puntos del conjunto de iteraciones, correspondientes al instante final de cada uno de los proyectos simulados (ver Figura 7 y Figura 8). En la Figura 7, se observa la nube de puntos proporcionada por la duración y coste de cada una de las iteraciones de la simulación.



**Figura 7** Nube de puntos de la duración y el coste para la incertidumbre aleatoria.



**Figura 8** Nube de puntos para duración y coste de la incertidumbre aleatoria.

Para cada muestra, se ubica en una gráfica donde se indica su duración simulada en el eje X, mientras que el Coste estimado marcará la coordenada Y del punto. Como se puede observar, se

esboza una única línea de tendencia recta y sin apenas inclinación apreciable, muy concentrada en los valores del coste, y más dispersa a lo largo del eje X, la duración simulada.

Esta diferencia en la dispersión no es sorprendente, pues si observamos la varianza de las simulaciones veremos que la dispersión del coste es muy baja y la de duración es alta. Esto es debido a que el coste que sufre incertidumbre es el coste variable, asociado a la duración de las actividades.

### 5.3.2. Simulación final

Los resultados obtenidos por la simulación que integra todos los tipos de incertidumbre identificados se presentan en este apartado. Se seguirá el esquema propuesto en el apartado anterior, con la excepción ya explicada de la curva del Valor Planificado (PV). Posteriormente, se compararán ambos resultados y se analizarán las conclusiones y consecuencias.

Esta simulación incorpora todos los riesgos identificados en la Tabla 27, conforme a la información de la probabilidad de ocurrencia y el impacto en duración y costes. Se incorporan todos los tipos de incertidumbre ya que, a diferencia de la primera simulación donde solo se analizaba la incertidumbre aleatoria de las actividades, en esta simulación se incorporan la incertidumbre epistémica y estocástica de cada uno de los riesgos.

#### 5.3.2.1 Simulación de Duración y Coste

Del mismo modo que lo dispuesto en la primera simulación, se presenta la Tabla 30. En ella, se detallan los valores obtenidos por la simulación y las unidades de medida utilizadas.

**Tabla 30 Resultados de la simulación para toda la incertidumbre.**

<b>Variable</b>	<b>Valor obtenido</b>	<b>Unidades de medida</b>
Duración planificada	383	Días laborales
Coste planificado	3937437	Euros (EUR)
Valor medio de la Duración del proyecto	427	Días laborales
La varianza de la Duración del proyecto	1.3135e+03	Días laborales
El Valor Medio del Coste del proyecto	4.1243e+06	Euros (EUR)
La varianza del Coste del proyecto	4.2800e+09	Euros (EUR)

Lo primero que podemos observar, es un mayor valor medio para la duración y el coste, así como un incremento en la varianza de ambos. Esto implica que, incluso siendo mayor el valor medio, los valores se encuentren más dispersos. Así, se puede deducir que las gráficas cruzadas para la duración y el coste de las muestras estarán mucho más dispersas, ocupando un área mayor en la gráfica.

En la Tabla 31 se muestran los valores medios y la varianza de la Duración y el Coste del proyecto correspondientes con la planificación del proyecto, donde no se estudian los riesgos asociados, y la

obtenida con la primera y segunda simulación, ‘Valor Sim1’ y ‘Valor Sim2’, respectivamente. Por último, se incluyen las unidades de medida de cada variable.

Para el análisis de percentiles, contamos con la Tabla 32, donde se ofrecen los resultados obtenidos del proceso de simulación de todas las funciones matemáticas asociadas a la probabilidad y ocurrencia de los riesgos.

**Tabla 31 Compendio de resultados obtenidos para ambas simulaciones.**

<b>Variable</b>	<b>Valor planificado</b>	<b>Valor Sim1</b>	<b>Valor Sim2</b>	<b>Unidades de medida</b>
Valor medio de la Duración del proyecto	383	391	427.9573	Días laborales
Varianza de la Duración del proyecto	-	762	1.3135e+03	Días laborales
Valor Medio del Coste del proyecto	3937437	3.9482e+06	4.1243e+06	Euros (EUR)
Varianza del Coste del proyecto	-	5.1791e+08	4.2800e+09	Euros (EUR)

Realizar solo un análisis de la incertidumbre de las actividades, como el realizado en la primera simulación, ya aumenta la duración y el coste esperados. Aun así, realizar un análisis más profundo de la ocurrencia de riesgos es más preciso, puesto que los proyectos tienden a alargarse y costar más que el valor planificado. Entre las dos simulaciones, existe una diferencia en la media mayor a los 37 días laborales, y, en el coste, esa diferencia alcanza los 176.000€.

**Tabla 32 Percentiles de la duración y el coste para todos los tipos de incertidumbre.**

<b>Percentil</b>	<b>Duración</b>	<b>Coste</b>
5.0	374.744	4029828.694
10.0	384.686	4049286.787
15.0	391.810	4061796.780
20.0	397.776	4072091.023
25.0	402.770	4081069.510
30.0	407.276	4089142.332
35.0	411.884	4096090.145
40.0	416.413	4102974.039
45.0	420.643	4109960.381
50.0	424.657	4116968.820
55.0	428.961	4124319.813
60.0	433.455	4132338.614
65.0	437.954	4140528.283
70.0	443.001	4149675.387
75.0	448.673	4160748.326
80.0	455.523	4173912.126
85.0	464.420	4189357.690
90.0	475.664	4209273.364
95.0	493.474	4243174.152
100.0	616.555	4488505.780

Si comparamos la segunda simulación, donde se integran todas las fuentes de incertidumbre, con la duración y el presupuesto planificados, podemos existir más del 11% de diferencia en la duración,



lo que se corresponde con prácticamente 45 días. Con respecto al coste, la diferencia es del 4,75%, lo que supone un valor superior a los 186.000€.

Estos valores son el promedio de los valores arrojados por todas las muestras de las 25.000 de la simulación de Monte Carlo. En otras palabras, se puede asegurar con un nivel de confianza estadística del 50% de las probabilidades que el proyecto se va a alargar, al menos, 44 días, y que se va a generar un sobre coste superior a los 186.000€.

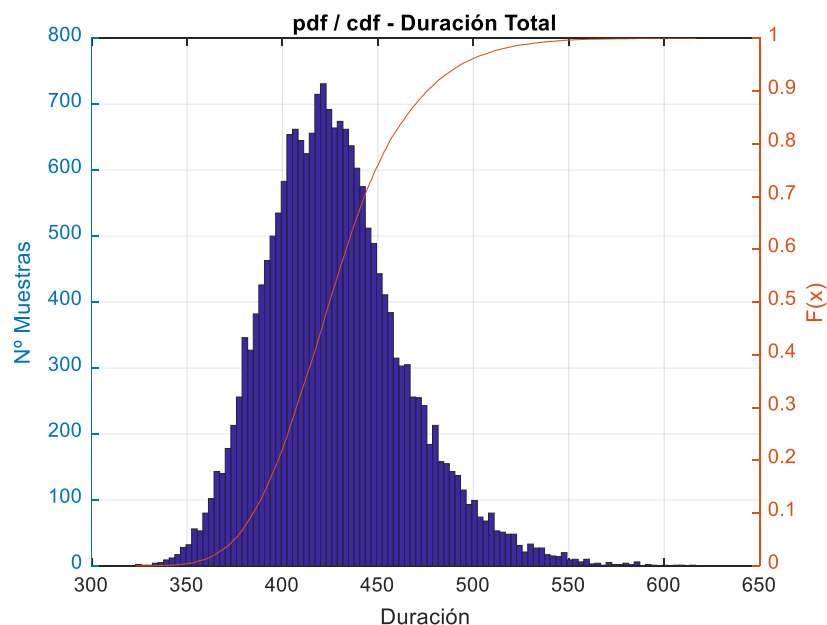
Se puede destacar que, al igual que lo realizado en la primera simulación, el peor escenario (P95) incurre en un coste de 4.243.174€, y se estima una duración de 493 días de ejecución del proyecto.

