



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS PARA OPTIMIZAR LA ESTIMACIÓN DE COSTOS Y TIEMPOS DE CARRETERAS EN PERÚ

Línea de investigación:
**Desarrollo urbano-rural, catastro, prevención de riesgos, hidráulica y
geotecnia**

Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniería Civil

Autor

Ariza Flores, Victor Andre

Asesor

Zavala Ascaño, Gerber Josafatt

ORCID: 0000-0003-1088-4543

Jurado

Malpartida Canta, Rommel

Cancho Zuñiga, Gerardo Enrique

García Urrutia Olavarria, Roque Jesús Leonardo

Lima - Perú

2025

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS PARA OPTIMIZAR LA ESTIMACIÓN DE COSTOS Y TIEMPOS DE CARRETERAS EN PERÚ

INFORME DE ORIGINALIDAD

19%

ÍNDICE DE SIMILITUD

17%

FUENTES DE INTERNET

8%

PUBLICACIONES

6%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

www.coursehero.com

Fuente de Internet

2%

2

www.mdpi.com

Fuente de Internet

2%

3

repositorio.unfv.edu.pe

Fuente de Internet

1%

4

Submitted to Universidad Nacional Federico Villarreal

Trabajo del estudiante

1%

5

hdl.handle.net

Fuente de Internet

1%

6

cdn.www.gob.pe

Fuente de Internet

<1%

7

Darian Reyes Fernandez de Bulnes. "Redmine plugin: Risk quantitative analysis", IEEE Latin America Transactions, 2015

Publicación

<1%

8

docplayer.es

Fuente de Internet

<1%

9

www.slideshare.net

Fuente de Internet

<1%

10

repositorio.upt.edu.pe

Fuente de Internet

<1%



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

**METODOLOGÍA DE ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS PARA
OPTIMIZAR LA ESTIMACIÓN DE COSTOS Y TIEMPOS DE
CARRETERAS EN PERÚ**

Línea de investigación:

Desarrollo urbano-rural, Catastro, Prevención de riesgos, Hidráulica y Geotecnia

Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniería Civil

Autor

Ariza Flores, Victor Andre

Asesor

Zavala Ascaño, Gerber Josafatt

ORCID: 0000-0003-1088-4543

Jurado

Malpartida Canta, Rommel

Cancho Zuñiga, Gerardo Enrique

Garcia Urrutia Olavarria, Roque Jesús Leonardo

Lima – Perú

2025

DEDICATORIA

A mi hijo André, mi mayor inspiración y la razón de mi esfuerzo, con el anhelo de llegar lejos para que un día él pueda ir todavía más allá y cumpla todos sus sueños. A mis padres, Víctor y María, por enseñarme desde niño que los sueños se construyen con esfuerzo y pasión, y por ser siempre la fuerza que me sostiene y la guía en cada uno de mis pasos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios por darme vida, salud y el amor de mis padres y de mi hijo. Expreso mi gratitud a la UNFV, mi alma mater, por haber sido el espacio donde nació mi pasión por la ingeniería civil y mi vocación por la investigación. Extiendo también mi reconocimiento al Dr. Ing. Gerber Zavala Ascaño, por su apoyo y valiosas enseñanzas que hicieron posible la materialización de esta tesis doctoral.

INDICE

RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
I. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Planteamiento del problema.....	12
1.2 Descripción del problema	16
1.3 Formulación del problema	17
1.3.1 Problema general	17
1.3.2 Problemas específicos	17
1.4 Antecedentes	17
1.4.1 Antecedentes nacionales	17
1.4.2 Antecedentes internacionales.....	20
1.5 Justificación	22
1.6 Limitaciones.....	23
1.7 Objetivos	24
1.7.1 Objetivo general.....	24
1.7.2 Objetivos específicos	24
1.8 Hipótesis	24
1.8.1 Hipótesis general.....	24
1.8.2 Hipótesis específicas	25
II. MARCO TEÓRICO.....	26

