

Artículos de investigación

Análisis probabilístico de la programación de proyectos: Cómo incorporar incertidumbre en la gestión de proyectos

Probabilistic analysis of project scheduling: How to incorporate uncertainty into project management

José Salinas Ortiz¹

RESUMEN

La evaluación de proyectos debe considerar tanto los costos de inversión como los tiempos de culminación, ambos sujetos a incertidumbre. Este artículo presenta un enfoque para incorporar explícitamente la incertidumbre en los tiempos de duración de las actividades necesarias para completar un proyecto. Los métodos PERT y CPM, ampliamente adoptados en la industria y el gobierno desde los años cincuenta, ayudan a gestionar la interdependencia de las actividades del proyecto. Aunque originalmente diferenciados en el manejo del tiempo y el costo, estos métodos comparten la limitación de no considerar adecuadamente la incertidumbre. Se utilizan tres estimaciones de tiempo (optimista, más probable y pesimista) para un “análisis probabilístico” de la ruta crítica, pero este enfoque no aborda múltiples escenarios ni ajusta la ruta crítica en función de la variación real en los tiempos. Para superar estas limitaciones, se desarrolló un modelo en Excel que permite un análisis probabilístico más adecuado del tiempo de finalización del proyecto. El artículo detalla los objetivos del nuevo procedimiento y los pasos necesarios para incorporar la incertidumbre, utilizando un ejemplo simple de construcción de una planta industrial. Las conclusiones y recomendaciones se presentan al final del artículo.

Palabras Clave: *incertidumbre, proyecto, inversión, probabilístico, gestión.*

Recibido: 21/06/2024
Aceptado: 10/07/2024
Publicado: 27/09/2024

¹ Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú

Correspondencia:
josalinas@uni.edu.pe

<https://orcid.org/0009-0000-3745-6392>

Licencia:



Revista de la Facultad de Ingeniería Económica, Ingeniería Estadística y Ciencias Sociales de la Universidad Nacional de Ingeniería

ABSTRACT

Project evaluation must consider both investment costs and completion times, both of which are subject to uncertainty. This article presents an approach to explicitly incorporate the uncertainty in the duration of activities necessary to complete a project. The PERT and CPM methods, widely adopted in industry and government since the 1950s, help manage the interdependence of project activities. Although originally differentiated by their handling of time and cost, these methods share the limitation of not adequately considering uncertainty. They use three-time estimates (optimistic, most likely, and pessimistic) for a “probabilistic analysis” of the critical path, but this approach does not address multiple scenarios nor adjust the critical path based on actual time variations. To overcome these limitations, an Excel model was developed that allows for a more appropriate probabilistic analysis of the project’s completion time. The article details the objectives of the new procedure and the steps necessary to incorporate uncertainty, using a simple example of constructing an industrial plant. Conclusions and recommendations are presented at the end of the article.

Keywords: *uncertainty, project, investment, probabilistic, management.*

1. INTRODUCCIÓN

Los proyectos de inversión pueden variar significativamente en complejidad y tiempo de implementación, lo que hace que completarlos a tiempo sea una tarea desafiante. Las complicaciones surgen al programar estos proyectos, que a menudo se estructuran en función de la interdependencia de las actividades necesarias para su finalización. Generalmente, ciertas actividades no pueden comenzar hasta que otras hayan terminado. En grandes proyectos, pueden existir numerosas relaciones de dependencia, lo que requiere métodos efectivos de análisis.

Los métodos PERT (Program Evaluation Review Technique) y CPM (Critical Path Method), desarrollados a finales de los años cincuenta, recibieron gran publicidad, lo que facilitó su aceptación en diversas ramas de la industria y el gobierno (Anderson et al., 2015). Estos métodos se han aplicado en proyectos tan diversos como la construcción de fábricas y carreteras, el desarrollo de nuevos productos, y el diseño e instalación de nuevos sistemas. Actualmente, muchas empresas, agencias gubernamentales y multinacionales exigen que todos sus contratistas utilicen estos métodos.

Inicialmente, las diferencias entre PERT y CPM se centraban en cómo se manejaban el tiempo y el costo. Sin embargo, en la práctica, estas diferencias se han ido diluyendo a medida que las empresas han integrado las mejores características de ambos métodos para gestionar sus proyectos de manera más eficiente (Munier, 1981). No obstante, un aspecto que no se ha considerado adecuadamente es la incertidumbre tanto en los costos como en los tiempos de las actividades del proyecto.

Se reconoce que los tiempos de las actividades a menudo son inciertos, y esta incertidumbre se incorpora utilizando tres estimaciones: optimista (o), como tiempo mínimo; más probable (m), como tiempo normal; y pesimista (p), como tiempo máximo. Se asume que la duración de la actividad sigue una distribución de probabilidad unimodal beta, lo que permite estimar el valor esperado del tiempo de la actividad mediante la fórmula $[(o + 4m + p)/6]$. Con estos estimados, muchos programas de software (por ejemplo, Microsoft Project) realizan un análisis 'probabilístico' de la ruta crítica, definiendo tres escenarios:

- Escenario optimista, cuando todos los tiempos de las actividades toman su valor optimista.
- Escenario pesimista, cuando todos los tiempos de las actividades toman su valor pesimista.
- Escenario medio, cuando todos los tiempos de las actividades toman su valor esperado.

La limitación de este enfoque es que no considera la multiplicidad de escenarios posibles (por ejemplo, si existen cinco actividades críticas, se generarían $3^5 = 243$ escenarios utilizando tres valores por cada actividad) ni calcula la probabilidad asociada a cada escenario. Además, no se toma en cuenta que, si una actividad crítica se completa antes de lo previsto, la ruta crítica puede cambiar, o que, si una actividad no crítica se retrasa lo suficiente, podría convertirse en parte de una nueva ruta crítica.

Estas limitaciones nos llevaron a desarrollar un modelo bien estructurado en Excel, que permite realizar un análisis verdaderamente probabilístico del tiempo de finalización de los proyectos utilizando software especializado.

En la sección 2 se plantean los objetivos del procedimiento propuesto y en la sección 3 se detallan los pasos necesarios para incorporar la incertidumbre y realizar un análisis probabilístico del tiempo de culminación del proyecto. Dada la naturaleza tutorial de este artículo, se utiliza un ejemplo simple de un proyecto para la construcción de una planta industrial. En la sección 4 se presentan las conclusiones y recomendaciones.