Sin embargo, en un 50% de las ocasiones, la duración y el coste atenderán a unos valores de 424 días y 4.116.968€. Esto supera con creces los valores planificados. Para la duración, el valor planificado de 383 días se sitúa en el percentil P9, lo que implica que se generará un retraso en el 91% de las ocasiones.

Para el valor planificado del coste, la diferencia es incluso mayor. El coste total planificado de 3.937.437€ se localiza en el percentil P1, muy por debajo del valor que arroja el percentil P5, 4.029.828€, el menor de la Tabla 32.

### 5.3.2.2 Duración total acumulada

Lo que se puede observar, la Figura 9 es una imagen muy parecida a la que obtuvimos en el análisis anterior sin riesgos. Sin embargo, estas curvas son bien distintas, puesto que la curva se ha visto desviada hacia la derecha, lo que provoca un 11,74% de aumento de la media. Es decir, se puede observar gráficamente como el aumento del coste medio desplaza la curva. En esta gráfica es más que evidente la existencia de una cola, debida a la existencia de riesgos.



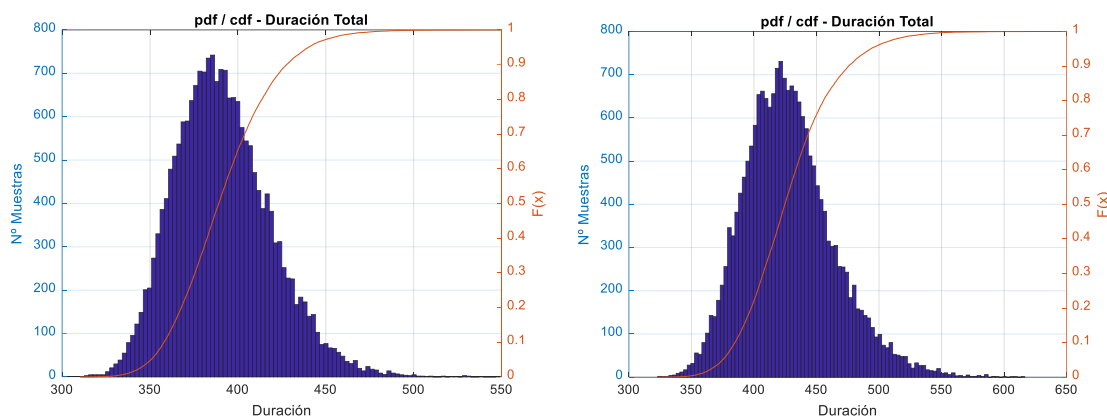
**Figura 9 Duración total para toda la incertidumbre.**

Es necesario tener en cuenta que este trabajo se centra en analizar las contingencias para el coste del proyecto de construcción del Aulario IndUVA. En este apartado, se compararán las gráficas de la duración de las muestras de la simulación, con el objetivo de comprobar posteriormente si existe correlación entre un aumento de la duración y un incremento del coste.

En las tablas que se incluyen al final del apartado, se pueden observar la comparativa de las dos gráficas, siendo las primeras correspondientes a la primera simulación con incertidumbre aleatoria, mientras que las segundas se refieren a las obtenidas en la simulación de todos los riesgos identificados.

Para comenzar, en la Tabla 33, se comparan las funciones de la duración obtenida por cada muestra en ambas simulaciones. Lo primero que se puede destacar es una desviación del eje X de la segunda con respecto a la primera: la media es superior. Sin embargo, podemos observar que apenas se ha modificado la forma de la función. Ambas se asemejan a una campana de Gauss, típica descripción de las funciones normales.

**Tabla 33 Comparación de las curvas de Duración Total para ambas simulaciones**



Si dividimos la función en dos partes, separadas por la moda, donde se alcanza el mayor número de muestras, observaríamos que la parte de la izquierda apenas varía en la forma. Parece que la escalada se realiza con una pendiente muy parecida.

La diferencia más radical se puede observar en la segunda mitad de la derecha. Donde vemos que la caída es más prolongada en la segunda gráfica, para rematar en una suave llegada al valor del eje Y, número de muestras. Por el contrario, la gráfica de la primera simulación mantiene una caída bastante igualada al comienzo y al final.

Esta ‘diferencia en la caída’ es debido a lo que anteriormente denominamos ‘cola’. Esta cola indica que un número mayor de riesgos está impactando en la duración del proyecto, lo que provoca un aumento en la duración media.

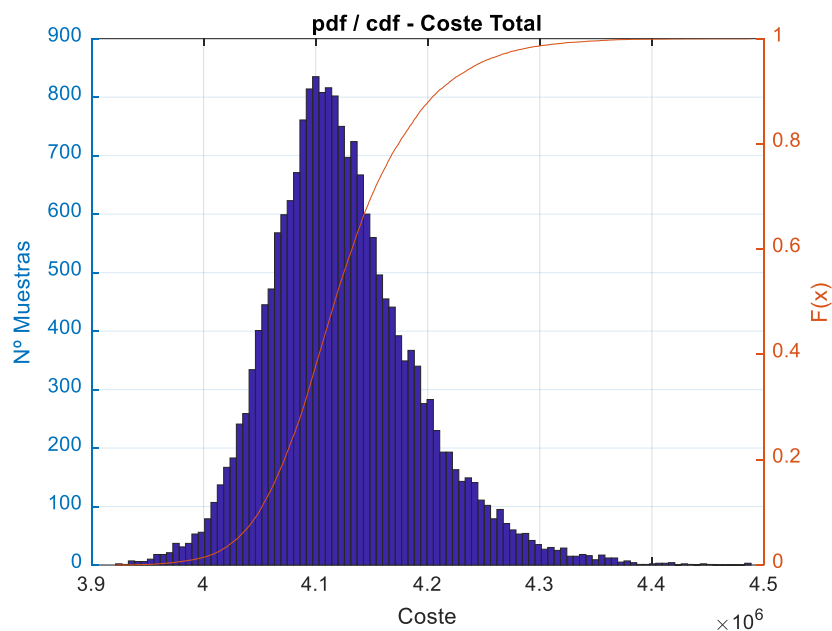
Otro aspecto relevante es la ‘amplitud’ de la gráfica. Observamos que, para la segunda simulación, la campana de Gauss está más afilada en la cima. Teniendo en cuenta que el número de muestras de ambas simulaciones es el mismo, esta característica implica que existe mayor dispersión de resultados.

El siguiente aspecto por estudiar es la presencia de una cola muy evidente en la segunda gráfica. Decíamos que, si la subida fue muy rápida, la bajada habrá de ser más lenta. La caída de la pendiente hace que prácticamente al final de la gráfica, la pendiente parezca una línea recta.

