

08-015

INFLUENCE OF DIFFERENT TYPES OF UNCERTAINTY IN PROJECT RISK MANAGEMENT: A SENSITIVITY ANALYSIS

Curto Lorenzo, David ⁽¹⁾; Pajares Gutiérrez, Javier ⁽¹⁾; Martín Cruz, Teresa Natalia ⁽¹⁾; Acebes Senovilla, Fernando ⁽¹⁾

(1) Universidad de Valladolid

Although various types of uncertainty are identified in the literature, most studies on project risk management consider only aleatoric uncertainty. In these cases, more vital information must be needed for project analysis. The main objective of this work is to verify the importance of incorporating all the uncertainty of a project, and not only random uncertainty, into a Monte Carlo simulation (MCS). Considering all sources of uncertainty provides more accurate, precise, and complete information. We will focus on how project duration and cost vary to observe how activities are influenced when all uncertainty is incorporated. The results will be compared using sensitivity indicators on an actual construction project.

Keywords: Monte Carlo simulation; quantitative analysis; sensitivity analysis; risk management; uncertainty management; project management

INFLUENCIA DE LOS DIFERENTES TIPOS DE INCERTIDUMBRE EN LA GESTIÓN DE RIESGOS EN PROYECTOS: UN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

A pesar de que existen diversos tipos de incertidumbre identificados en la literatura, la mayoría de los estudios que se producen en torno a la gestión del riesgo de los proyectos tienen en cuenta únicamente la incertidumbre aleatoria. En estos casos, existe una falta de información vital para el análisis de los proyectos. El objetivo principal de este trabajo es verificar la importancia de incorporar a una simulación de Monte Carlo (MCS) toda la incertidumbre de un proyecto, y no solamente la incertidumbre aleatoria. Atender a todas las fuentes de incertidumbre permite obtener una información más exacta, precisa y completa. Para observar cómo influyen las actividades cuando se incorpora toda la incertidumbre, nos centraremos en cómo varían la duración y el coste del proyecto. Los resultados obtenidos se compararán mediante la utilización de indicadores de sensibilidad en un proyecto real de construcción.

Palabras clave: Simulación de Monte Carlo; análisis cuantitativo; análisis de sensibilidad; gestión de riesgos; gestión de la incertidumbre; dirección de proyectos

Agradecimientos: Esta investigación ha sido parcialmente financiada por la Junta de Castilla y León (España) con la subvención (VA180P20).



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La gestión de riesgos es el proceso sistemático de identificación, análisis y respuesta a los riesgos del proyecto (Project Management Institute, 2021). Por su propia definición, el riesgo es la incertidumbre proveniente de las actividades de un proyecto que no podemos controlar (Hillson, 2014). Observamos como en la literatura se considera la incertidumbre aleatoria como la principal fuente de riesgo, llevando a diversos autores a realizar análisis incorporando únicamente la incertidumbre aleatoria (Costantino & Pellegrino, 2010; Elmaghraby, 2000; Lee et al., 2013; Lei & MacKenzie, 2019; Miller & Engemann, 2008; Panova & Hilletoft, 2018; Qazi et al., 2022; Rymarczyk & Kłosowski, 2017; Schmitt & Singh, 2009; Tokdemir et al., 2019; Vanhoucke, 2010, 2011) pero, tal y como demuestran otras investigaciones, existen más tipos de incertidumbre que podemos considerar como riesgo: incertidumbres estocástica, epistémica y ontológica (Hillson, 2020). Los autores Chapman & Ward (2012) definen 4 tipos de incertidumbre de la siguiente manera: la incertidumbre de ambigüedad, que implica falta de conocimiento; la variabilidad inherente, que está presente en los eventos que sabemos que ocurrirán, la incertidumbre de eventos está presente en los eventos donde no sabemos si pueden ocurrir; y la incertidumbre sistémica, presente en el sistema e imposible de predecir.

Incorporar todos los tipos de incertidumbre que afectan a un mismo proyecto podrá posibilitar un mejor resultado porque estará más ajustado a la realidad. Es importante tener en cuenta todos los aspectos del proyecto donde puedan surgir riesgos, para tener una visión holística de la situación (Miller & Engemann, 2008). Con este trabajo, buscamos demostrar que se puede realizar un análisis más preciso sobre un proyecto teórico.

En este trabajo, incorporaremos riesgos a un proyecto para centrarnos en un área concreta de la gestión del riesgo: la influencia de los riesgos en las actividades, que será medida mediante indicadores de sensibilidad. Otras áreas de la Gestión del Riesgo se centran principalmente en la utilización de buffers y otras estrategias para la Gestión del Riesgo que reduzcan la incertidumbre (Miller & Engemann, 2008). Además, utilizaremos indicadores de sensibilidad para medir cuantitativamente la importancia de las actividades de un proyecto. A su vez, veremos cómo podrían variar las distintas actividades una vez que se incorporen los riesgos que pueden afectar al proyecto y, podremos observar cuáles de ellas se verían más afectadas por la incertidumbre.

Para ello, partiremos de un proyecto teórico, donde tenemos las duraciones y los costes de las actividades ya definidas e incluiremos riesgos. Este proceso será modelado a través de una aplicación desarrollada explícitamente en MATLAB® denominada "MCSimulRisk" (Acebes, de Antón, et al., 2022)., la cual permite incluir cualquier incertidumbre en el modelo y simular los posibles escenarios.