2.1	Bases Teóricas de la investigación	26
2.1.1	Marco de gestión de riesgos.....	26
2.1.2	Metodologías de gestión de riesgos en ingeniería	28
2.1.3	La gestión de riesgos según el PMBOK	30
2.1.4	Método de Simulación de Monte Carlo	35
2.1.5	Método del Segundo momento	38
2.1.6	Aplicación de matrices de varianza y covarianza en riesgos	38
2.2	Marco conceptual.....	40
2.2.1	Definiendo el riesgo	40
2.2.2	La gestión de riesgos.....	41
2.2.3	Análisis cualitativo y cuantitativo de riesgos.....	42
2.2.4	Técnicas cuantitativas para la gestión de riesgos.....	42
2.3	Marco legal	44
2.3.1	<i>Marco legal en Perú sobre gestión de riesgos</i>	44
2.3.2	<i>Marco legal en Brasil</i>	45
2.3.3	<i>Marco legal en Chile</i>	46
2.4	Marco filosófico.....	48
2.4.1	La ciencia, la ingeniería y su filosofía	48
2.4.2	Cuestiones filosóficas respecto a la gestión de riesgos.....	50
III.	MÉTODO	51
3.1	Tipo de investigación.....	51

3.2	Población y muestra	52
3.3	Operacionalización de variables	54
3.4	Instrumentos.....	55
3.5	Procedimientos.....	56
3.6	Análisis de datos	57
3.6.1	<i>Técnicas de Análisis Cuantitativo de riesgos</i>	57
3.6.2	<i>Funciones de distribución de probabilidad</i>	61
3.6.3	<i>Primer Caso de Estudio: Nueva Carretera Central</i>	65
3.6.4	<i>Segundo Caso de Estudio: Carretera Oyon Ambo</i>	67
3.6.5	<i>Tercer Caso de Estudio: Carretera Local Combapata</i>	68
3.7	Consideraciones éticas	69
IV.	RESULTADOS.....	71
4.1	Optimización de Costos en Tiempos y Carreteras en el Proyecto I.....	71
4.1.1	<i>Estimación de Contingencias de costos en el Proyecto I</i>	71
4.1.2	Estimación de Reservas de Tiempo en el Proyecto I.....	74
4.2	Optimización de Costos en Tiempos y Carreteras en el Proyecto II	75
4.2.1	Estimación de Contingencias de costos en el Proyecto II.....	75
4.2.2	Estimación de Reservas de Tiempo en el Proyecto II.....	76
4.3	Optimización de Costos en Tiempos y Carreteras en el Proyecto III	77
4.3.1	Estimación de Contingencias de costos en el Proyecto III	77
4.3.2	Estimación de Reservas de Tiempo en el Proyecto III	78

4.3.3	Validación Estadística de datos	80
4.3.4	Determinación del factor de correlación.....	81
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	84
5.1	Estudios Previos.....	84
5.2	Discusión sobre las estimaciones realizadas.....	85
5.3	Limitaciones del estudio	86
5.4	Líneas de investigación futura	87
VI.	CONCLUSIONES	88
VII.	RECOMENDACIONES	90
VIII.	REFERENCIAS.....	92
IX.	ANEXOS	105

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sobrecostos y sobretiempos en proyectos mundiales	13
Tabla 2 Marcos de gestión de riesgos en Proyectos.....	26
Tabla 3. Metodologías de gestión de riesgos	29
Tabla 4 Valoración del riesgo mediante el método cualitativo.....	32
Tabla 5 Comparación entre la perspectiva de decisión teórica y la gerencial	33
Tabla 6 Técnicas de análisis cuantitativo de riesgos según el PMI (2019).....	43
Tabla 7. Diferencias entre filosofía de la ciencia e ingeniería	49
Tabla 8 Red Vial Nacional Peruana	52
Tabla 9. Matriz de Operacionalización de las variables	54
Tabla 10 Conectores booleanos para la búsqueda de técnicas cuantitativas de riesgos	59
Tabla 11 Identificación de técnicas cuantitativas más utilizados	60
Tabla 12 Proceso para la identificación de funciones de Distribución de Probabilidad.....	63
Tabla 13 Identificación de PDF más utilizados	64
Tabla 14 Características técnicas principales de la Nueva Carretera Central.....	67
Tabla 15. Cuadro de Costos según CAPEX del Proyecto I	71
Tabla 16. Resultados de la Simulación Monte Carlo para variadas simuladas.....	73
Tabla 17. Parámetros para la simulación de tiempo en SRA.....	75
Tabla 18. Resultados de la Simulación para la estimación de tiempo en el Proyecto II.....	76
Tabla 19. Resultados de la estimación de costos en el Proyecto II.....	78
Tabla 20. Resultados de la simulación para la estimación de tiempo en el Proyecto III.....	79
Tabla 21 Validación estadística mediante prueba t.....	80
Tabla 22. Correlación entre $\ln(N)$ y las estimaciones probabilísticas (costos y tiempos)	82