Como pudimos constatar con la comparación de los valores medios devueltos por las simulaciones, la media del coste es mayor en la segunda de estas. Gráficamente, una media mayor implica un desplazamiento generalizado del gráfico hacia la derecha del eje X.

### 5.3.2.3 Coste total acumulado

Lo mismo que ocurre con la duración total acumulada, ocurre con el coste. En la Figura 10 se presenta la curva del coste total acumulado para el número de muestras que se repite un valor. El incremento del 4,75% del valor medio del coste para cada muestra de la simulación hace que la curva se vea desplazada hacia la derecha.

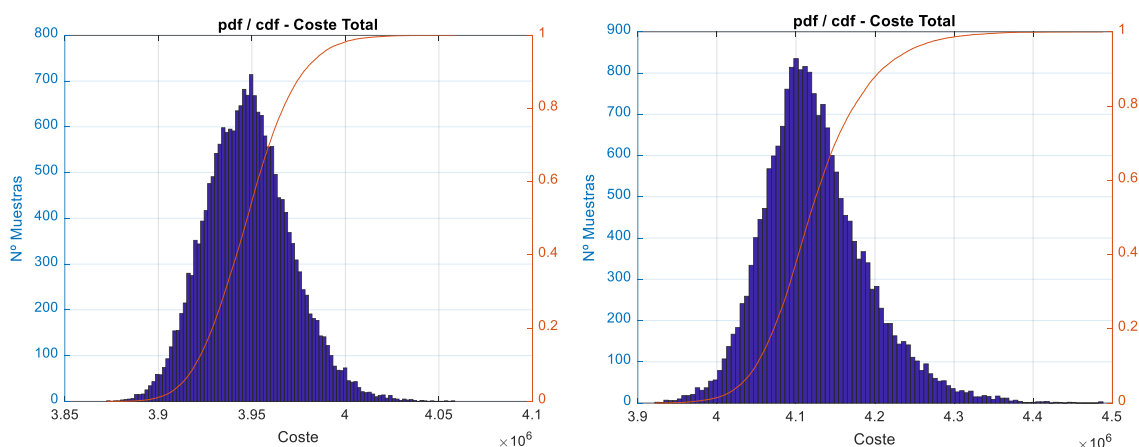


**Figura 10 Coste total de toda la incertidumbre.**

Como se ha comentado anteriormente, la primera simulación arroja unos valores muy parejos en cuanto al coste. Es decir, obtiene un valor de dispersión más bajo que el de la segunda gráfica, donde el coste adquiere valores menos concentrados.

Otra consecuencia que se puede destacar es la mayor dispersión de los resultados de la segunda simulación. El gráfico indica que los resultados abarcan un amplio rango y se puede comprobar que el rango de valores de la segunda simulación es de aproximadamente 600.000€ de diferencia entre el más elevado y el menos elevado.

**Tabla 34 Comparación de las curvas de Coste Total para ambas simulaciones**



Sin embargo, para la primera simulación, observamos que no está afilada en la punta. Es importante tener en cuenta que el eje Y de la segunda gráfica se muestra hasta las 900 muestras, mientras que la primera se estanca en las 800. Esto implica una mayor concentración de los resultados, abarcando un rango aproximado de 200.000€.

La primera simulación nos da un mapa de puntos muy uniforme, sin apenas puntos de valor atípico, también conocidos como outliers. En el primer gráfico, estos puntos se encuentran en la parte más a la derecha.

Los puntos atípicos son aquellas muestras que se alejan tanto de la media que son muy improbables. Normalmente, en los análisis estadísticos se omiten estos outliers, puesto que son considerados como errores, casualidades muy improbables o fallos inocentes de las ecuaciones.

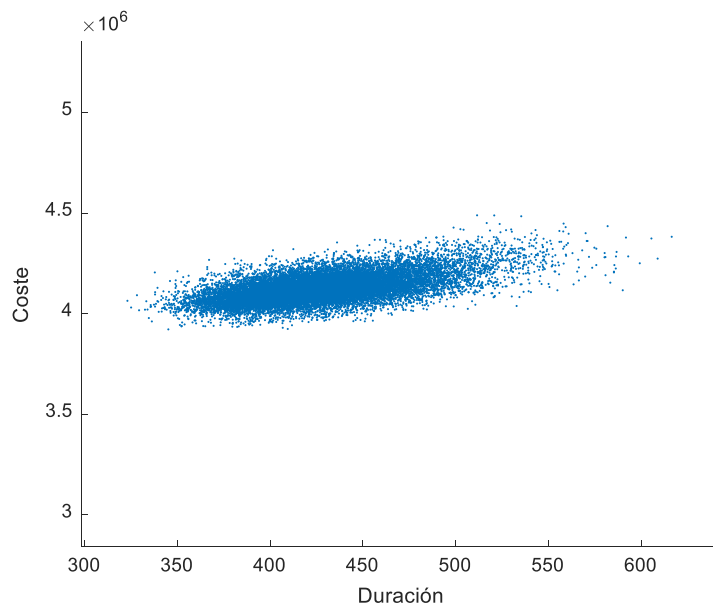
Los valores atípicos del segundo gráfico no se diferencian con tanta claridad como en el primero, debido a la mayor dispersión. Todo es causa de la integración de mucha incertidumbre, proveniente de otras fuentes ya estudiadas.

#### 5.3.2.4 Análisis conjunto de Duración y Coste

Los análisis cruzados de la duración y el coste nos muestran las siguientes figuras. En la Figura 11 se puede encontrar la nube de puntos para las iteraciones de la simulación. Los proyectos se han dispersado más, ya no están concentrados en una estrecha franja en torno al valor medio.

Podemos encontrar que la mayoría de los puntos se encuentran por encima de los 4.000.000€ para el coste estimado. En cuanto a la duración, la dispersión es más amplia. Se debería tener en cuenta que la duración planificada se sitúa en los 383 días laborales; mientras que el coste planificado es ligeramente inferior a los 4.000.000€.

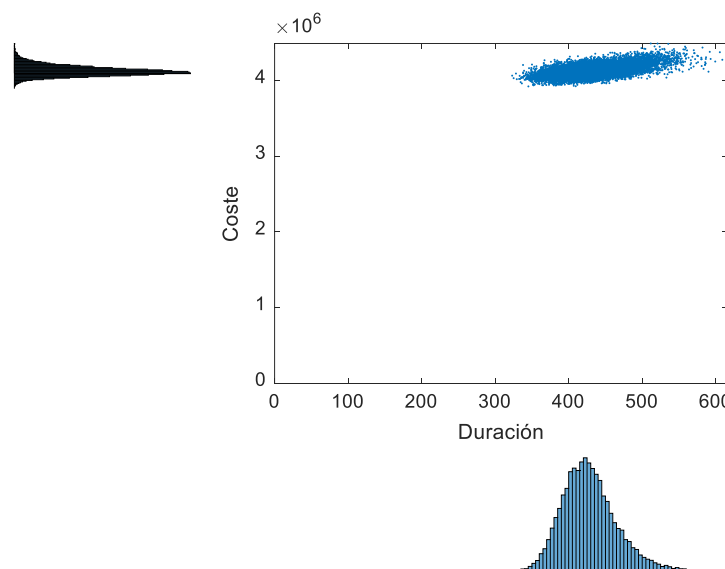
Por último, en el Figura 12 se encuentran la nube de puntos con la distribución acumulada para la duración y el coste. En este gráfico queda plasmada la gran dispersión en los valores de la duración, y la mayor concentración en el coste. Aun así, este hecho no implica que la media estimada para la simulación sea mayor en ambos casos.