Utilizando los indicadores de sensibilidad, veremos cómo los riesgos hacen variar la importancia de las actividades en los proyectos, y cómo cambia la importancia si se tienen en cuenta todas las incertidumbres. Dado que los riesgos tienen un impacto en la duración y el coste de las actividades, podremos cuantificar el impacto por los análisis de sensibilidad se integran dentro de los análisis cuantitativos en Gestión de Riesgos. A diferencia de los métodos cualitativos, estos aportan mayor valor porque permiten incorporar todas las incertidumbres (Curto et al., 2022).

A partir de este punto, el artículo se estructura de la siguiente manera. En el capítulo siguiente, se realizará una revisión de los antecedentes sobre la Gestión del Riesgo y la Incertidumbre, los métodos cuantitativos, especialmente la simulación de Monte Carlo; y la utilización de indicadores de sensibilidad. Posteriormente, en el apartado 3, se presentará el proceso propuesto para analizar el caso de estudio. En el capítulo 4 se presenta el Caso de

Estudio. Finalmente, en el capítulo 5 se analizarán los resultados obtenidos tras la simulación y se presentarán las conclusiones en el capítulo 6.

2. Antecedentes

Existe una gran cantidad de trabajos donde se emplean diversos métodos cualitativos y cuantitativos, y herramientas de simulación que, en el caso de incorporar incertidumbre al modelo, solo se incluye la incertidumbre aleatoria. Azadeh & Alem (2010) realiza una simulación de distintos métodos cuantitativos, como son DEA, FDEA y CCDEA, concluyendo que no se tiene la suficiente información.

La simulación de Monte Carlo (MCS) ha sido ampliamente utilizada por diversos autores para modelar funciones de distribución probabilística (AACE International, 2011; Acebes, Pajares, et al., 2015; Acebes, Pereda, et al., 2015; Acebes, Poza, et al., 2022; Colin & Vanhoucke, 2016; Curto et al., 2022; Traynor & Mahmoodian, 2019). Mangla et al. (2014) realizan una evaluación de riesgos capturando la incertidumbre aleatoria de un proyecto, enfocándose hacia las desviaciones y retrasos. Aun así, valoran que la MCS es un método válido para incorporar la incertidumbre. Por su parte, Tokdemir et al. (2019) también miden el retraso en un proyecto mediante MCS, lo que le permite estimar las desviaciones y elaborar estrategias de respuesta como los planes de contingencia. Sin embargo, no tienen en cuenta riesgos estocásticos que pueden ocurrir en algún momento del proyecto.

De la incertidumbre surgen los riesgos (Hillson, 2014), y Qazi et al. (2022) concluyen que la MCS podría mejorar si se incluyen riesgos positivos -oportunidades-. Igualmente, apunta hacia la necesidad de investigar en riesgos críticos y la búsqueda de modelos que permitan capturar los riesgos individuales -incertidumbre estocástica-. Una vez que se obtienen los riesgos, los autores proponen incorporar a la simulación una matriz de riesgos que sea capaz de cuantificar los riesgos.

Esta visión sobre la necesidad de profundizar en métodos cuantitativos que sean capaces de incorporar la máxima información posible es palpable en Gurtu & Johny (2021), quienes concluyen en su revisión de la literatura que es necesario focalizarse en los riesgos que afectan a todo el proyecto, mejorando la evaluación, el análisis y la gestión de los riesgos mediante análisis cuantitativos. A su vez, los autores Mula & Bogataj (2021) concluyen que los trabajos en gestión de riesgos han crecido en alcance, focalizándose en optimización, análisis de datos, simulaciones y comunicaciones en tiempo real.

La simulación de Monte Carlo aporta una estructura más completa que otros métodos cuantitativos en cuanto a los aspectos probabilísticos y destaca especialmente en incorporar incertidumbres cuando la probabilidad de ocurrencia está presente (Olson & Wu, 2011). Panova & Hilletoft (2018) concluyen que los modelos de simulación son óptimos para la evaluación y la gestión de riesgos. Por otro lado, la MCS permite estudiar el retraso en el impacto, la variación en la probabilidad y la distribución de los impactos a lo largo del proyecto.

Lee et al. (2013) concluyen que los métodos cuantitativos minimizan los errores que puedan suceder en torno a la duración y al coste, de forma separada. Aun así, a pesar de tratar con técnicas deterministas, estocásticas y fuzzy, Azadeh & Alem (2010) razonan que la información que generalmente alimenta la simulación es inexacta y es necesario incorporar más información.

Algunos autores optan por utilizar varios métodos cuantitativos en un mismo estudio. Lei & MacKenzie (2019) utilizan un modelo de la cadena de Markov, MCS y Árboles de falla dinámicos (Dynamic Fault Trees). Lee et al. (2013) utilizan MCS y Redes de Petri. Costantino & Pellegrino (2010) optan por MCS y análisis de sensibilidad para comparar si la

diversificación es significativamente mejor estrategia que no hacerlo en entornos de múltiple incertidumbre.

Los métodos cuantitativos se pueden aplicar en cualquier fase del proyecto, aunque destacan en la fase de planificación, siendo una herramienta válida para controlar el riesgo de los proyectos (Vanhoucke, 2019). Entre estas herramientas, existen indicadores de sensibilidad que miden la importancia de las actividades en relación a un parámetro dado, generalmente el coste y la duración del mismo. Es decir, miden la capacidad de afectación de cada actividad sobre las desviaciones que se pueden producir en los proyectos y permiten obtener con elevada certeza el escenario más probable en el que se desarrollará el proyecto, en función de las actividades afectadas en la fase de ejecución.