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Marco general para la gestión de riesgos en proyectos	31
Figura 2. Esquema de investigación de la tesis doctoral	57

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es implementar una metodología de análisis cuantitativo de riesgos que permita optimizar la estimación de costos y tiempos en proyectos de construcción de carreteras en el Perú. La investigación sigue un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y diseño no experimental. Se utilizaron dos técnicas principales: Simulación de Monte Carlo para estimación de costos y Schedule Risk Analysis para análisis de cronogramas. La metodología se validó a través de tres casos de estudio: la Nueva Carretera Central, la Carretera Oyón-Ambo y la Carretera Departamental de Combapata. Se desarrolló un proceso en tres fases: revisión sistemática de literatura para seleccionar técnicas y funciones de distribución de probabilidad; validación de las técnicas mediante consultas a expertos; y aplicación práctica con simulaciones estocásticas. Los resultados mostraron estimaciones de contingencias de costos entre 1.34% y 11%, y contingencias de tiempo entre 28.71% y 91.67%, lo cual representa una mejora significativa frente a desviaciones históricas de hasta 32.29% en costos. Se concluye que el enfoque probabilístico empleado permite reducir la incertidumbre, identificar factores críticos y asignar contingencias más realistas, facilitando una mejor planificación y toma de decisiones. La metodología es replicable en contextos similares con limitada formación en análisis cuantitativo de riesgos.

Palabras clave: análisis cuantitativo de riesgos, Simulación de Monte Carlo, Schedule Risk Analysis, contingencias, estimación de costos, estimación de tiempos, infraestructura vial.

ABSTRACT

This research aims to implement a quantitative risk analysis methodology to optimize cost and schedule estimation in road construction projects in Peru. The study adopts a quantitative, applied, and non-experimental approach. Two core techniques were used: Monte Carlo Simulation for cost estimation and Schedule Risk Analysis for schedule uncertainty. The proposed methodology was validated through three case studies: the Nueva Carretera Central, the Oyón-Ambo Road, and the Combapata Local Road. The research process consisted of three phases: a systematic literature review to select relevant techniques and probability distribution functions; validation through structured expert surveys; and practical application using stochastic simulations. Results show cost contingency estimates ranging from 1.34% to 11% and time contingency estimates between 28.71% and 91.67%, representing a significant improvement compared to historical deviations of up to 32.29% in similar projects. The findings demonstrate that the probabilistic approach reduces uncertainty, identifies critical variables, and enables the assignment of more realistic contingencies. This supports more accurate planning and informed decision-making in infrastructure project management. The methodology is applicable to similar contexts in developing countries, particularly where training and adoption of advanced quantitative risk analysis tools are limited.

Keywords: quantitative risk analysis, Monte Carlo Simulation, Schedule Risk Analysis, contingencies, cost estimation, schedule estimation, road infrastructure, Peru.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

A nivel mundial, los proyectos de infraestructura vial han enfrentado desafíos persistentes en la estimación de costos y plazos, lo que ha resultado en sobrecostos y retrasos recurrentes (Abdelalim et al., 2024; Aljohani, 2017). Estos desvíos no solo afectan la viabilidad financiera de las obras, sino que también retrasan la entrega de los beneficios sociales y económicos esperados. La Tabla 1 ilustra casos emblemáticos de carreteras en distintos países, donde se observan desviaciones significativas entre los presupuestos y plazos originalmente estimados y los valores finales.