**Figura 11** Nube de puntos para la duración y el coste.

La nube de la segunda simulación presenta una forma mucho más irregular, sin que se pueda definir un contorno con claridad. La primera simulación nos da un mapa de puntos muy uniforme, sin apenas puntos de valor atípico, también conocidos como outliers. En la Tabla 35, estos puntos se encuentran desviados hacia la derecha.

Los puntos atípicos son aquellas muestras que se alejan tanto de la media que son muy improbables. Normalmente, en los análisis estadísticos se omiten estos outliers, puesto que son considerados como errores, casualidades muy improbables o fallos inocentes de las ecuaciones.

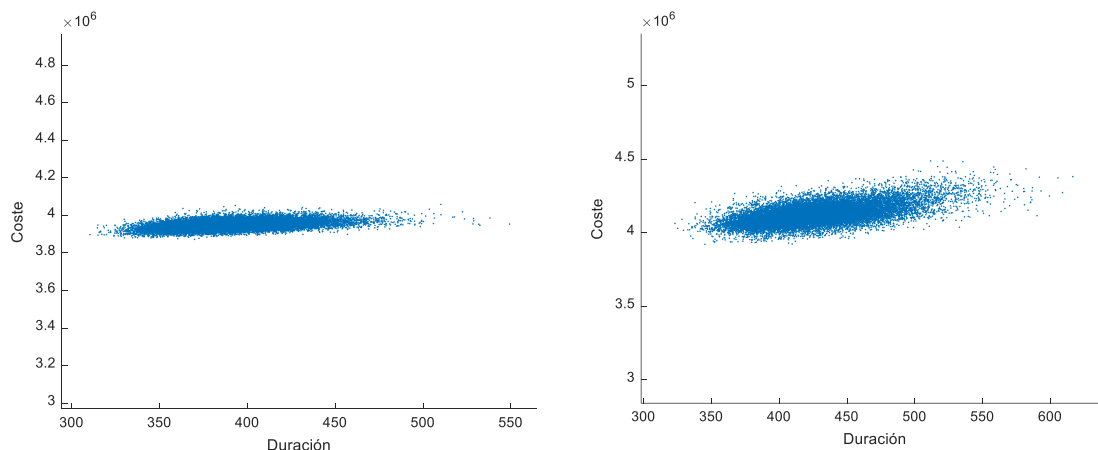


**Figura 12** Nube de puntos y curvas de distribución acumulada para la duración y el coste.

Los valores atípicos del segundo gráfico no se diferencian con tanta claridad como en el primero, debido a la mayor dispersión. Todo es causa de la integración de mucha incertidumbre, proveniente de otras fuentes ya estudiadas.

Si comparamos la forma de cada nube de puntos, podemos decir que la primera se asemeja más a una línea recta que apenas tiene pendiente. Esta recta horizontal se ensancha al comienzo, por lo que tiene más forma de rectángulo o rombo que la segunda.

**Tabla 35 Comparación de las nubes de puntos para ambas simulaciones**



### 5.3.2.5 Estimación de contingencias

La Tabla 36 muestra los percentiles obtenidos para las dos simulaciones realizadas. La primera observación que se puede hacer es el aumento considerable en todos los valores de la segunda simulación con respecto a la primera. La integración de todos los tipos de incertidumbre implica que los valores sean mayores, por efecto de los riesgos analizados.

Si recordamos, el valor planificado para la duración del proyecto era de 383 días. Incluyendo únicamente la incertidumbre aleatoria, para la simulación 1 nos encontramos que la duración planificada se logra en menos del 45% de las ocasiones.

Como ya se ha expuesto anteriormente, los análisis de riesgos más completos son los que más se acercan a la realidad. Por tanto, encontrar el valor planificado de 383 días en la segunda simulación, donde incluimos el efecto producido por todos los riesgos identificados, se alcanza en poco más del 15% de las ocasiones.

Si tenemos en cuenta el coste planificado del proyecto, algo más de 3,93 millones de €, podemos asegurarlo en el 25% de las ocasiones si solo se tuviese en cuenta la variabilidad de las actividades. Por el contrario, el valor planificado se puede considerar irrealizable, puesto que podemos asegurar que será superado en más del 95% de las ocasiones.

Esta información es aportada por el percentil P5 para el coste de la segunda simulación. Si el percentil más bajo ya supera el coste planificado del proyecto, se convierte en un indicador de que el presupuesto planificado se va a incrementar notablemente.

**Tabla 36 Percentiles obtenidos de las dos simulaciones realizadas.**

Percentil	Duración Sim1	Duración Sim2	Coste Sim1	Coste Sim2	Percentil
5.0	350.557	374.744	3912632.662	4029828.694	5.0
10.0	357.969	384.686	3919732.901	4049286.787	10.0
15.0	363.312	391.810	3924822.360	4061796.780	15.0
20.0	367.832	397.776	3928901.087	4072091.023	20.0
25.0	371.910	402.770	3932404.324	4081069.510	25.0
30.0	375.627	407.276	3935576.786	4089142.332	30.0
35.0	379.047	411.884	3938715.929	4096090.145	35.0
40.0	382.520	416.413	3941779.356	4102974.039	40.0
45.0	385.690	420.643	3944749.936	4109960.381	45.0
50.0	389.130	424.657	3947522.474	4116968.820	50.0
55.0	392.588	428.961	3950182.693	4124319.813	55.0
60.0	396.046	433.455	3952925.995	4132338.614	60.0
65.0	399.653	437.954	3955909.318	4140528.283	65.0
70.0	403.799	443.001	3959168.362	4149675.387	70.0
75.0	408.271	448.673	3962601.664	4160748.326	75.0
80.0	413.682	455.523	3966655.922	4173912.126	80.0
85.0	419.601	464.420	3971417.626	4189357.690	85.0
90.0	427.714	475.664	3977574.649	4209273.364	90.0
95.0	440.178	493.474	3987500.534	4243174.152	95.0
100.0	549.220	616.555	4058485.819	4488505.780	100.0

En la Tabla 37 se muestran únicamente los percentiles más relevantes. Para este proyecto, se han seleccionado los percentiles P50, P75, P80 y P95. El valor que separa en dos el número de escenarios posibles equivale al percentil P50.

Los proyectos de construcción se engloban en un sector económico muy rígido y con poco apetito al riesgo. Por este motivo se han seleccionado para analizar los percentiles indicados anteriormente, los cuales serán de ayuda para estimar las contingencias en coste para este proyecto.

En organizaciones pertenecientes a sectores con mayor capacidad de innovación, los agentes económicos tienden a tener un apetito al riesgo mayor. La madurez de una organización no tiene relación con el apetito al riesgo de esta, aunque para realizar análisis complejos de riesgos el nivel de madurez organizacional ha de ser elevado.

**Tabla 37 Percentiles más relevantes para la asignación de contingencias.**

Percentil	Duración Sim1	Duración Sim2	Coste Sim1	Coste Sim2	Percentil
50.0	389.130	424.657	3947522.474	4116968.820	50.0
75.0	408.271	448.673	3962601.664	4160748.326	75.0
80.0	413.682	455.523	3966655.922	4173912.126	80.0
95.0	440.178	493.474	3987500.534	4243174.152	95.0

Primeramente, comenzaremos analizando el percentil P50. En esta situación, la mitad de los escenarios simulados estarán por encima de ese valor, y en el 50% de los casos restantes, se encontrarán por debajo.