El proceso para establecer un análisis de sensibilidad parte de la planificación del proyecto. Posteriormente, se definirán las incertidumbres y sus impactos en la duración y el coste. Esta información será incluida en una MCS, de donde se obtendrán los indicadores de sensibilidad a analizar en los resultados (Vanhoucke, 2012). El autor también analiza los siguientes indicadores y el valor que miden: Criticality Index (CI), que mide la probabilidad de que una actividad se encuentre en el camino crítico; Significance Index (SI), la importancia relativa de cada actividad, Schedule Sensitivity Index (SSI), la importancia relativa de una actividad teniendo en cuenta la IC y Cruciality Index (CRI) la correlación entre la duración de la actividad y la duración total del proyecto.

Debido a que existen dificultades por no disponer de suficiente información, como concluye Elmaghraby (2000) al aplicar CRI y SI en un diagrama PERT, otros autores han desarrollado un nuevo indicador, como por ejemplo el Activity Risk Index (ARI), que calcula la contribución de cada actividad al riesgo global del proyecto mientras está en curso (Acebes et al., 2021).

El Management-Oriented Index (MOI) proporciona una métrica representativa para el análisis de sensibilidad de las actividades, donde $E(TF_i)$ es el valor esperado de holgura de la actividad i . $Post_Density_i$ es igual al número total de sucesores de la actividad i dividido por el número total de actividades del proyecto:

$$MOI_i = \sigma_i / (\sigma_{max} (E(TF_i) - Post_{Density_i} + 1)) \quad (1)$$

Por su parte, el Schedule Sensitivity Index (SSI) relaciona la probabilidad que tiene una actividad de pertenecer al camino crítico. La particularidad de este indicador reside en que esa relación está corregida con la variabilidad de la duración de la actividad y su impacto en el proyecto:

$$SSI = CI (\sigma_i / \sigma_{PD}) \quad (2)$$

El Criticality Index (CI) mide el porcentaje de las simulaciones en las que una actividad pertenece al camino crítico, obteniendo la influencia de la actividad sobre la duración total del proyecto. Así, t_{fi} es la holgura total de la actividad i .

$$CI = P(t_{fi} = 0) \quad (3)$$

EL Significance Index (SI) expone la importancia de las actividades en la duración total del proyecto, de forma individual, a diferencia del CI que expresa la criticidad mediante la probabilidad. El SI se sirve del valor esperado de x , $E(x)$; la duración de la actividad i , d_i ; la holgura de la actividad i , t_{fi} ; y la duración real, RD.

$$SI = E((di \cdot RD) / ((di + tfi) \cdot E(RD))) \quad (4)$$

El Cruciality Index (CRI) es una medida de correlación entre la duración de la actividad y la duración total del proyecto, reflejando la importancia relativa de una actividad de una manera y calcula la parte de la incertidumbre de la duración total del proyecto que puede explicarse por la incertidumbre de una actividad.

$$CRI = |Corr\{Duración\ de\ la\ Actividad,\ Duración\ del\ Proyecto\}| \quad (5)$$

Aplicando estos indicadores de sensibilidad a cada una de las actividades, podremos ver cómo su criticidad y crucialidad varían si pasamos de un modelo que incluye solo incertidumbre aleatoria, a otro modelo que incorpora toda la incertidumbre.

Los riesgos surgen de la incertidumbre, y la literatura identifica 4 tipos: aleatoria, epistémica, estocástica y ontológica (Hillson, 2014), aunque otros autores las denominen de distinta forma (Chapman & Ward, 2012). El problema principal que se aprecia en la literatura es la necesidad de aportar la mayor información posible al modelo. Muchos autores destacan que incorporar riesgos individuales al proyecto podría mejorar sus análisis (Azadeh & Alem, 2010; Gurtu & Johny, 2021; Mula & Bogataj, 2021; Tokdemir et al., 2019).

3. Proceso Propuesto

Para conseguir los objetivos, proponemos un proceso que permite incorporar al modelo los riesgos que surgen de los distintos tipos de incertidumbre. Por un lado, debemos modelar la duración y el coste de cada una de las actividades para identificar en cuál de ellas podrán impactar los distintos riesgos. Por otro lado, debemos modelar los riesgos identificados y su relación con las actividades. Para ello, nos serviremos de diversas Funciones de Distribución Probabilística (PDF), siendo las más comunes la distribución uniforme, triangular, normal, lognormal y Bernoulli (Colin & Vanhoucke, 2016; Curto et al., 2022).

Paralelamente, crearemos las Matrices de Probabilidad e Impacto propias del proyecto, teniendo en cuenta las particularidades del proyecto, como son sus dimensiones o la madurez hacia el riesgo de la organización (del Caño & de la Cruz, 2002). Se crearán dos matrices, una para evaluar la duración y otra para el coste. Esto nos permite ver la relación real que existe entre estos dos aspectos, dado que existen riesgos de duración que tienen un impacto en coste, debido a la estructura de costes fijos que tenga la organización. Por su parte, podrán existir riesgos que únicamente afecten a la duración, y otros que simplemente impacten en el coste.

Las actividades y los riesgos del proyecto se modelan como funciones PDF, y se pueden incorporar al software MCSimulRisk. Esta aplicación permite incluir cualquier incertidumbre en el modelo, realizar una MCS y obtener los valores de los indicadores de sensibilidad en tablas y gráficos para su análisis.