2. OBJETIVO

El presente procedimiento tiene como objetivo establecer pautas para:

- Incorporar la incertidumbre en el análisis del tiempo de finalización del proyecto.
- Utilizar el conocimiento de los expertos del proyecto (personas que conocen bien las actividades que conforman el proyecto) para evaluar el nivel de incertidumbre en la duración de las actividades.
- Responder preguntas como:
 - o ¿Cuál es la fecha esperada de finalización del proyecto?
 - o ¿Cuál es el rango de incertidumbre en la fecha de finalización del proyecto?
 - o ¿Cuál es el perfil del tiempo de terminación del proyecto?
 - o ¿Cuál es la probabilidad de completar el proyecto antes de una fecha preestablecida?

El procedimiento propuesto permite responder estas preguntas y muchas más, proporcionando un análisis detallado y probabilístico del tiempo de finalización del proyecto. Este procedimiento se basa en los principios de la Disciplina del Análisis de Decisiones (Howard, 1966; Salinas, 2009) y en una aplicación concreta (Salinas, 2004).

3. PROCESO PARA ESTIMAR EL TIEMPO DE PUESTA EN OPERACIÓN DE LOS PROYECTOS

Para responder las preguntas planteadas, se utilizará un proceso de ocho pasos:

- 1° Definir la red PERT: Identificar las actividades necesarias para completar el proyecto y describir sus relaciones en términos de predecesores inmediatos.
- 2° Obtener los rangos de incertidumbre en la duración de las actividades: Entrevistar a los expertos para obtener una primera aproximación del grado de incertidumbre en los tiempos de duración de las actividades.
- 3° Crear el modelo en una hoja de cálculo: Estructurar la red PERT en una hoja de cálculo con secciones claramente definidas para introducir las actividades del proyecto y sus rangos de incertidumbre. Describir las relaciones de precedencia para calcular el tiempo de finalización del proyecto.
- 4° Realizar el análisis de sensibilidad: Utilizar Sensitivity®, un software especializado, para identificar las actividades críticas que generan incertidumbre en el tiempo de culminación del proyecto (Supertree Software, s.f.).
- 5° Construir el modelo probabilístico: Con los tiempos de las actividades críticas identificadas, construir un árbol de probabilidades que describa los

posibles escenarios y sus probabilidades de ocurrencia.

- 6° Establecer la distribución de probabilidades del tiempo de finalización del proyecto: Utilizar Supertree®, un software especializado, para establecer el perfil (distribución de probabilidades) de duración del proyecto (Supertree Software, s.f.).
- 7° Análisis probabilístico: Analizar el perfil de duración del proyecto para determinar la probabilidad de que el proyecto termine antes de un periodo preestablecido y calcular la duración esperada o promedio de finalización del proyecto.
- 8° Resumen y conclusiones: El perfil del proyecto y el análisis probabilístico permitirán responder las preguntas planteadas anteriormente y muchas más

A continuación, se presentan el proceso, sus pasos y técnicas esenciales, utilizando un ejemplo simple de un proyecto para la construcción de una planta industrial. El contrato incluye una multa significativa si la construcción no se completa en 43 semanas, por lo que un elemento clave es evaluar la probabilidad de terminar el proyecto dentro de ese plazo.

3.1 Primer paso: Definir la red PERT

En este paso, se identifican las actividades específicas que conforman el proyecto en análisis. Esto implica elaborar una lista de todas las actividades necesarias para completar el proyecto, junto con sus predecesores inmediatos. Estos predecesores describen la interdependencia entre las actividades, indicando que algunas deben completarse antes de que otras puedan comenzar. Esta tarea se facilita con la información proporcionada por los expertos en el proyecto. En el proyecto demostrativo, se identifican 14 actividades principales para llevar a cabo esta construcción; la lista de actividades con sus predecesores inmediatos se muestra en la Tabla 1.

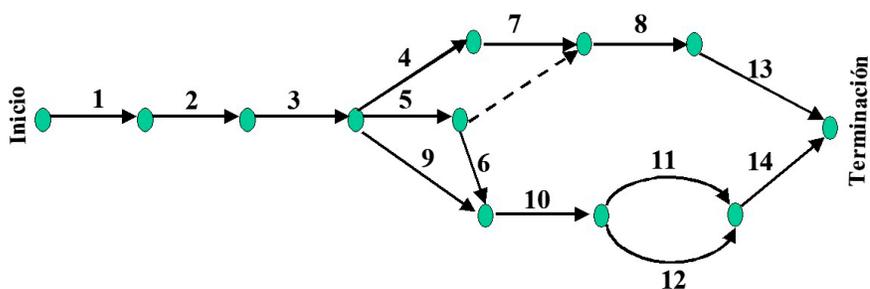
En este ejemplo, solo tres actividades tienen más de un predecesor inmediato: las actividades 8, 10, y 14. La actividad 8 (pintura de exteriores) tiene como predecesores inmediatos las actividades 5 y 7. Esto significa que la plomería exterior (actividad 5) y el recubrimiento exterior (actividad 7) deben completarse antes de que pueda comenzar la pintura de exteriores.

Tabla 1
Listado de actividades con sus predecesores

Descripción de Actividades		
Número	Actividad	Predecesor
1	Excavación	
2	Cimentación	1
3	Muros	2
4	Techos	3
5	Plomería exterior	3
6	Plomería interior	5
7	Recubrimiento exterior	4
8	Pintura de exteriores	5, 7
9	Trabajo de electricidad	3
10	Recubrimiento interior	6,9
11	Pisos	10
12	Pintura de interiores	10
13	Accesorios exteriores	8
14	Accesorios interiores	11, 12

Con base en este listado, se puede crear un diagrama que no solo represente las actividades enumeradas, sino también las relaciones de precedencia entre ellas. Esta representación, conocida como la red PERT del proyecto, permite visualizar gráficamente el orden en que se llevarán a cabo las actividades (Anderson et al., 2015).