Estudiando la duración del proyecto, nos encontramos con que, solo debido a la incertidumbre que aportan las actividades del proyecto en la simulación 1, el valor de la duración planificada, 383 días, es superior al valor reportado por la simulación.

Sin embargo, incorporar los distintos tipos de incertidumbre, se genera un escenario donde la planificación se vuelve irrealizable. Se puede afirmar que, en el 50% de los escenarios, la duración total del proyecto es de al menos 424 días.

En lo que se refiere al coste, con un nivel de confianza estadística del 50%, se puede afirmar que el coste real del proyecto se asemejará a 4.116.968,82€, el valor arrojado por la segunda simulación en el percentil P50.

La incertidumbre aportada por las actividades del proyecto supone un coste de 3.9 millones de € en la mitad de los escenarios simulados. Vemos que existe una diferencia importante, la cual se puede observar en la Tabla 38.

**Tabla 38 Diferencia absoluta en los principales percentiles.**

Percentil	Diferencia en Duración (días)	Diferencia en Coste (€)
50.0	36	169.446
75.0	40	198.147
80.0	42	207.256
95.0	53	313.174

Las contingencias en coste vienen definidas como la diferencia entre el valor de simulación escogido, en función del apetito al riesgo, y el valor planificado para el coste. Con respecto a las contingencias para la duración, su estimación se sitúa más allá de los límites de este trabajo, puesto que influyen otros condicionantes, tales como la disponibilidad y distribución de recursos, el respeto por las precedencias establecidas y otras limitaciones impuestas por la propia naturaleza del proyecto.

Por consiguiente, en la Tabla 39, se presentan las contingencias en coste que permitirían ejecutar el proyecto de construcción del Aulario IndUVa sin contratiempos. Se presentan en los percentiles que se han identificado como relevantes, P50, P75, P80 y P95.

**Tabla 39 Contingencias de coste para un determinado nivel de confianza.**

Percentil	Contingencia en Coste
50.0	181.080
75.0	224.860
80.0	238.023
95.0	552.617

Por el contrario, el método tradicional de asignación de contingencias de coste que establece reservar el 10% del presupuesto del proyecto se correspondería con una contingencia de 393.000€. Si realizamos la comparación con las contingencias que nos ofrecen los percentiles más importantes para el método propuesto en este trabajo, se observa que solo es superada en el peor de los escenarios (P95).



Para el 50% de las ocasiones, las contingencias en coste que habremos de reservar serían de 181.080€, prácticamente la mitad que las ofrecidas por el tradicional método de asignar el 10% del coste total.

El valor de contingencias que se reserven para cada proyecto dependerá de la aversión al riesgo de la organización. Para este proyecto, si le existiese una aversión al riesgo elevada, el P75 nos arrojaría un valor de contingencias de 224.860€. La comparación con el método tradicional del porcentaje se presenta en la Tabla 40.

**Tabla 40 Comparativa de las contingencias de coste obtenidas con las contingencias del método tradicional.**

Percentil	Diferencia en Contingencias en Coste
50.0	211.920
75.0	168.140
80.0	154.977
95.0	-159.617

Para el peor de los escenarios, P95, nos encontraríamos con que nos hemos quedado cortos con las contingencias y podríamos poner en peligro la viabilidad económica del proyecto. Sin embargo, esa situación es muy improbable que ocurra.

En un escenario más realista, podemos afirmar con un 80% de nivel de confianza que las contingencias en coste necesarias serían de 238.023€, lo cual supondría una diferencia de 154.977€. Es decir, en el 80% de las ocasiones, podríamos destinar casi 150.000€ a otros proyectos o a otras inversiones que puedan ofrecer una rentabilidad mayor a la que ofrece la reserva de contingencias.



## CONCLUSIONES

En este trabajo, se han presentado la situación de los conceptos de riesgo e incertidumbre y se ha analizado la relación que existe entre ambos. Se ha podido comprobar como el riesgo surge de la incertidumbre, por lo que enfocar los análisis de Gestión del Riesgo hacia la Gestión de la Incertidumbre aumenta las probabilidades de éxito del proyecto.

Un análisis sobre el estado del arte de la incertidumbre en la Dirección de Proyectos nos ha permitido obtener una clasificación para distintos tipos de incertidumbre: estocástica, aleatoria, epistémica y ontológica. Todos estos tipos están presentes en la vida real y deben ser tenidos en cuenta a la hora de dirigir proyectos.

A su vez, el riesgo puede suponer una amenaza o una oportunidad, en función de si las consecuencias que implica su ocurrencia son negativas o positivas, respectivamente. La ampliación del concepto de riesgo hacia oportunidades permite desarrollar análisis íntegros del riesgo de los proyectos.

Una de las principales implicaciones en la Gestión del Riesgo es la de asignar correctamente las contingencias de coste necesarias para asegurar la viabilidad económica del proyecto, durante su ejecución. La aplicación de técnicas cuantitativas avanzadas de simulación no es muy común en la gestión de proyectos. Por ello mismo, surge la necesidad de comprobar si se pudieran obtener con métodos cuantitativos que aumenten la precisión de las estimaciones.

La principal conclusión que se puede obtener es que se ha podido estimar correctamente las contingencias de coste mediante el método de la simulación de Monte Carlo. Esta técnica cuantitativa de Gestión del Riesgo ha permitido incorporar a la simulación todos los tipos de incertidumbre identificados.

Del análisis de los resultados obtenidos, se puede concluir que el efecto de los riesgos modifica notablemente la planificación de los proyectos. La diferencia existente entre los valores planificados para la duración y el coste hacen necesaria la aplicación del proceso de Gestión del Riesgo.

Con respecto a la comparación con el tradicional método de asignar como contingencias de coste el 10% del presupuesto total del proyecto, podemos concluir que este método afina mucho mejor que reserva necesaria para no comprometer económicamente la viabilidad del proyecto. Esto es debido a que las reservas se ajustan a la realidad y el contexto particular de cada proyecto.

Si la simulación nos ofrece escenarios con contingencias mucho menores que la proporcionada por el método tradicional del porcentaje, podremos dedicar la diferencia a otras partidas de inversión más rentables. Por el contrario, si la simulación nos ofrece escenarios donde se incurrirán en costes mayores a los estimados por el método del porcentaje, habremos de reservar una cantidad mayor de recursos económicos para asegurar la viabilidad del proyecto.

En otras palabras, hemos sido capaces de anticipar escenarios futuros más negativos que los planificados, lo que nos permitiría actuar en consecuencia y aumentar las probabilidades de éxito del proyecto. Como vemos, podemos concluir que el método que proponemos en este trabajo es un método válido para estimar la asignación de contingencias de coste a los proyectos.

**BIBLIOGRAFÍA**

AACE International, A. for the A. of C. E. (2011) 'Integrated cost and schedule risk analysis using Monte Carlo simulation of a CPM model', *AACE International Recommended Practice No. 57R-09*.

Acebes et al. (2021) 'On the project risk baseline: integrating aleatory uncertainty into project scheduling', *Computers & Industrial Engineering*, In Press.

Acebes, F. et al. (2014) 'A new approach for project control under uncertainty. Going back to the basics', *International Journal of Project Management*, 32(3), pp. 423–434. doi: 10.1016/j.ijproman.2013.08.003.