Para comprobar que los riesgos influyen en el proyecto, utilizaremos un análisis con indicadores de sensibilidad. Los indicadores utilizados serán el MOI y el SSI, pues se basan en una mayor complejidad que el resto de los indicadores comúnmente utilizados. Ambos indicadores son métricas usadas en Dynamic Scheduling y tienen una amplia trayectoria en la literatura (Acebes et al., 2021).

Nuestro objetivo es analizar la importancia de las actividades mediante indicadores de sensibilidad en dos escenarios: sin incluir riesgos e incorporando la incertidumbre que rodea al proyecto. Para ello, partiremos de un proyecto teórico con la información relativa a la duración y coste planificados de las actividades y su orden de precedencias. Nos serviremos de la Simulación de Monte Carlo para estimar la variabilidad en las actividades y los riesgos.

A partir de la red del proyecto, incorporaremos la incertidumbre aleatoria mediante funciones de distribución normal para la duración y el coste, como caso de estudio general (Colin & Vanhoucke, 2016; Traynor & Mahmoodian, 2019), si bien el director del proyecto podría elegir otras funciones PDF en base a las características específicas de cada actividad.

A la hora de incorporar el resto de incertidumbre, identificamos los riesgos asociados al proyecto, según el modelo establecido en (Curto et al., 2022). Los riesgos asociados con la incertidumbre estocástica se producen con una probabilidad conocida, y se pueden modelar con la función de distribución de Bernoulli (Allahi et al., 2017; Kwon & Kang, 2019). La incertidumbre epistémica se caracteriza por no conocer su probabilidad, por lo que se puede modelar utilizando una función de distribución uniforme, caracterizada por un valor mínimo y valor máximo de probabilidad (Traynor & Mahmoodian, 2019).

Como se utilizarán funciones de distribución probabilística para el impacto sobre la duración y el coste de los riesgos, se pueden abarcar todas las posibilidades: riesgos con impacto únicamente en duración o coste y riesgos con impacto en duración y coste (Lee et al., 2013).

Realizaremos dos simulaciones principales, siendo la primera la que únicamente incorpora la incertidumbre aleatoria de las actividades. Esta simulación será comparada con la segunda, donde incorporaremos el resto de los riesgos y podremos comprobar si se valida nuestra tesis: incorporar todos los tipos de incertidumbre cambia la importancia de las actividades. Para ello, comparamos los valores de una simulación que incluye únicamente incertidumbre aleatoria con los obtenidos cuando se simula el proyecto incorporando los riesgos identificados, observando las diferencias entre estas dos situaciones.

Para validar nuestra tesis en la que los riesgos influyen significativamente en las actividades, utilizaremos indicadores de sensibilidad, puesto que han sido previamente estudiados en la literatura (Acebes, Poza, et al., 2022; Elmaghraby, 2000; Ragsdale, 1989; Vanhoucke, 2010, 2012).

De todos los indicadores de sensibilidad que existen, representaremos los más característicos: CI, CRI, SI, SSI y MOI, y nos centraremos con más detalle en el SSI y el MOI, pues son indicadores completos (Vanhoucke, 2011).

4. Caso de Estudio

En este trabajo, estudiaremos un proyecto teórico que se estructura en 8 actividades, donde sus duraciones, coste y precedencias se muestran en la Tabla 1, y la red del proyecto se muestra en la Figura 1. Los niveles de riesgo para la probabilidad, el impacto en duración y en coste se muestran en la Tabla 2 y los riesgos identificados se muestran en la Tabla 3.

Figura 1. Red del proyecto

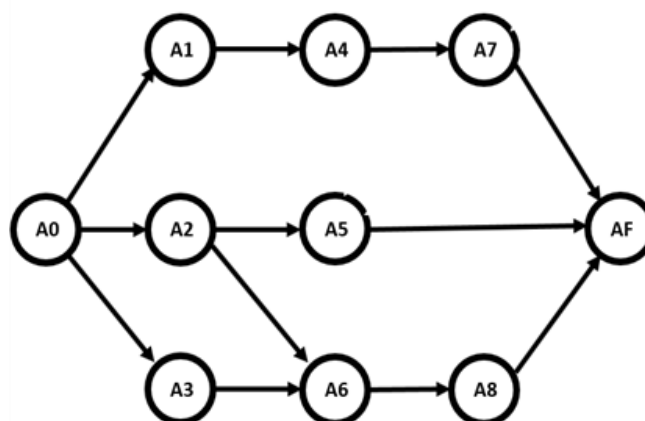


Tabla 1. Duración, coste y precedencias de las actividades del proyecto

Actividad	PDF	μ	σ	Coste	Precedencia
A1	Normal	2	0,5	755	-
A2	Normal	4	1	1750	-
A3	Normal	7	1	93	-
A4	Normal	3	1	916	A1
A5	Normal	6	1	34	A2
A6	Normal	4	1	1250	A2, A3
A7	Normal	8	0,75	875	A4
A8	Normal	2	0,75	250	A6

Tabla 2. Niveles de riesgo para la probabilidad, duración y coste

Nivel	Probabilidad		Impacto	
	Intervalo Probabilidad (%)	Intervalo Impacto Duración (días)	Intervalo Impacto Coste (miles de u.m.)	
Muy Bajo	0-3	0-1	0-1	
Bajo	3-10	1-5	1-5	
Medio	10-20	5-13	5-15	
Alto	20-35	13-22	15-40	
Muy Alto	35-100	>22	>40	