Estudios indican que el 98% de los proyectos de infraestructura vial han excedido sus presupuestos o sufrido retrasos (SmartPM, 2022), y que esta problemática ha persistido durante los últimos 70 años, siendo la subestimación una de sus principales causas (Flyvbjerg et al., 2002). Además, diversas investigaciones señalan que los métodos tradicionales de estimación de costos y tiempos representan el primer obstáculo en la gestión de proyectos (Flyvbjerg et al., 2018), derivando en incumplimientos contractuales y disputas en tribunales arbitrales o judiciales.

Los métodos deterministas de estimación han sido fuertemente cuestionados en los últimos años (Abd et al., 2024; Ghadbhan Abed et al., 2022; Yun, 2022), debido a su incapacidad para incorporar la incertidumbre y la falta de integración de herramientas computacionales avanzadas, que hoy en día ofrecen mejores soluciones para la ingeniería.

Tabla 1*Sobrecostos y sobretiempos en proyectos mundiales*

Proyecto	País	Costo (Millones USD)	Costo (Millones USD)	Tiempo estimado	Tiempo Final	Fuente
Big Dig	USA	2,800	8,080	7 años	15 años	(Washington Post, 2007)
Sydney Metro	Australia	8,300	9,300	4 años	5años	(Alstom, 2019)
Northwest Mumbai	India	3,500	4,500	5 años	9 años*	(The Economic Times, 2024)
Metro Line 3	Colombia	647	2,600	5 años	10 años	(El Espectador, 2014)
Bogota - Girardot	Peru	162.77	177.10	3 años	5 años	(Invierte.pe, 2024)
Puente Nanay						

En el año 2019, el World Economic Forum presentó el *Reporte de la Competitividad Global*, un documento técnico que en base a 12 criterios de competitiva mide a las principales 141 economías del mundo. Para el WEF, uno de esos criterios relevantes es la infraestructura de un país. Perú se ubicó en el puesto 65 en base a los 12 criterios promediados y puesto 88 solo para el criterio de infraestructura (Schwab, 2019). Los criterios de salud y estabilidad macroeconómica ayudaron a Perú a mejorar su posición respecto a años anteriores; sin embargo, los efectos del COVID-19 golpearon fuertemente la realidad peruana (Loewy, 2024) y a nivel mundial (Grupo Banco Mundial, 2022) . El WEF no volvió a emitir un reporte tan detallado desde aquel año.

Otro ranking de gran reconocimiento mundial es el IMD World Competitiveness Ranking, el cual sólo evalúa la competitividad de 64 economías globales, ofreciendo una un enfoque diferente, al centrarse en sólo cuatro factores principales: (1) desempeño económico, (2) eficiencia gubernamental, (3) eficiencia empresarial pero también coincide con (4) infraestructura. En este ranking, Perú se ubicó al puesto 55 de 64 países evaluados (IMD World Competitiveness Center, 2023). En infraestructura, Perú se ubicó en el puesto 60 compartiendo de forma muy similar con el Ranking del WEF que otros rubros son los que permiten a Perú

mejorar su calificación; es decir, el aspecto de infraestructura es un aspecto bastante relegado a pesar de ser un elemento esencial para el desarrollo del país.

La infraestructura es un componente fundamental para el desarrollo integral de cualquier país. Las acciones orientadas al diseño, ejecución y mantenimiento de proyectos de construcción e ingeniería son esenciales tanto en el ámbito profesional como en el humano. No obstante, diversos indicadores señalan que, a pesar de la importancia de los proyectos de infraestructura, el Perú enfrenta graves dificultades derivadas de las demoras en los estudios de preinversión, la burocracia en la gestión de proyectos, la baja calidad de los expedientes técnicos y la paralización de obras.

El Ministerio de Economía y Finanzas estimó la brecha en infraestructura en Perú en 363 mil millones de soles en el largo plazo (MEF, 2019). Un reporte de Contraloría General, a setiembre de 2024, indica que existen había 2,648 obras públicas paralizadas, con un costo actualizado superior a S/ 43,555,315.763. El sector con más obras paralizadas es el sector Transportes con un 29% y las tres principales causas de paralización de obras son: incumplimiento de contrato, falta de recursos financieros y liquidez así como controversias y arbitrajes. (Contraloría General de la República, 2024). Estas razones están fuertemente vinculadas a problemas en la toma de decisiones y que está vinculada también con la gestión de proyectos.