Acebes, F. et al. (2015) 'Stochastic earned value analysis using Monte Carlo simulation and statistical learning techniques', *International Journal of Project Management*. Elsevier Ltd, 33(7), pp. 1597–1609. doi: 10.1016/j.ijproman.2015.06.012.

Acebes, F. et al. (2020) 'Project risk management from the bottom-up: Activity Risk Index', *Central European Journal of Operations Research*. Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/s10100-020-00703-8.

Acebes, F. et al. (2021) 'BIM Implementation in Construction Project Management', in *15th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management (ICIEIM) & XXV Congreso de Ingeniería de Organización (CIO2021)*. Burgos (Spain).

Acebes, F., Pajares, J. and López-Paredes, A. (2015) 'Gestión de riesgos del proyecto. Desde la gestión de riesgos a la gestión de incertidumbre', *XIX International Congress on Project Management and Engineering*, (July), pp. 15–17.

Akintoye, A. S. and MacLeod, M. J. (1997) 'Risk analysis and management in construction', *International Journal of Project Management*, 15(1), pp. 31–38. doi: 10.1016/S0263-7863(96)00035-X.

Allahi, F., Cassettari, L. and Mosca, M. (2017) 'Stochastic risk analysis and cost contingency allocation approach for construction projects applying Monte Carlo simulation', *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*. London, 2229(July), pp. 385–391.

Alleman, G. B., Coonce, T. J. and Price, R. A. (2018a) 'Increasing the Probability of Program Success with Continuous Risk Management', *College of Performance Management, The Measurable News*, (4), pp. 27–46.

Alleman, G. B., Coonce, T. J. and Price, R. A. (2018b) 'What is Risk?', *College of Performance Management, The Measurable News*, (1), pp. 25–34.

Anderson, S., Molenaar, K. and Schexnayder, C. (2007) *Guidance for Cost Estimation and Management for Highway Projects During Planning, Programming, and Preconstruction, National Cooperative Highway Research Program*. Washington, D.C. doi: 10.17226/14014.

Association for Project Management (2010) *Project Risk Analysis and Management Guide (PRAM Guide)*. 2nd edn. Edited by Association for Project Management. Buckinghamshire: Association for Project Management.

Atkinson, R., Crawford, L. H. and Ward, S. (2006) 'Fundamental uncertainties in projects and the scope of project management', *International Journal of Project Management*, 24(8).

AXELOS (2017) *Managing Successful Projects with PRINCE2®*. 6th Editio. Edited by AXELOS Limited. TSO (The Stationery Office).

Baccarini, D. (1996) 'The concept of project complexity - a review', *International Journal of Project Management*, 14(4), pp. 201–204. doi: 10.1016/0263-7863(95)00093-3.

Baccarini, D. (2006) 'The maturing concept of estimating project cost contingency - a review', in G. and Best, R. (ed) (ed.) *Proceedings of the Australasian University Building Educators Association Annual Conference 2006: 31st Annual Conference*. Sydney: NSW: University of Technology. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.111.3464&rep=rep1&type=pdf>.

Baccarini, D. and Love, P. E. D. (2014) 'Statistical Characteristics of Cost Contingency in Water Infrastructure Projects', *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(3), p. 04013063. doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000820.

Barraza, G. A. *et al.* (2007) 'Cost Contingency Management', *Journal of management in engineering*, (July), pp. 140–146.

Bu-Qammaz, A. S., Dikmen, I. and Birgonul, M. T. (2009) 'Risk assessment of international construction projects using the analytic network process', *Canadian Journal of Civil Engineering*, 36(7), pp. 1170–1181. doi: 10.1139/L09-061.

Cagliano, A. C., Grimaldi, S. and Rafele, C. (2015) 'Choosing project risk management techniques. A theoretical framework', *Journal of Risk Research*, 18(2), pp. 232–248. doi: 10.1080/13669877.2014.896398.

Chapman, C. B. and Ward, S. (2011) *How to Manage Project Opportunity and Risk*. New York: Wiley.

Chapman, C. and Ward, S. (2003) *Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights*. 2nd edn. Chichester, UK, UK: John Wiley & Sons Ltd.

Chapman, C. and Ward, S. (2004) 'Why risk efficiency is a key aspect of best practice projects', *International Journal of Project Management*, 22(8), pp. 619–632.

- Chia, E. S. (2006) 'Assessment Framework for Project Management', *IEEE*, pp. 376–379.
- Clark, D. E. (2001) 'Monte Carlo analysis: Ten years of experience', *Cost Engineering (Morgantown, West Virginia)*, 43(6), pp. 40–45.
- Colin, J. and Vanhoucke, M. (2016) 'Empirical Perspective on Activity Durations for Project-Management Simulation Studies', *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(1), p. 04015047. doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001022.
- Curto, D. (2020) *Herramientas y Técnicas en la Gestión de la Incertidumbre*. Edited by Departamento de Organización de Empresas y CIM. Escuela de Ingenierías Industriales. Universidad de Valladolid. Valladolid: Final Project.
- Curto, D. *et al.* (2020) 'Uncertainty Management: A Review of Tools and Techniques', in *14th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management (ICIEIM) & XXIV Congreso de Ingeniería de Organización (CIO2020)*. Madrid (Spain).
- Damjanovic, I. and Reinschmidt, K. (2020) *Data Analytics for Engineering and Construction Project Risk Management*. Cham: Springer International Publishing (Risk, Systems and Decisions).
- Dowie, J. (1999) 'Against risk.', *Risk Decision and Policy*, 4, pp. 57–73.
- El-Kholy, A. M., Tahwia, A. M. and Elsayed, M. M. (2020) 'Prediction of simulated cost contingency for steel reinforcement in building projects: ANN versus regression-based models', *International Journal of Construction Management*. Taylor & Francis, 0(0), pp. 1–15. doi: 10.1080/15623599.2020.1741492.
- EL-Matbaegy, S. *et al.* (2017) 'Risk Analysis of Construction Sector in Egypt (During the Economic Recession Periods)', *Port-Said Engineering Research Journal*, 21(2), pp. 37–50. doi: 10.21608/pserj.2017.33231.
- El-Sayegh, S. M. (2008) 'Risk assessment and allocation in the UAE construction industry', *International Journal of Project Management*, 26(4), pp. 431–438. doi: 10.1016/j.ijproman.2007.07.004.
- Eldosouky, I. A., Ibrahim, A. H. and Mohammed, H. E. D. (2014) 'Management of construction cost contingency covering upside and downside risks', *Alexandria Engineering Journal*. Faculty of Engineering, Alexandria University, 53(4), pp. 863–881. doi: 10.1016/j.aej.2014.09.008.
- Elms, D. G. (2004) 'Structural safety—Issues and progress', *Progress in Structural Engineering and Materials*, 6(2), pp. 116–126.
- European Commission (2018) *PM2 Project Management Methodology Guide 3.0*. 3.0. Edited by European Commission. European Commission.
- Fan, M., Lin, N. P. and Sheu, C. (2008) 'Choosing a project risk-handling strategy: An analytical model', *International Journal of Production Economics*, 112(2), pp. 700–713. doi:

10.1016/j.ijpe.2007.06.006.

Gosling, J., Naim, M. and Towill, D. (2013) 'Identifying and Categorizing the Sources of Uncertainty in Construction Supply Chains', *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(1), pp. 102–110. doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000574.