Tabla 3. Riesgos identificados

ID Riesgo	PDF	Probabilidad	Impacto Coste	Impacto Duración	Actividad Impactada
R1	Uniforme	0.2-0.4	-	2-3	A2
R2	Determinista	0.5	-	4	A5
R3	Uniforme	0.4-0.5	-	1.5-2.5	A6
R4	Determinista	0.6	100	-	A5
R5	Uniforme	0.4-0.8	500-1000	-	A7

Primeramente, realizaremos una simulación teniendo en cuenta la información de las actividades de la Tabla 1: precedencias, duración y coste. Posteriormente, incorporaremos a una nueva simulación los riesgos identificados en la Tabla 3. De ambas simulaciones obtendremos los indicadores de sensibilidad, donde compararemos las dos situaciones.

5. Discusión de Resultados

En la Figura 2 se representan los valores obtenidos de la primera simulación para la duración y el coste, sin incluir riesgos, mientras que en la Figura 3 se muestran los mismos resultados para la segunda simulación, donde se incluyen los riesgos. Se puede observar una mayor dispersión en los resultados cuando se incluyen los riesgos, haciendo que la campana de Gauss se vea ligeramente desplazada hacia la derecha, tanto en la duración como en el coste, fruto de la nueva incertidumbre añadida.

Figura 2. Curvas acumuladas de distribución probabilística para la duración y el coste sin incluir riesgos

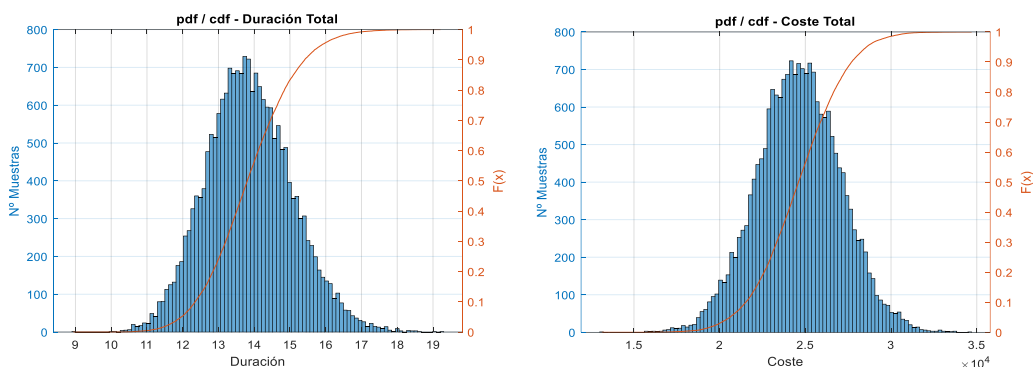
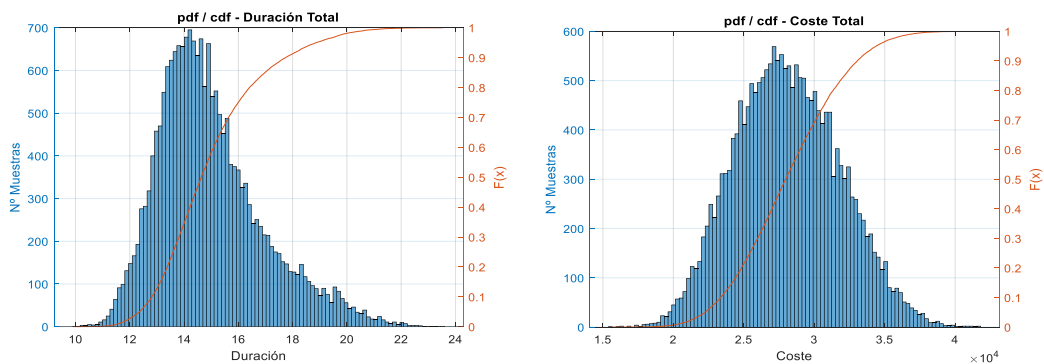


Figura 3. Curvas acumuladas de distribución probabilística para la duración y el coste incluyendo los riesgos



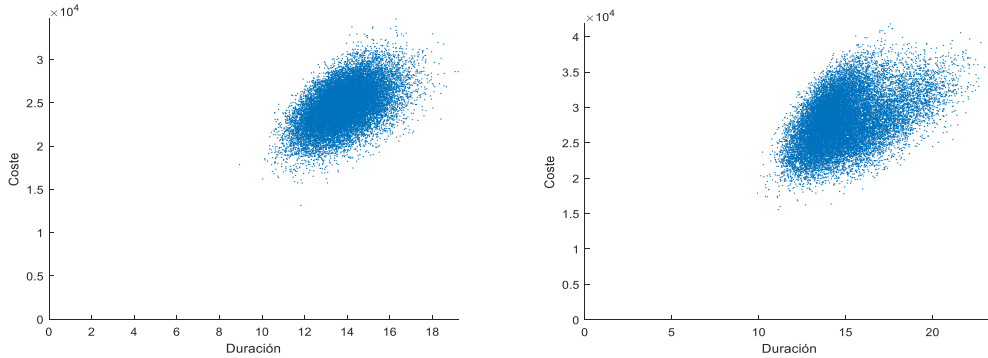
En la Figura 3 se representa el cuadrante tiempo-coste de la situación final de cada una de las simulaciones, donde la nube de puntos se desvía hacia proyectos simulados de mayor coste y mayor duración cuando incorporamos nueva incertidumbre.