Dentro de la Gestión de Proyectos, según el PMI, existen áreas del conocimiento y una de éstas es la Gestión de Riesgos, la cual contiene 7 procesos necesarios: (1) la planificación de la gestión, (2) identificación de riesgos, (3) análisis cualitativo, (4) análisis cuantitativo, (5) planificación de la respuesta al riesgo, (6) implementación y (7) monitoreo (PMI, 2019). En Perú, la gestión de riesgos es obligatoria solo como “identificación y asignación de riesgos” desde la implementación de la Ley N° 30225 (Congreso de la República, 2014).

Posteriormente la OSCE (2017), implementó una Directiva que identificaba cuatro procesos: identificación, análisis cualitativo, planificación de respuesta y asignación. Los 4 procesos del OSCE abarcaban al menos 6 procesos del PMI, siendo que el análisis cuantitativo de riesgos era el omitido.

Desde entonces, el enfoque predominante en la gestión de riesgos en Perú se ha centrado principalmente en el uso de métodos cualitativos. Estos enfoques cualitativos se caracterizan por su flexibilidad y simplicidad, lo que ha permitido una mayor adopción y comprensión por parte de los diversos actores involucrados en la gestión de riesgos. Sin embargo, a pesar de sus ventajas en términos de facilidad de implementación, estos métodos cualitativos presentan ciertas limitaciones al no abordar de manera exhaustiva aquellos eventos o sucesos que requieren de un análisis más riguroso debido a su alta variabilidad o complejidad (Damnjanovic & Reinschmidt, 2020; Hofstadler & Kummer, 2017).

Diversos autores (Garrido Martins et al., 2023; Montufar Benítez et al., 2024; PMI, 2019) han destacado técnicas de análisis cuantitativo de riesgos como la Simulación Monte Carlo, el Valor Monetario Esperado y el Schedule Risk Analysis; sin embargo, no todas estas herramientas han sido firmemente estudiadas en el ámbito de la optimización de costos y tiempo en carreteras. Por ello, la presente tesis aborda la construcción de una metodología de análisis cuantitativo de riesgos para optimizar costos y tiempos en carreteras. Para comprobar su validez, se utilizan como estudios de casos: la Nueva Carretera Central. Asimismo, los otros casos son la Carretera Oyon Ambo y la Carretera Departamental de Combapata.

En este contexto, se evidencia la necesidad de desarrollar e implementar una metodología de análisis cuantitativo de riesgos que permitan abordar la complejidad e incertidumbre presente en la construcción de carreteras en el Perú, permitiendo optimizar la estimación de costos y tiempos en carreteras peruanas, facilitando una toma de decisiones más informada y efectiva. Con ello, se contribuirá a cerrar la brecha metodológica existente en el país y a fomentar la aplicación de métodos más robustos y confiables para la gestión de proyectos de infraestructura vial en Perú.

1.2 Descripción del problema

La gestión de riesgos en proyectos de infraestructura en Perú, especialmente en obras públicas, es esencial para garantizar el cumplimiento de objetivos en alcance, costo y plazo, siendo obligatoria según la normativa nacional. Sin embargo, actualmente se basa mayoritariamente en enfoques cualitativos que, aunque útiles para identificar y priorizar riesgos, presentan limitaciones debido a su naturaleza subjetiva y baja capacidad predictiva. Este enfoque, centrado en juicios de expertos y matrices de riesgo, resulta insuficiente en contextos con variaciones significativas y datos imprecisos, lo que subraya la necesidad de innovación en las herramientas utilizadas en el sector.

El análisis cuantitativo de riesgos, en contraste, permite estimaciones más precisas y objetivas mediante modelos matemáticos y datos numéricos, aunque su implementación requiere mayor inversión de recursos y datos de calidad. Integrar ambos enfoques en la gestión de riesgos ofrecería una visión más exhaustiva y efectiva, combinando la identificación cualitativa de riesgos con la precisión y capacidad predictiva del análisis cuantitativo. En este contexto, esta investigación analizará cómo técnicas de análisis cuantitativo de riesgos permiten la optimización de costos y tiempos en carreteras peruanas.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema general

¿En qué medida una metodología de análisis cuantitativo de riesgos permite optimizar la estimación de costos y tiempos en la construcción de carreteras en el Perú?