Hammad, M. W., Abbasi, A. and Ryan, M. J. (2015) 'A new method of cost contingency management', *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. IEEE, 2016-Janua, pp. 38–42. doi: 10.1109/IEEM.2015.7385604.

Hammad, M. W., Abbasi, A. and Ryan, M. J. (2016) 'Allocation and Management of Cost Contingency in Projects', *Journal of Management in Engineering*, 32(6), pp. 1–11. doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000447.

Han, S. and Diekmann, J. (2001) 'Approaches for making risk-based go/ no-go decision for international projects.', *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(4), pp. 300–308.

Hazır, Ö. (2015) 'A review of analytical models, approaches and decision support tools in project monitoring and control', *International Journal of Project Management*, 33(4), pp. 808–815. doi: 10.1016/j.ijproman.2014.09.005.

Hazır, Ö. and Ulusoy, G. (2019) 'A classification and review of approaches and methods for modeling uncertainty in projects', *International Journal of Production Economics*. Elsevier B.V., 223. doi: 10.1016/j.ijpe.2019.107522.

Hillson, D. (2002) 'Extending the risk process to manage opportunities', *International Journal of Project Management*, 20, pp. 235–240.

Hillson, D. (2003) 'Using a Risk Breakdown Structure in project management', *Journal of Facilities Management*, 2(1), pp. 85–97. doi: 10.1108/14725960410808131.

Hillson, D. (2004) *Effective Opportunity Management for Projects – Exploiting Positive Risk*, Taylor & Francis.

Hillson, D. (2009) *Managing Risk in Projects*. 1st edn, Gower Publishing limited. 1st edn. Farnham, UK, UK: Gower Publishing limited.

Hillson, D. (2014) 'How to manage the risks you didn't know you were taking', *PMI® Global Congress*, pp. 1–8.

Hillson, D. (2020) *Capturing Upside Risk: Finding and Managing Opportunities in Projects*. 1st edn, *Capturing Upside Risk*. 1st edn. Boca Raton: Taylor & Francis.

Hillson, D. A. (2005) 'Describing probability : The limitations of natural language Dimensions of risk', in *PMI® Global Congress 2005—EMEA*. Edinburgh, Scotland: Project Management Institute Inc., pp. 1–7.



- 
- Hillson, D. and Simon, P. (2012) *Practical Project Risk Management. The ATOM Methodology*. 2nd edn. Management Concepts Press.
- Hong, J. *et al.* (2016) 'Uncertainty analysis for measuring greenhouse gas emissions in the building construction phase: A case study in China', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 129, pp. 183–195. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.085.
- Hosny, H. E., Ibrahim, A. H. and Fraig, R. F. (2018) 'Risk management framework for Continuous Flight Auger piles construction in Egypt', *Alexandria Engineering Journal*. Faculty of Engineering, Alexandria University, 57(4), pp. 2667–2677. doi: 10.1016/j.aej.2017.10.003.
- Hulett, D. (2012) 'Acumen Risk For Schedule Risk Analysis - A User's Perspective', *White Paper*, (December). Available at: <https://info.delttek.com/acumen-risk-for-schedule-risk-analysis>.
- Idrus, A., Fadhil Nuruddin, M. and Rohman, M. A. (2011) 'Development of project cost contingency estimation model using risk analysis and fuzzy expert system', *Expert Systems with Applications*. Elsevier Ltd, 38(3), pp. 1501–1508. doi: 10.1016/j.eswa.2010.07.061.
- International Organization for Standardization (2018) 'ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines'.
- International Project Management Association (2015) *Individual Competence Baseline (IPMA ICB 4.0)*. 4.0. Edited by International Project Management Association. International Project Management Association.
- ISO 31000 (2018) 'Norma Internacional ISO 31000'.
- Jaafari, A. (2001) 'Management of risks, uncertainties and opportunities on projects: Time for a fundamental shift', *International Journal of Project Management*, 19(2), pp. 89–101.
- Kwon, H. and Kang, C. W. (2019) 'Improving Project Budget Estimation Accuracy and Precision by Analyzing Reserves for Both Identified and Unidentified Risks', *Project Management Journal*, 50(1), pp. 86–100. doi: 10.1177/8756972818810963.
- Lam, T. Y. M. and Siwingwa, N. (2017) 'Risk management and contingency sum of construction projects', *Journal of Financial Management of Property and Construction*, 22(3), pp. 237–251. doi: 10.1108/JFMPC-10-2016-0047.
- Lee, K.-P. *et al.* (2017) 'Management-Reserve Estimation for International Construction Projects Based on Risk-Informed k-NN', *Journal of Management in Engineering*, 33(4), p. 04017002. doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000510.
- Long, L. D. and Ohsato, A. (2008) 'Fuzzy critical chain method for project scheduling under resource constraints and uncertainty', *International Journal of Project Management*, 26(6), pp. 688–698. doi: 10.1016/j.ijproman.2007.09.012.
- Lorance, R. B. and Wendling, R. V. (2001) 'Basic techniques for analyzing and presentation of

cost risk analysis', *Cost Engineering*, 43(6), pp. 25–31.

Mahendra, P. A., Pitroda, J. R. and Bhavsar, J. J. (2013) 'A Study of Risk Management Techniques for Construction Projects in Developing Countries', *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 3(5), pp. 139–142.

Mak, S. and Picken, D. (2000) 'Using Risk Analysis to determine Construction Project Contingencies', *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(April), pp. 130–136.

Mohamed, E. *et al.* (2020) 'Simulation-based approach for risk assessment in onshore wind farm construction projects', in *2020 Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling, APARM 2020*. doi: 10.1109/APARM49247.2020.9209516.

Moreno-Cabezali, B. M. and Fernandez-Crehuet, J. M. (2020) 'Application of a fuzzy-logic based model for risk assessment in additive manufacturing R&D projects', *Computers and Industrial Engineering*, 145(May). doi: 10.1016/j.cie.2020.106529.

Moret, Y. and Einstein, H. H. (2016) 'Construction Cost and Duration Uncertainty Model: Application to High-Speed Rail Line Project', *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(10), p. 05016010. doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001161.

Ordóñez Arízaga, J. F. (2007) *A Methodology for Project Risk Analysis Using Bayesian Belief Networks Within a Monte Carlo Simulation Environment*, Thesis. University of Maryland, College Park.

Padalkar, M. and Gopinath, S. (2016) 'Are complexity and uncertainty distinct concepts in project management? A taxonomical examination from literature', *International Journal of Project Management*, 34(4), pp. 688–700.

Para-González, L., Mascaraque-Ramírez, C. and Madrid, A. E. (2018) 'Obtaining the budget contingency reserve through the monte carlo method: Study of a ferry construction project', *Brodogradnja*, 69(3), pp. 79–95. doi: 10.21278/brod69305.

Perminova, O., Gustafsson, M. and Wikström, K. (2008) 'Defining Uncertainty in Projects - A New Perspective', *International Journal of Project Management*, 26(1), pp. 73–79.

Project Management Institute (2008) *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*. 4th edn. Project Management Institute Inc.

Project Management Institute (2017) *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*. 6th edn. Pennsylvania - USA: Project Management Institute.

Project Management Institute (2019) *The Standard for Risk Management in Portfolios, Programs, and Projects*. 1st edn. Project Management Institute Inc.