Figura 1
Red Pert del proyecto demostrativo



3.2 Segundo paso: Obtener los rangos de incertidumbre en la duración de las actividades del proyecto

Una vez establecida la red PERT del proyecto, es necesario recopilar información sobre el tiempo requerido para completar cada actividad. Esta información se utilizará para calcular la duración total del proyecto. Lamentablemente, los estimados del tiempo de duración de cada actividad pueden ser difíciles de obtener. En muchos casos, la duración de cada

actividad es incierta y puede describirse inicialmente mediante un rango de valores posibles que reflejan el grado de incertidumbre percibido por los expertos.

Para incorporar tiempos inciertos en el análisis, es necesaria una primera aproximación del grado de incertidumbre específico para los tiempos de las actividades individuales (Salinas, 2009). A partir de entrevistas con expertos, se determinan los rangos de incertidumbre para la duración de las actividades del proyecto, definiendo tres valores:

- Valor bajo: Representa el primer decil; es decir, hay un 10% de probabilidad de que el tiempo de duración de la actividad sea menor o igual a este valor.
- Valor medio: Representa el quinto decil (o mediana); es decir, hay un 50% de probabilidad de que el tiempo de duración de la actividad sea menor o igual a este valor.
- Valor alto: Representa el noveno decil; es decir, hay un 10% de probabilidad de que el tiempo de duración de la actividad sea mayor a este valor.

En el caso del proyecto demostrativo, los rangos de incertidumbre obtenidos de los expertos para la duración de cada una de las actividades identificadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Listado de actividades con sus rangos de incertidumbre.

He realizado ajustes para mejorar la claridad, coherencia y precisión del texto.

Descripción de Actividades			Estimación de tiempos (semanas)		
Numero	Actividad	Predecesor	Bajo	Medio	Alto
1	Excavacion		1.5	2	3
2	Cimentacion	1	2	4	8
3	Muros	2	7	10	18
4	Techos	3	4	5.5	9
5	Plomeria Exterior	3	1.5	3	5
6	Plomeria Interior	5	4	5	9
7	Recubrimiento Exterior	4	5	6.5	9
8	Pintura de Exteriores	5, 7	5	7.5	14
9	Trabajo Electricidad	3	3	5	8
10	Recubrimiento Interior	6,9	5	6.5	9
11	Pisos	10	3.5	4	4.5
12	Pintura de Interiores	10	2.5	5	7
13	Accesorios Exteriores	8	1	2	3
14	Accesorios Interiores	11, 12	5	5.5	8

La Tabla 2 muestra que el grado de incertidumbre varía según la actividad. Por ejemplo, los expertos consideran que la incertidumbre en la duración del levantamiento de los muros oscila entre 7 y 18 semanas, con una probabilidad del 80%, y estiman que la duración promedio (mediana) es de 10 semanas. En contraste, la incertidumbre en la duración de la colocación de pisos es de tan solo una semana.

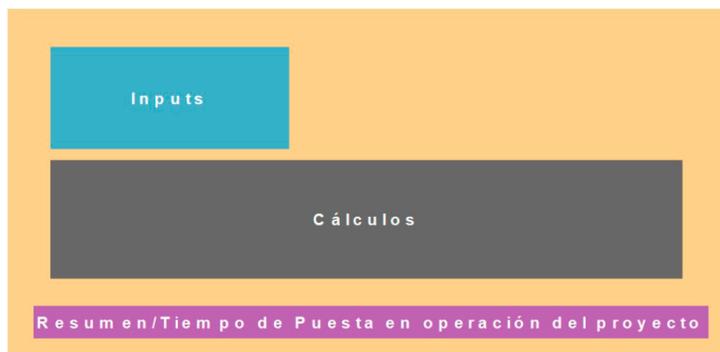
3.3 Tercer paso: Crear el modelo en hoja de cálculo

En este paso, se construye un modelo en Excel que debe estar bien organizado para facilitar el análisis probabilístico. Este modelo consta de tres secciones claramente definidas, como se muestra en la Figura 2 (Salinas, 2009).

La sección de entradas (inputs) se ubica en la parte superior de la hoja de cálculo y contiene todos los parámetros de entrada del modelo, incluyendo las constantes y los rangos de incertidumbre en la duración de las actividades (bajo, medio, alto).

Figura 2

Estructura del modelo en hoja de cálculo.



Se asignan nombres a las variables de entrada, es decir, a los tiempos de las actividades, para utilizarlos en los cálculos en lugar de hacer referencia a las celdas. Es posible asignar múltiples nombres simultáneamente utilizando los siguientes comandos: • Fórmulas/ Crear desde la selección/ Columna derecha Siguiendo estas pautas, la sección de entradas queda determinada como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3

Sección de entradas del modelo en la hoja de cálculo

Descripción de Actividades			Valor en Uso (semanas)	Nombre	Estimación de tiempos (semanas)		
Numero	Actividad	Predecesor			Bajo	Medio	Alto
1	Excavacion		2	Excava	1.5	2	3
2	Cimentacion	1	4	Ciment	2	4	8
3	Muros	2	10	Muros	7	10	18
4	Techos	3	5.5	Techos	4	5.5	9
5	Plomeria Exterior	3	3	PlomeExte	1.5	3	5
6	Plomeria Interior	5	5	PlomeInter	4	5	9
7	Recubrimiento Exterior	4	6.5	RecubrExte	5	6.5	9
8	Pintura de Exteriores	5, 7	7.5	PntuExte	5	7.5	14
9	Trabajo Electricidad	3	5	Electricidad	3	5	8
10	Recubrimiento Interior	6,9	6.5	RecubrInter	5	6.5	9
11	Pisos	10	4	Pisos	3.5	4	4.5
12	Pintura de Interiores	10	5	PntuInter	2.5	5	7
13	Accesorios Exteriores	8	2	AcceExte	1	2	3
14	Accesorios Interiores	11, 12	5.5	AcceInter	5	5.5	8

En esta sección, se pueden incluir todo tipo de proyectos, desde los más simples con pocas actividades hasta los más complejos con numerosas actividades, como los proyectos hidroeléctricos. La única restricción es contar con acceso a expertos que puedan describir estos proyectos en términos de redes PERT y establecer los rangos de incertidumbre en los tiempos de sus actividades (Salinas, 2009).

En la sección de cálculos, se realizan todas las operaciones necesarias para determinar el tiempo de finalización del proyecto y otros valores relevantes. Los cálculos describen las relaciones entre las actividades establecidas en la sección de entradas, en términos de inicio, duración y finalización de cada actividad que conforma el proyecto.