Se puede medir la relevancia de cada actividad aplicando un análisis con los indicadores de sensibilidad. En la Figura 4 se representan los valores para los indicadores Criticality Index (CI), Cruciality Index (CRI), Significance Index (SI), Schedule Sensitivity Index (SSI) y Management-Oriented Index (MOI) arrojados por la primera simulación, donde no se incluyen riesgos.

En la Figura 5 se muestran los valores para los indicadores obtenidos de la segunda simulación, incorporando riesgos y son Uncertainty Criticality Index (U-CI), Uncertainty

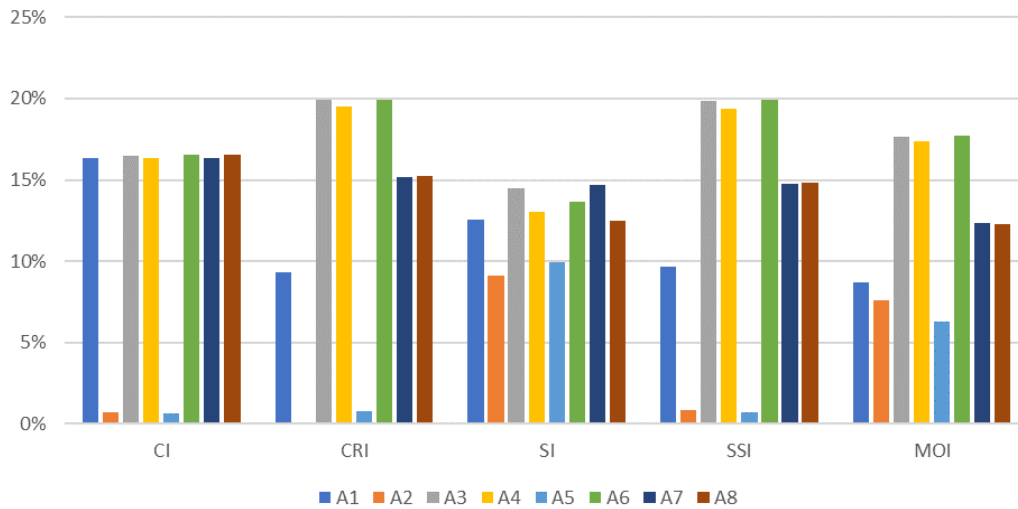
Cruciality Index (U-CRI), Uncertainty Significance Index (U-SI), Uncertainty Schedule Sensitivity Index (U-SSI) y Uncertainty Management-Oriented Index (U-MOI).

Figura 3. Nube de puntos para la duración y el coste sin incluir riesgos (izquierda) e incluyendo riesgos (derecha)



En comparación de ambas situaciones, la incorporación de riesgos genera una variación significativa en todos los indicadores. En cuanto a los indicadores CI y U-CI, y SI y U-SI, se aprecia un cambio hacia un mayor equilibrio en la importancia de las actividades.

Figura 4. Indicadores de sensibilidad cuando no se incluyen riesgos (primera simulación)



Por el contrario, los cambios más notables se aprecian en los otros tres indicadores. Para un análisis en mayor profundidad, nos centraremos en los indicadores SSI y U-SSI (Figura 6), y MOI y U-MOI (Figura 7). Ambos indicadores presentan características similares, aumentando la importancia de las actividades A2 y A5 cuando se incluyen riesgos en el análisis, a costa del resto de actividades, las cuales pierden influencia.

Figura 5. Indicadores de sensibilidad incorporando riesgos (segunda simulación)