Seyedhoseini, S. M., Noori, S. and Hatefi, M. A. (2009) 'An integrated methodology for assessment and selection of the project risk response actions', *Risk Analysis*, 29(5), pp. 752–763. doi:

---

10.1111/j.1539-6924.2008.01187.x.

Sonmez, R., Ergin, A. and Birgonul, M. T. (2007) 'Quantitative Methodology for Determination of Cost', *Journal of Management in Engineering*, 23(January), pp. 35–39.

Thal, A. E., Cook, J. J. and White, E. D. (2010) 'Estimation of Cost Contingency for Air Force Construction Projects', *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(11), pp. 1181–1188. doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000227.

Touran, A. (2003) 'Probabilistic Model for Cost Contingency', *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(3), pp. 280–284. doi: 10.1061/(asce)0733-9364(2003)129:3(280).

Traynor, B. A. and Mahmoodian, M. (2019) 'Time and cost contingency management using Monte Carlo simulation', *Australian Journal of Civil Engineering*. Taylor & Francis, 17(1), pp. 11–18. doi: 10.1080/14488353.2019.1606499.

Trietsch, D. *et al.* (2012) 'Modeling activity times by the Parkinson distribution with a lognormal core: Theory and validation', *European Journal of Operational Research*. Elsevier B.V., 216(2), pp. 386–396. doi: 10.1016/j.ejor.2011.07.054.

Van, S. Q., Le-Hoai, L. and Dang, C. N. (2019) 'Predicting implementation cost contingencies for residential construction projects in flood-prone areas', *International Journal of Managing Projects in Business*, 12(4), pp. 1097–1119. doi: 10.1108/IJMPB-04-2018-0071.

Ward, S. and Chapman, C. (2003) 'Transforming project risk management into project uncertainty management', *International Journal of Project Management*, 21(2), pp. 97–105.

Williams, T. M. (1995) 'A classified bibliography of recent research relating to project risk management', *European Journal of Operational Research*, 85, pp. 18–38.

Zhang, Y. and Fan, Z. P. (2014) 'An optimization method for selecting project risk response strategies', *International Journal of Project Management*. Elsevier Ltd and IPMA, 32(3), pp. 412–422. doi: 10.1016/j.ijproman.2013.06.006.

Zhi, H. (1995) 'Risk management for overseas construction projects', *International Journal of Project Management*, 13(4), pp. 231–237. doi: 10.1016/0263-7863(95)00015-I.



**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 1</b> Esquema del método propuesto.....	23
<b>Figura 2</b> Ejemplo de definición de escalas para la probabilidad y el impacto. Fuente: Project Management Institute (2017).....	30
<b>Figura 3</b> Diagrama de Gantt para los paquetes de trabajo. ....	39
<b>Figura 4</b> Curva de Valor Planificado (PV) del resultado de la simulación. ....	50
<b>Figura 5</b> Duración total para la incertidumbre aleatoria. ....	51
<b>Figura 6</b> Coste total para la incertidumbre aleatoria. ....	51
<b>Figura 7</b> Nube de puntos de la duración y el coste para la incertidumbre aleatoria.....	52
<b>Figura 8</b> Nube de puntos para duración y coste de la incertidumbre aleatoria.....	52
<b>Figura 9</b> Duración total para toda la incertidumbre. ....	55
<b>Figura 10</b> Coste total de toda la incertidumbre. ....	57
<b>Figura 11</b> Nube de puntos para la duración y el coste. ....	59
<b>Figura 12</b> Nube de puntos y curvas de distribución acumulada para la duración y el coste. ....	59



## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Riesgo para diversos autores.....	6
<b>Tabla 2</b> Principales Estándares para la Dirección de Proyectos.....	8
<b>Tabla 3</b> Riesgo para los principales Estándares para la Dirección de Proyectos.....	9
<b>Tabla 4</b> Funciones de distribución utilizadas por diversos autores. ....	11
<b>Tabla 5</b> Gestión del Riesgo para los principales Estándares para la Dirección de Proyectos. ....	14
<b>Tabla 6</b> Clasificaciones de Riesgos propuesta por diversos autores. ....	17
<b>Tabla 7</b> Clasificación de Riesgos de Construcción propuesta por diversos autores.....	18
<b>Tabla 8</b> Acciones de Respuesta al Riesgo.....	20
<b>Tabla 9</b> Principales <i>softwares</i> de estimación del camino crítico.....	24
<b>Tabla 10</b> Duración e incertidumbre en las actividades.....	26
<b>Tabla 11</b> Coste variable, coste fijo y coste total de las actividades.....	27
<b>Tabla 12</b> Identificación, explicación y clasificación del riesgo. ....	28
<b>Tabla 13</b> Variaciones de los valores proporcionales según Hulett (2012). ....	30
<b>Tabla 14</b> Incertidumbre Epistémica: Funciones de distribución y número de intervalos.....	31
<b>Tabla 15</b> Probabilidad para los riesgos identificados.....	32
<b>Tabla 16</b> Impacto en la duración para los riesgos identificados.....	32
<b>Tabla 17</b> Impacto en el coste para los riesgos identificados. ....	32
<b>Tabla 18</b> Plantilla de niveles para la probabilidad (%). ....	33
<b>Tabla 19</b> Plantilla de niveles para el impacto en duración. ....	33
<b>Tabla 20</b> Plantilla de niveles para el impacto en costes. ....	33
<b>Tabla 21</b> Paquetes de trabajo identificados para el proyecto de construcción del Aulario IndUVa.....	39
<b>Tabla 22</b> Duración y coste del proyecto de construcción del Aulario IndUVa.....	40
<b>Tabla 23</b> Riesgo y explicación, clasificación en amenaza u oportunidad y paquetes de trabajo afectados del proyecto de construcción del Aulario IndUVa.....	42
<b>Tabla 24</b> Niveles de probabilidad para el proyecto analizado.....	43
<b>Tabla 25</b> Niveles de impacto en duración para el proyecto analizado. ....	43
<b>Tabla 26</b> Niveles de impacto en costes para el proyecto analizado. ....	44
<b>Tabla 27</b> Riesgos del proyecto de construcción del Aulario IndUVa. ....	46

<b>Tabla 28</b> Resultados de la simulación para la incertidumbre aleatoria. ....	48
<b>Tabla 29</b> Percentiles de la duración y el coste para la incertidumbre aleatoria. ....	49
<b>Tabla 30</b> Resultados de la simulación para toda la incertidumbre. ....	53
<b>Tabla 31</b> Compendio de resultados obtenidos para ambas simulaciones. ....	54
<b>Tabla 32</b> Percentiles de la duración y el coste para todos los tipos de incertidumbre. ....	54
<b>Tabla 33</b> Comparación de las curvas de Duración Total para ambas simulaciones ....	56
<b>Tabla 34</b> Comparación de las curvas de Coste Total para ambas simulaciones.....	57
<b>Tabla 35</b> Comparación de las nubes de puntos para ambas simulaciones.....	60
<b>Tabla 36</b> Percentiles obtenidos de las dos simulaciones realizadas. ....	61
<b>Tabla 37</b> Percentiles más relevantes para la asignación de contingencias. ....	61
<b>Tabla 38</b> Diferencia absoluta en los principales percentiles. ....	62
<b>Tabla 39</b> Contingencias de coste para un determinado nivel de confianza. ....	62
<b>Tabla 40</b> Comparativa de las contingencias de coste obtenidas con las contingencias del método tradicional. ....	63