Es importante recordar que, para iniciar una actividad específica, deben completarse las actividades que son sus predecesoras inmediatas. Con este concepto, podemos calcular los tiempos de inicio (TI) de cada actividad, su tiempo de duración (TDi) y, por lo tanto, su tiempo de finalización (TTi). Para las actividades sin predecesoras, el tiempo de inicio será cero; para las demás, sus tiempos de inicio estarán definidos por el mayor tiempo de finalización de sus predecesoras inmediatas. Así, por ejemplo, para la actividad 4, que tiene como único predecesor a la actividad 3, se establecen las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}
 TI_4 &= TT_3 \\
 TT_4 &= TI_4 + TD_4
 \end{aligned}$$

En cambio, para la actividad 10, que tiene como predecesores a las actividades 6 y 9, las relaciones de sus tiempos de inicio y culminación se establecen de la siguiente manera:

$$TI_{10} = \text{máximo}(TT_6, TT_9)$$

$$TT_{10} = TI_{10} + TD_{10}$$

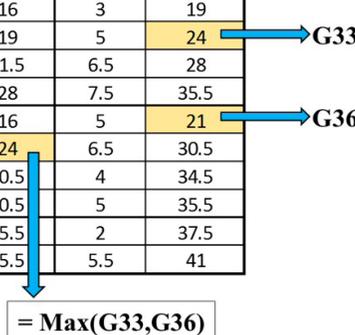
Considerando estas relaciones, el área de cálculos queda definida de la siguiente manera:

Tabla 4

Sección de cálculos del modelo en hoja de cálculo

Cálculos de los Tiempos de Inicio y Termino de Actividades

Numero	Actividad	Predecesor	Tiem po de Inicio	Tiem po de Actividad	Tiem po de Termino
1	Excavacion		0	2	2
2	Cimentacion	1	2	4	6
3	Muros	2	6	10	16
4	Techos	3	16	5.5	21.5
5	Plomeria Exterior	3	16	3	19
6	Plomeria Interior	5	19	5	24
7	Recubrimiento Exterior	4	21.5	6.5	28
8	Pintura de Exteriores	5, 7	28	7.5	35.5
9	Trabajo Electricidad	3	16	5	21
10	Recubrimiento Interior	6,9	24	6.5	30.5
11	Pisos	10	30.5	4	34.5
12	Pintura de Interiores	10	30.5	5	35.5
13	Accesorios Exteriores	8	35.5	2	37.5
14	Accesorios Interiores	11, 12	35.5	5.5	41



= Max(G33,G36)

Es importante recordar que los tiempos de duración de las actividades considerados aquí son tiempos medios, los cuales definen el caso o escenario base. Es decir, según los valores del caso base, cuando los tiempos de las actividades se fijan en su valor medio, el proyecto se completará en 41 semanas. Sin embargo, este estimado no considera las incertidumbres. En el quinto paso de este proceso, se analizará la sensibilidad del tiempo de finalización del proyecto frente a variaciones en los insumos inciertos, utilizando los rangos de incertidumbre de los tiempos de las actividades.

La sección de resumen presenta la información necesaria para evaluar la razonabilidad de los resultados del análisis. En este caso ilustrativo, la Figura 5 muestra el tiempo de finalización del proyecto y lo compara con un tiempo límite preestablecido.

Tabla 5

Sección de resumen del modelo en la hoja de cálculo

Resumen de los Resultados del Análisis

Terminación del Proyecto	41
Fecha Tope de Terminación	43
Cumple con Fecha tope (1 = Si, 0 = no)	1

3.4 Cuarto paso: Análisis de sensibilidad determinístico

En este paso, se evaluará la sensibilidad del tiempo de finalización del proyecto (TTP) respecto a los cambios en los tiempos de las actividades individuales. Es decir, el análisis se centra en observar cómo estos cambios afectan el TTP, identificando así las incertidumbres clave en los tiempos de las actividades.

En el paso anterior, se evaluó el modelo utilizando los tiempos del escenario base (las medianas), obteniendo así el escenario base del proyecto. Ahora, se llevará a cabo el análisis de sensibilidad considerando las incertidumbres en los tiempos de las actividades, representadas por tres valores (bajo, medio y alto) estimados a partir de entrevistas con expertos en el proyecto (Salinas, 2009).

Partiendo nuevamente del escenario base, con todos los tiempos fijados en su valor medio, se reevaluará el modelo cambiando, uno por uno, los valores bajos y altos de la duración de cada actividad para generar los respectivos tiempos de finalización del proyecto (TTP). La diferencia entre los valores del TTP generados sirve como medida de la sensibilidad de la finalización del proyecto frente a la incertidumbre en la actividad analizada. Si los cambios en el tiempo de una actividad tienen un gran efecto en el TTP, su incertidumbre merece especial atención. Por el contrario, si el efecto no es significativo, la actividad se fijará en su tiempo medio, convirtiéndose en una variable parametrizada.

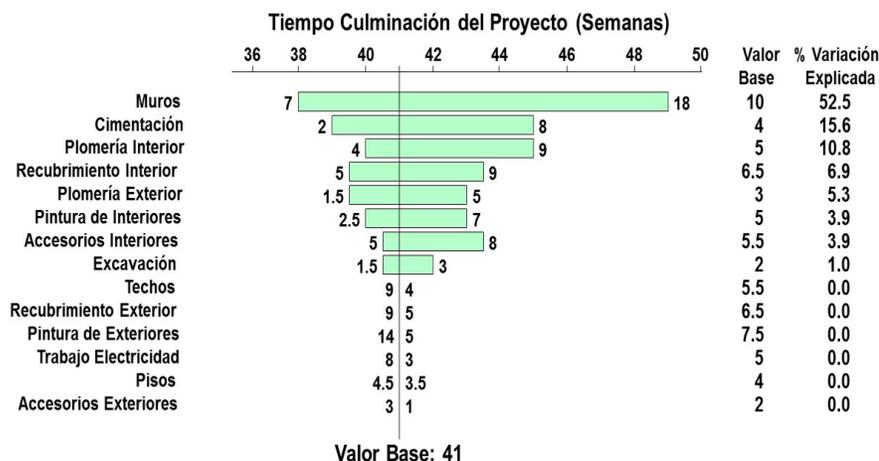
Las incertidumbres que tengan el mayor impacto en el TTP serán consideradas cruciales y se tratarán como tales en el análisis probabilístico del siguiente paso, mientras que las demás se fijarán en su valor medio. Este análisis de sensibilidad puede realizarse de manera eficiente utilizando software especializado que ajuste los valores del escenario base y cal-

cule el TTP para cada cambio. El software recomendado por su potencia y eficiencia tanto para este análisis como para el análisis probabilístico es Supertree®. La herramienta encargada del análisis de sensibilidad determinístico se llama Sensitivity®, y es la utilizada en este proceso.