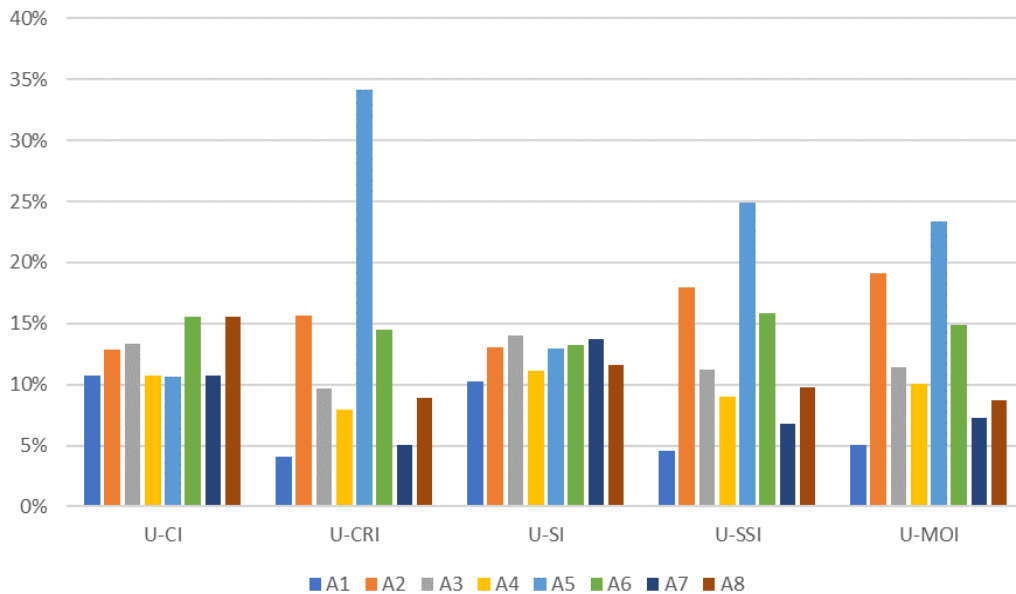


Figura 6. Comparativa SSI y U-SSI

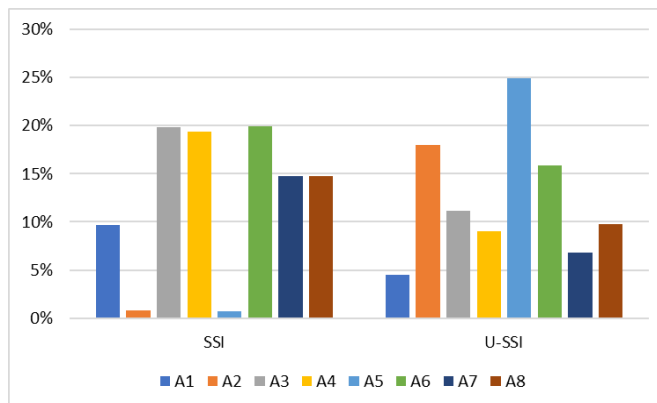
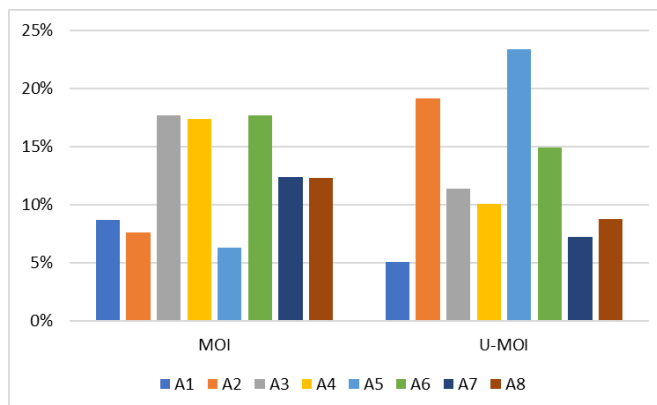


Figura 7. Comparativa MOI y U-MOI



7. Conclusiones

La contribución principal de este trabajo es demostrar cómo, al incorporar todos los tipos de incertidumbre existentes en un proyecto, la importancia de las actividades se ve alterada. En comparación con otros trabajos donde únicamente se analiza la incertidumbre aleatoria, esta nueva forma permite comprobar cómo varía la importancia de las actividades que son impactadas por los riesgos, y cómo varían el coste y la duración del proyecto.

En este trabajo, hemos separado los riesgos que pueden afectar a la duración y al coste, y hemos estudiado la relación que existe entre ambos. De este modo, se pueden centrar los esfuerzos en gestionar las actividades que sufren un impacto mayor de los riesgos.

Los resultados nos indican información que solo se pueden conseguir aplicando este proceso cuantitativo, puesto que existe un riesgo que únicamente impacta en la duración pero que tiene un impacto en coste muy elevado. Por lo tanto, para realizar una óptima gestión de riesgos, deberíamos centrarnos en controlar dicho riesgo.

Por otro lado, dependiendo de las actividades a las que impacte un riesgo, habrá un impacto más o menos grande en el conjunto del proyecto. Hemos podido medir ese cambio en la importancia de las actividades gracias a un análisis con indicadores de sensibilidad, midiendo la criticidad y crucialidad de las actividades en los dos escenarios que comparamos, si solo se incluye incertidumbre aleatoria o si se incluye toda la incertidumbre., concluyendo que la importancia de las actividades se ve modificada cuando se incorporan riesgos al modelo.