1.3.2 Problemas específicos

¿Cómo puede la aplicación de técnicas de análisis cuantitativo de riesgos, optimizar la estimación de costos y plazos en proyectos de construcción de carreteras en Perú?

¿Cómo el uso de metodologías de análisis cuantitativo de riesgos permite mejorar la cuantificación de contingencias de costos en proyectos de construcción de carreteras en Perú?

¿De qué manera una metodología de análisis cuantitativo de riesgos permite facilitar la proyección de reservas de tiempo para abordar posibles retrasos en proyectos de construcción de carreteras en Perú?

1.4 Antecedentes

1.4.1 Antecedentes nacionales

En la tesis doctoral de Tarazona Rincón (2019) titulada “Modelo matemático de regresión lineal múltiple para determinar los desplazamientos en laderas inestables generadoras de impactos ambientales en obras de servicio carrozable - Huaraz”, se presenta un análisis de la inestabilidad de laderas en la región de Huaraz, Perú, causada por la combinación de precipitaciones intensas, escorrentías y factores geodinámicos. Utilizando un modelo de regresión lineal múltiple, la investigación cuantifica los desplazamientos de las laderas y los impactos ambientales resultantes durante la operación de obras viales. El modelo se elaboró con datos recogidos entre 2015 y 2018, y fue validado mediante el software Eviews 7, concluyendo que los desplazamientos pueden calificarse como lentos, lo que genera distorsiones en el entorno natural. Este estudio también introduce una Matriz de Identificación

de Impactos para evaluar y tratar los efectos ambientales de la inestabilidad de las laderas. Este antecedente es relevante para investigaciones que abordan la gestión de riesgos geodinámicos y su impacto en la infraestructura, ya que ofrece un marco cuantitativo para prever y mitigar los riesgos asociados a la inestabilidad de terrenos en proyectos de construcción.

En la tesis doctoral de Aroquipa (2022) titulada "Resiliencia de los sistemas estructurales ante eventos sísmicos evaluados mediante las PML y PAE" en la Universidad Nacional Federico Villarreal, se aborda la resiliencia sísmica de los sistemas estructurales a través de un enfoque cuantitativo predictivo. El estudio se centra en la evaluación de la probabilidad de pérdidas máximas probables (PML) y pérdidas anuales esperadas (PAE), utilizando la simulación de Monte Carlo para cuantificar los daños estructurales y no estructurales en diferentes escenarios sísmicos. La investigación también estima los costos de reparación y tiempos de reposición, proporcionando un índice de resiliencia de los sistemas. Este tipo de enfoque es relevante en el contexto de la construcción civil en zonas sísmicas, ya que permite una planificación más precisa y una mejor toma de decisiones respecto a la restauración de infraestructuras afectadas por sismos. Este antecedente es significativo para la investigación sobre gestión de riesgos en proyectos de construcción, ya que subraya el uso de metodologías cuantitativas avanzadas como la simulación de Monte Carlo, que también es parte del enfoque adoptado en la gestión de riesgos viales. La inclusión de análisis de costos de reparación y tiempo de restauración a partir de eventos sísmicos resulta pertinente para proyectos de infraestructura civil que enfrentan riesgos significativos y buscan optimizar la resiliencia de las construcciones.

Morales y Risco (2022) en su tesis de investigación titulada "Mejora de proyectos de saneamiento urbano usando Lean Construction y Gestión de Riesgos" efectúa una propuesta de mejora para la gestión de proyectos de inversión pública en saneamiento urbano. Dicha investigación es de enfoque cuantitativo y tipo correlacional. La citada tesis concluye que: 1)

que las causas raíces que originan retraso en el tiempo principalmente se clasifican como mano de obra, ausencias y renunciaciones del personal profesional, clima laboral y capacitación, 2) que el Last Planner System tiene sinergia con la Gestión de Riesgos en el plan de gestión de proyectos a pesar de ser herramientas de corrientes muy controversiales entre ellas, y 3) en el examen de sensibilidad del proyecto, se identifica que una fluctuación correspondiente a un escenario pesimista con un aumento del 10% en el costo de los materiales, incide considerablemente en la tasa interna de retorno, modificándola de un 31% a un 26%. Es importante señalar que, a partir de una variación negativa superior al 60% en el costo de los materiales, el proyecto deja de ser viable.