El uso de Sensitivity es muy sencillo: los datos de la sección de entradas del modelo en la hoja de cálculo se importan casi de forma directa. Luego, Sensitivity emplea el modelo en la hoja de cálculo como su calculadora para generar los diferentes valores del TTP asociados a cada valor de los tiempos de las actividades del proyecto. Finalmente, los resultados del análisis se representan gráficamente (diagrama de tornado) y en forma de tabla, lo que permite identificar directamente las incertidumbres cruciales.

El análisis de sensibilidad para el proyecto demostrativo muestra que el tiempo de finalización del proyecto es muy sensible a la incertidumbre en los tiempos de las actividades de levantamiento de muros, cimentación, plomería interior, recubrimiento interior y plomería exterior, como lo ilustra el diagrama de tornado en la Figura 3.

Figura 3
Tornado del Proyecto Demostrativo



Esta información también se presenta en forma de tabla, donde se observa que los tiempos de las dos actividades más críticas (muros y cimentación) explican el 68.1% de la variación total del TTP. Al añadir las incertidumbres en los tiempos de las actividades de plomería interior, recubrimiento

interior y plomería exterior, se encuentra que estas cinco incertidumbres explican el 91.2% de la incertidumbre total en el TTP. Estas cinco variables serán consideradas en el análisis probabilístico del siguiente paso.

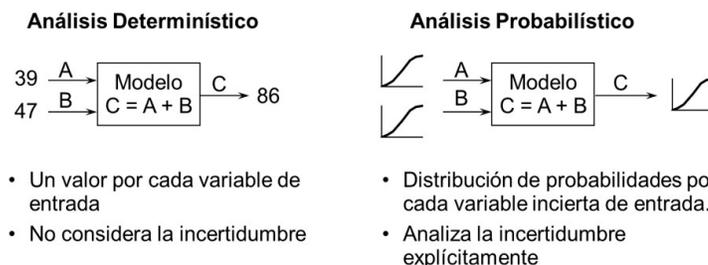
Tabla 6
Resultados del análisis de sensibilidad

Descripción	Base	Tipo Sens.	Valor Bajo	Valor Alto	Result Bajo	Result. Alto	Variac.	% Variac Explicada
Muros	10	Value	7	18	38	49	11	52.5
Cimentación	4	Value	2	8	39	45	6	68.1
Plomería Interior	5	Value	4	9	40	45	5	79.0
Recubrimiento Interior	6.5	Value	5	9	40	44	4	85.9
Plomería Exterior	3	Value	1.5	5	40	43	4	91.2
Pintura de Interiores	5	Value	2.5	7	40	43	3	95.1
Accesorios Interiores	5.5	Value	5	8	41	44	3	99.0
Excavación	2	Value	1.5	3	41	42	2	100.0
Techos	5.5	Value	4	9	41	41	0	100.0
Recubrimiento Exterior	6.5	Value	5	9	41	41	0	100.0
Pintura de Exteriores	7.5	Value	5	14	41	41	0	100.0
Trabajo Electricidad	5	Value	3	8	41	41	0	100.0
Pisos	4	Value	3.5	4.5	41	41	0	100.0
Accesorios Exteriores	2	Value	1	3	41	41	0	100.0

3.5 Quinto paso: Construcción del modelo probabilístico

El objetivo principal de este paso es incorporar explícitamente la incertidumbre en los tiempos de las actividades cruciales identificadas en el análisis de sensibilidad. Se utiliza el mismo modelo del paso anterior, pero en lugar de considerar un solo estimado determinístico para cada uno de los tiempos de las actividades cruciales, se integran distribuciones de probabilidad para estas incertidumbres. Esto permite establecer una distribución de probabilidad para el TTP, como se muestra esquemáticamente en la Figura 4.

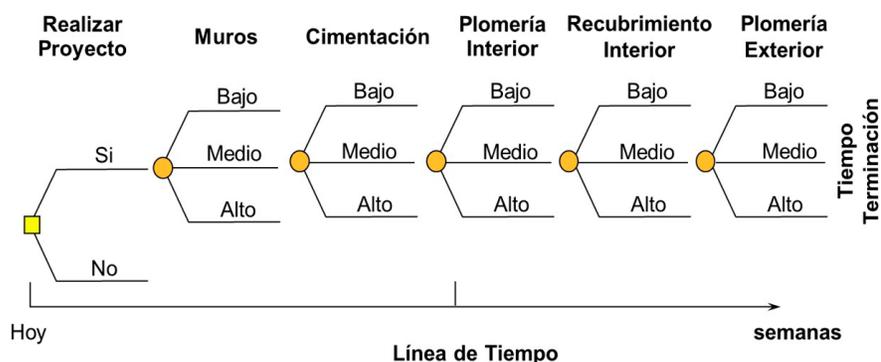
Figura 4
Análisis determinístico vs. análisis probabilístico



Aquí tienes una versión mejorada del texto:

"En este paso, lo primero es construir un árbol de decisiones genérico para ilustrar la decisión de llevar a cabo o no el proyecto, así como los factores críticos que generan incertidumbre en el TTP. La Figura 5 muestra el árbol genérico para el proyecto demostrativo.

Figura 5
Árbol de probabilidades genérico



A continuación, se deben asignar probabilidades a los tiempos de las actividades cruciales, utilizando el proceso de evaluación de variables inciertas mediante probabilidades. Seguidamente, se construye el modelo probabilístico que relaciona las incertidumbres cruciales con la incertidumbre total en el TTP. La distribución de probabilidad resultante para el TTP se denomina perfil del TTP, el cual se analizará en el siguiente paso.