8. Referencias

- AACE International, A. for the A. of C. E. (2011). Integrated cost and schedule risk analysis using Monte Carlo simulation of a CPM model. In *AACE International Recommended Practice No. 57R-09*.
- Acebes, F., de Antón, J., Villafañez, F., & Poza, D. (2022). A Matlab-Based Educational Tool for Quantitative Risk Analysis. In F. P. García Márquez, I. Segovia Ramirez, P. J. Bernalte Sánchez, & A. Muñoz del Río (Eds.), *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Data Engineering and Communications Technologies. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-27915-7_8
- Acebes, F., Pajares, J., Galán, J. M., & López-Paredes, A. (2015). Exploring the Relations between Project Duration and Activity Duration. *Project Management and Engineering*, 19–30. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12754-5_2
- Acebes, F., Pajares, J., González-Varona, J. M., & López-Paredes, A. (2021). Project risk management from the bottom-up: Activity Risk Index. *Central European Journal of Operations Research*, 29(4), 1375–1396. <https://doi.org/10.1007/s10100-020-00703-8>
- Acebes, F., Pereda, M., Poza, D., Pajares, J., & Galán, J. M. (2015). Stochastic earned value analysis using Monte Carlo simulation and statistical learning techniques. *International Journal of Project Management*, 33(7), 1597–1609. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2015.06.012>
- Acebes, F., Poza, D., González-Varona, J. M., Pajares, J., & López-Paredes, A. (2022). On the project risk baseline: integrating aleatory uncertainty into project scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 160(107537). <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2022.108626>
- Allahi, F., Cassettari, L., & 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*, 2229(July), 385–391.
- Azadeh, A., & Alem, S. M. (2010). A flexible deterministic, stochastic and fuzzy Data Envelopment Analysis approach for supply chain risk and vendor selection problem: Simulation analysis. *Expert Systems with Applications*, 37(12), 7438–7448. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.04.022>
- Chapman, C., & Ward, S. (2012). *How to Manage Project Opportunity and Risk: Why Uncertainty Management can be a much better approach than Risk Management* (3rd ed). John Wiley & Sons Ltd.
- Colin, J., & Vanhoucke, M. (2016). Empirical Perspective on Activity Durations for Project-Management Simulation Studies. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(1), 04015047. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001022](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001022)
- Costantino, N., & Pellegrino, R. (2010). Choosing between single and multiple sourcing based on supplier default risk: A real options approach. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 16(1), 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2009.08.001>
- Curto, D., Acebes, F., González-Varona, J. M., & Poza, D. (2022). Impact of aleatoric, stochastic and epistemic uncertainties on project cost contingency reserves. *International Journal of Production Economics*, 253, 108626. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2022.108626>
- del Caño, A., & de la Cruz, M. P. (2002). Integrated Methodology for Project Risk Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(6), 473–485. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9364\(2002\)128:6\(473\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9364(2002)128:6(473))
- Elmaghraby, S. E. (2000). On criticality and sensitivity in activity networks. *European Journal of Operational Research*, 127(2), 220–238. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00483-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00483-X)
- Gurtu, A., & Johnny, J. (2021). Supply chain risk management: Literature review. *Risks*, 9(1), 1–16. <https://doi.org/10.3390/risks9010016>
- Hillson, D. (2014). How to manage the risks you didn't know you were taking. *PMI® Global Congress*, 1–8.
- Hillson, D. (2020). Capturing Upside Risk: Finding and Managing Opportunities in Projects. In *Capturing Upside Risk* (1st ed.). Taylor & Francis.
- Kwon, H., & 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), 86–100. <https://doi.org/10.1177/8756972818810963>
- Lee, C. K. M., Lv, Y., & Hong, Z. (2013). Risk modelling and assessment for distributed manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 51(9), 2652–2666. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.738943>
- Lei, X., & MacKenzie, C. A. (2019). Assessing risk in different types of supply chains with a dynamic fault tree. *Computers and Industrial Engineering*, 137(September), 106061. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106061>
- Mangla, S. K., Kumar, P., & Barua, M. K. (2014). Monte Carlo simulation based approach to manage risks in operational networks in green supply chain. *Procedia Engineering*, 97, 2186–2194. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.462>
- Miller, H. E., & Engemann, K. J. (2008). A Monte Carlo simulation model of supply chain risk due to natural disasters. *International Journal of Technology, Policy and Management*, 8(4), 460–480. <https://doi.org/10.1504/IJTPM.2008.020169>

- Mula, J., & Bogataj, M. (2021). OR in the industrial engineering of Industry 4.0: experiences from the Iberian Peninsula mirrored in CJOR. *Central European Journal of Operations Research*, 29(4), 1163–1184. <https://doi.org/10.1007/s10100-021-00740-x>
- Olson, D. L., & Wu, D. (2011). Risk management models for supply chain: A scenario analysis of outsourcing to China. *Supply Chain Management*, 16(6), 401–408. <https://doi.org/10.1108/135985411111171110>
- Panova, Y., & Hilletoft, P. (2018). Managing supply chain risks and delays in construction project. *Industrial Management and Data Systems*, 118(7), 1413–1431. <https://doi.org/10.1108/IMDS-09-2017-0422>
- Project Management Institute. (2021). *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*.
- Qazi, A., Simsekler, M. C. E., & Formanek, S. (2022). Supply chain risk network value at risk assessment using Bayesian belief networks and Monte Carlo simulation. *Annals of Operations Research*. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04598-3>
- Ragsdale, C. (1989). The current state of network simulation in project management theory and practice. *Omega*, 17(1), 21–25. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(89\)90016-9](https://doi.org/10.1016/0305-0483(89)90016-9)
- Rymarczyk, T., & Kłosowski, G. (2017). Supply Chain Risk Management By Monte Carlo Method. *Informatics Control Measurement in Economy and Environment Protection*, 7(4), 20–23. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.7244>
- Schmitt, A. J., & Singh, M. (2009). Quantifying supply chain disruption risk using Monte Carlo and discrete-event simulation. *Proceedings - Winter Simulation Conference*, 1237–1248. <https://doi.org/10.1109/WSC.2009.5429561>
- Tokdemir, O. B., Erol, H., & Dikmen, I. (2019). Delay Risk Assessment of Repetitive Construction Projects Using Line-of-Balance Scheduling and Monte Carlo Simulation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(2), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001595](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001595)
- Traynor, B. A., & Mahmoodian, M. (2019). Time and cost contingency management using Monte Carlo simulation. *Australian Journal of Civil Engineering*, 17(1), 11–18. <https://doi.org/10.1080/14488353.2019.1606499>
- Vanhoucke, M. (2010). Using activity sensitivity and network topology information to monitor project time performance. *Omega*, 38(5), 359–370. <https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2009.10.001>
- Vanhoucke, M. (2011). On the dynamic use of project performance and schedule risk information during project tracking. *Omega*, 39(4), 416–426. <https://doi.org/10.1016/J.OMEGA.2010.09.006>
- Vanhoucke, M. (2012). *Project Management with Dynamic Scheduling* (Springer Berlin Heidelberg (ed.)).
- Vanhoucke, M. (2019). Tolerance limits for project control: An overview of different approaches. *Computers and Industrial Engineering*, 127(October), 467–479.

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