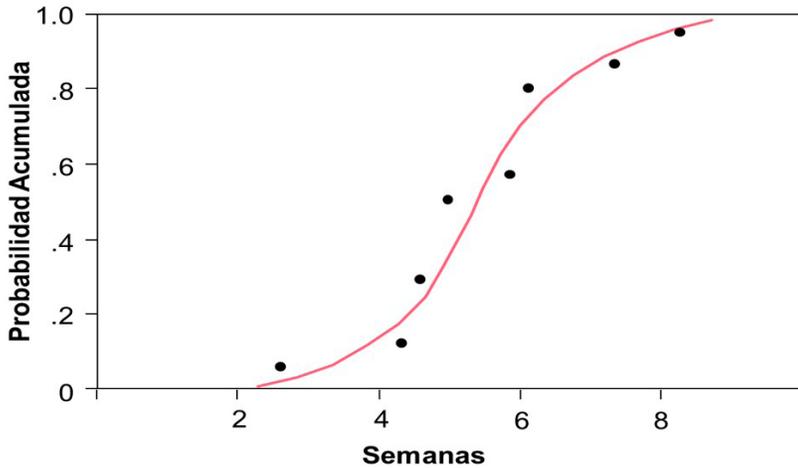
Los valores asociados a cada incertidumbre y sus probabilidades respectivas se determinarán utilizando el proceso de evaluación de probabilidades. Con este proceso de cinco pasos, se obtendrá una distribución de probabilidad acumulada para cada tiempo de duración de las actividades cruciales. Estas distribuciones continuas se discretizarán mediante la fijación de tres rangos no superpuestos que cubren todos los posibles valores. Una buena aproximación consiste en establecer tres rangos con probabilidades de 0.25, 0.50 y 0.25 para los valores bajo, medio y alto, respectivamente. Estos valores se incorporan en el árbol de probabilidades, el cual definirá 243 escenarios ($3^5 = 243$: cinco incertidumbres con tres valores cada una).

Tomando como ejemplo la duración de la actividad de cimentación, usando la “rueda de probabilidades” en el proceso de cinco pasos, se obtiene

un diagrama de dispersión de las respuestas del experto, como el que se muestra en la Figura 6, al cual se ha "ajustado" una curva continua.

Figura 6

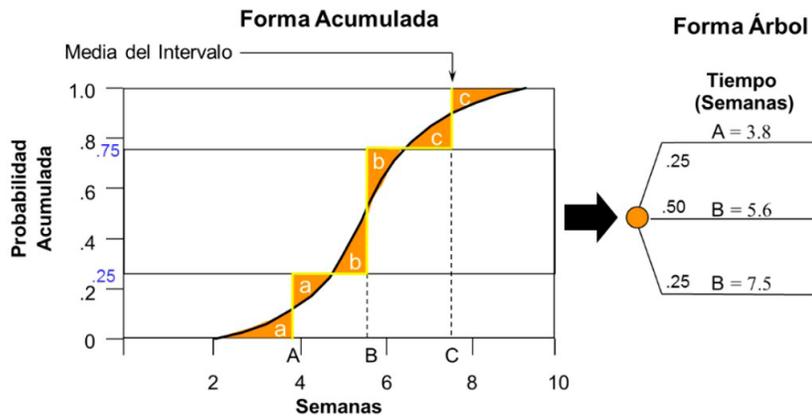
Curva de Distribución de Probabilidades Acumulada



A continuación, la distribución de probabilidad acumulada continua se discretiza utilizando el criterio mencionado anteriormente, obteniendo así una distribución discreta en forma de árbol, como se muestra en la Figura 7. Estos nuevos valores se incorporan al árbol de probabilidades en Super-tree.

Figura 7

Representación de distribuciones continuas en una forma de árbol discreto



3.6 Sexto paso: Perfil del tiempo de culminación del proyecto

Con la ayuda de Supertree, se evalúa el árbol de probabilidades utilizando el modelo en la hoja de cálculo. Esto permite calcular el TTP asociado a cada uno de los 243 escenarios definidos por las cinco incertidumbres críticas. Además, Supertree calcula la probabilidad asociada a cada escenario aplicando el concepto de expansión en cadena de la teoría de probabilidades (Salinas, 2009).

Posteriormente, Supertree facilita la construcción de la distribución de probabilidad acumulada de los diferentes valores del TTP asociados a los distintos escenarios (perfil de duración del proyecto). Esquemáticamente, se puede observar cómo Supertree ordena los TTP de menor a mayor y calcula las probabilidades acumuladas en la Figura 8.

Figura 8

Construcción de la distribución de probabilidades acumulada del TTP

Calcula el TTP y la probabilidad conjunta para cada escenario.			Luego, ordena los valores del TTP y calcula las probabilidad acumuladas.		
Escenario	TTP (semanas)	Probabilidad	TTP (semanas)	Probabilidad	Probabilidad Acumulada
1	32.00	0.0000460	32.00	0.000250	0.000250
2	33.50	0.0001100	32.50	0.000750	0.001000
3	37.50	0.0008625	33.00	0.000100	0.001100
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
241	58.00	0.0002155	60.00	0.000675	0.998585
242	59.50	0.0001015	60.50	0.001225	0.999490
243	61.50	0.0000915	61.50	0.000610	1.000000

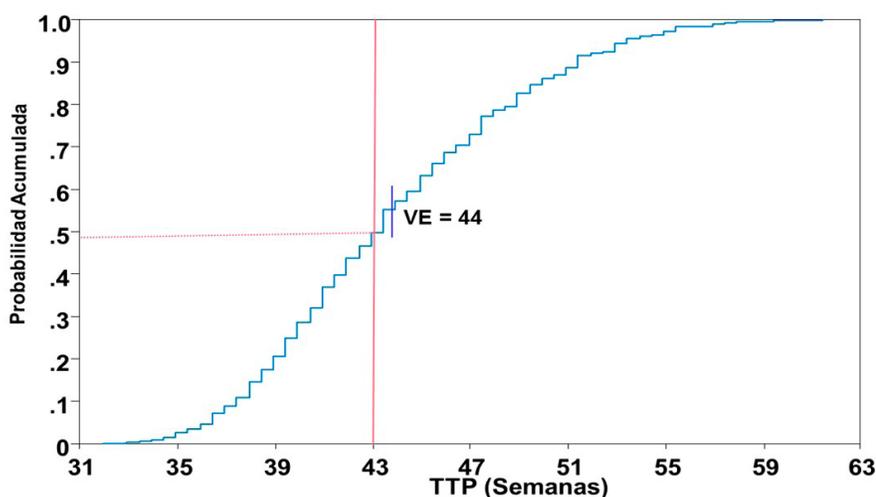
La distribución de probabilidad acumulada muestra el rango de los posibles valores del TTP y la probabilidad acumulada asociada a cada uno de ellos. La figura que representa estos valores y sus probabilidades acumuladas constituye el perfil del TTP, como se muestra en la Figura 9. Este perfil del proyecto permite realizar el análisis probabilístico y responder a muchas preguntas de las partes interesadas, tales como:

- ¿Cuál es el tiempo esperado de culminación del proyecto?
- ¿Cuál es la probabilidad de que el proyecto se termine antes de los 43 meses?
- ¿Debe incluirse este proyecto en el plan de obras para los próximos 43 meses?

En el último paso del proceso se responderán estas y otras preguntas adicionales.

Figura 9

Perfil del tiempo de terminación del proyecto



3.7 Séptimo paso: Análisis de sensibilidad probabilístico

El árbol de decisiones desarrollado (Figura 5) no solo permite establecer el perfil del TTP del proyecto (Figura 9), sino que también proporciona información adicional que facilita la comprensión de los posibles tiempos de finalización del proyecto.

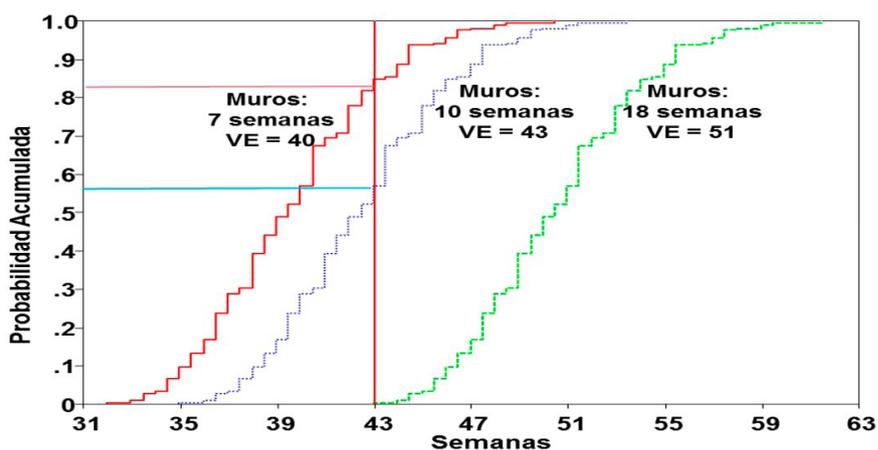
Es posible definir distribuciones y tiempos esperados (VE) del TTP en nodos distintos al inicial del árbol, y observar cómo varían estos valores condicionales. Es decir, se puede realizar un análisis de sensibilidad probabilístico de los tiempos de duración de las actividades del proyecto, fijando uno de ellos en un valor dentro de su rango y permitiendo que los tiempos de las otras actividades varíen según sus respectivas distribuciones de probabilidad.

Este análisis ayuda a comprender mejor el riesgo de no completar el proyecto dentro del tiempo preestablecido. Se busca establecer las distribuciones de probabilidad asociadas a los diferentes valores de los tiempos de las actividades del proyecto. Por ejemplo, se pueden determinar las

distribuciones condicionales para los diferentes tiempos de la actividad de levantamiento de muros, como 7, 10 y 18 semanas. Estas distribuciones condicionales se presentan en la Figura 10, donde se observa que el perfil del TTP es muy sensible al tiempo de levantamiento de muros. A medida que este tiempo aumenta, el TTP esperado (VE) se incrementa de 40 a 51 semanas. Además, si el tiempo para levantar los muros fuera de 18 semanas, la probabilidad de cumplir con la meta de 43 semanas sería cero; en cambio, si este tiempo se redujera a 7 semanas, la probabilidad de cumplir la meta se elevaría al 83%.

Figura 10

Distribuciones de probabilidades condicionales del TTP al tiempo de duración de la actividad levantamiento de muros



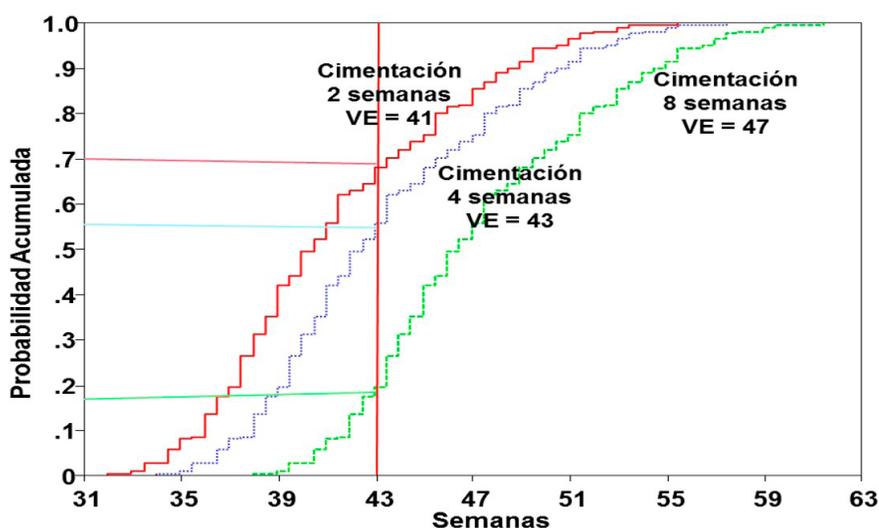
También se pueden establecer distribuciones de probabilidad condicionales para otros nodos de azar del árbol, como los tiempos de las actividades. Por ejemplo, se pueden determinar las distribuciones de probabilidad condicionales del TTP para el tiempo de duración de la actividad de cimentación, posicionando el nodo de azar que representa esta incertidumbre antes que los otros nodos de azar en el árbol de decisiones, pero después del nodo de decisión.

Las distribuciones de probabilidad condicionales para el tiempo de cimentación se presentan en la Figura 11, donde se muestra que el perfil del TTP también es sensible al tiempo de cimentación. A medida que este tiempo aumenta, el TTP esperado (VE) se incrementa de 41 a 47 semanas. Ade-

más, si el tiempo de cimentación fuera de 8 semanas, la probabilidad de cumplir con la meta de 43 semanas sería del 18%; en cambio, si este tiempo se redujera a 2 semanas, la probabilidad de cumplir la meta aumentaría al 70%.

Figura 11

Distribuciones de probabilidades condicionales del TTP al tiempo de duración de la actividad cimentación



Del mismo modo, es posible establecer distribuciones de probabilidad condicional para los demás nodos de azar del árbol. La Tabla 6 presenta los resultados del análisis de sensibilidad probabilístico para cada uno de los tiempos de las actividades críticas del proyecto. La penúltima columna muestra el cambio en el TTP esperado (VE), que se calcula como la diferencia entre el TTP esperado asociado al tiempo alto y al tiempo bajo de culminación de cada actividad. La última columna indica la probabilidad de completar el proyecto en 43 semanas, asociada al tiempo más alto de culminación de cada actividad.

Tabla 7

Resumen del análisis de sensibilidad probabilística

Descripción de Actividades Críticas	Sensibilidad del TTP Esperado (semanas)			Probabilidad de terminar en 43 semanas
	Bajo	Alto	Cambio	
Muros	40	51	11	0
Cimentación	41	47	6	0.18
Plomería Interior	42	47	5	0.2
Recubrimiento Exterior	42	46	4	0.32
Plomería Exterior	42	46	4	0.42

Tras realizar este análisis de sensibilidad probabilístico, se puede responder a la pregunta: “¿Cuán importante es el tiempo de terminación de una actividad crucial cuando se permite que los tiempos de culminación de las otras actividades cruciales varíen probabilísticamente?”. De las distribuciones de probabilidad condicionales y los TTP esperados, se concluye que todas las actividades son cruciales, ya que los TTP varían en al menos 4 semanas, dependiendo de los tiempos específicos de cada actividad. No obstante, el tiempo de terminación de la actividad de levantamiento de muros genera la mayor variación en el TTP esperado (11 semanas), y la probabilidad de terminar el proyecto antes de las 43 semanas es cero cuando el tiempo para culminar esta actividad alcanza su valor máximo.

3.8 Octavo paso: Resumen y conclusiones

El perfil del proyecto (Figura 9) y el análisis probabilístico permiten responder a muchas preguntas de las partes interesadas, como las planteadas al inicio de este artículo:

- **¿Cuál es el tiempo esperado de culminación del proyecto?**
Del perfil del TTP se observa que el tiempo esperado de culminación del proyecto es de 44 semanas.
- **¿Cuál es el rango de incertidumbre en la fecha de término del proyecto?**
El perfil del TTP del proyecto muestra una incertidumbre de 30 semanas, lo que significa que el tiempo para completar el proyecto puede variar entre 32 y 62 semanas.
- **¿Cuál es la probabilidad de que el proyecto se termine en 43 semanas?**

Al observar la Figura 9, se observa que hay una probabilidad del 49% de que el proyecto se termine en 43 semanas o menos. La pregunta es si estamos dispuestos a establecer en la propuesta que el proyecto se completará en 43 semanas, asumiendo el riesgo del 51% de no cumplir con ese plazo y enfrentar la multa alta estipulada en el contrato.

- **¿Debe incluirse este proyecto en el portafolio de obras de la organización para el próximo año?**

La decisión depende de la atractividad de los otros proyectos en el portafolio y de la actitud al riesgo de la organización. Si la organización está dispuesta a aceptar un 51% de probabilidad de no completar el proyecto en 43 semanas, como se requiere en el contrato, debe considerar incluirlo en su portafolio.

- **¿Cuán sensible es el perfil del TTP a los tiempos inciertos de las diferentes actividades críticas?**

El análisis de sensibilidad probabilístico concluye que el perfil es sensible a los tiempos de las cinco actividades críticas, especialmente al tiempo de culminación del levantamiento de muros. Las distribuciones de probabilidad condicionales y los TTP esperados (VE) varían según el tiempo que tardan en culminar estas actividades. En el caso de la actividad de levantamiento de muros, si esta se demora 18 semanas (su tiempo máximo), la probabilidad de completar el proyecto antes de las 43 semanas es cero. La pregunta es: ¿qué medidas se pueden tomar para asegurar que el tiempo de culminación del levantamiento de muros sea lo menor posible?

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El procedimiento propuesto para estimar probabilísticamente el tiempo de puesta en marcha de los proyectos se basa en el reconocimiento explícito de que ningún experto tiene información completa sobre la duración de las diferentes actividades del proyecto y, por ende, sobre el tiempo de culminación del mismo (Tversky & Kahneman, 1974). Utilizar probabilidades para describir la incertidumbre en los tiempos de las actividades ayuda a mejorar la comunicación entre los diferentes expertos, facilitando el intercambio de información de manera explícita y evitando sesgos motivacionales y cognitivos.

El resultado final permitirá a las partes interesadas definir los proyectos de un portafolio (como un plan de obras), visualizar explícitamente el grado de incertidumbre en el tiempo de puesta en marcha de dichos proyectos e identificar las actividades clave que generan esta incertidumbre en el TTP. De este modo, se podrán identificar acciones para reducir el riesgo de no cumplir con la fecha preestablecida, promoviendo una gestión proactiva del riesgo.

5. REFERENCIAS

- Anderson, D.R., Sweeney D. J., Williams T.A.(2015). Quantitative Methods for Business. Cengage Learning
- Howard, R.A. (1966). Decision Analysis: Applied Decision Theory. Proceedings of the Fourth International Conference in Operational Research. Reprinted in Howard, R.A., & Matheson, J. E. (1984).
- Munier, R.A. (1981). PERT-CPM y técnicas relacionadas. Editorial Astrea.
- Salinas Ortiz, J. A. (2009). Análisis de decisiones estratégicas en entornos inciertos, cambiantes y complejos. Buenos Aires: Cengage Learning.
- Salinas Ortiz, J. A. (2004). Análisis Probabilístico del Plan de Obras para la determinación de las Tarifas Eléctricas. Reporte de un trabajo de consultoría hecho para la OSINERG.
- Supertree Software. (s.f.). Supertree and Sensitivity are trademarks of SmartOrg, Inc. <https://smartorg.com/supertree-sensitivity/>.
- Tversky, A. & Kahneman, D. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. Science, 211, 453-458.