En la tesis doctoral de Aronés Barbarán (2024) titulada “Nueva fórmula para la determinación de variaciones de precios en contratos públicos de obras”, se propone una metodología innovadora para calcular de manera más precisa los reajustes de precios en contratos públicos de obras viales en Perú. La investigación señala que la fórmula polinómica vigente, establecida en 1979, considera un número limitado de insumos, lo que conduce a una subrepresentación de los costos reales, afectando el equilibrio financiero de los contratos. Utilizando datos de 80 proyectos viales licitados entre 2019 y 2023, el autor desarrolla una nueva fórmula que incluye la totalidad de los insumos del presupuesto, con el fin de reflejar con mayor exactitud las variaciones de precios y evitar desequilibrios económicos. La investigación fue validada con herramientas informáticas como Microsoft Excel y SPSS, mostrando diferencias significativas en los resultados de los reajustes obtenidos mediante la fórmula vigente y la propuesta. Este antecedente es relevante para investigaciones que aborden la optimización de costos en obras públicas, ya que plantea un enfoque cuantitativo que contribuye a mejorar la precisión y equidad en la gestión contractual del Estado peruano.

1.4.2 Antecedentes internacionales

En la tesis doctoral de Garrido Martins (2019) titulada “Assessment Of Project Risks In Fast-Track Construction Projects”, se propone un modelo de simulación para cuantificar los impactos económicos de los riesgos asociados al solapamiento de actividades en proyectos de construcción acelerados o también llamados *Fast-Track*. A través de simulaciones de Monte Carlo y algoritmos de optimización, el estudio identifica los grados óptimos de solapamiento para minimizar los impactos en tiempo y costo, generados por ocho riesgos clave que afectan la duración y los costos totales del proyecto. El análisis se centra en la cuantificación precisa de estos impactos, lo que ayuda a los tomadores de decisiones a ajustar las estrategias de aceleración de manera informada. Este antecedente es relevante para investigaciones que buscan integrar modelos cuantitativos en la gestión de riesgos de proyectos de infraestructura, especialmente aquellos que requieren aceleración. El enfoque de optimización y simulación aplicado en este estudio permite identificar soluciones que minimicen tanto los costos como el riesgo, lo cual es fundamental en entornos de proyectos de alta incertidumbre. [Haga clic o pulse aquí para escribir texto.](#)

En la tesis doctoral de Olarte (2021) titulada “An Integrated Approach to Project Planning: Reducing Uncertainty to Improve Safety and Cost” y presentada en la Universidad Texas A&M para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Civil y Ambiental, se propone un enfoque integrado para abordar la planificación de proyectos que permite reducir la incertidumbre y mejorar tanto la seguridad como los costos en la ejecución de proyectos. La tesis utiliza Redes Bayesianas (BBN) para representar y analizar el sistema socio-técnico (STS) de un proyecto, evaluando el impacto de los esfuerzos de planificación en los resultados de seguridad y costo. El estudio se enfoca en intervenciones industriales como pseudo proyectos (MMRT) para simular proyectos completos, permitiendo una cuantificación detallada del valor económico de la planificación adicional y sus efectos en la prevención de incidentes o

accidentes durante la ejecución. Este antecedente es particularmente relevante para investigaciones en análisis cuantitativo de riesgos en la construcción, ya que ejemplifica cómo las técnicas de Redes Bayesianas y análisis probabilísticos pueden aplicarse a la planificación de proyectos para optimizar tanto la seguridad como los costos operativos.

En la tesis doctoral de Chau Hai Le (2021) titulada "Novel Data-Driven Approaches for Enhanced Project Duration and Cost-Related Decision Making", presentada en la Texas A&M University para optar el grado de Doctor en Ingeniería Interdisciplinaria, se propone un enfoque innovador basado en datos para mejorar la toma de decisiones relacionadas con la duración y el costo de los proyectos. La tesis aborda tres áreas clave: la evaluación del rendimiento de los contratistas, la estimación del tiempo del contrato y la optimización del costo en la fase de planificación de proyectos viales. Utiliza datos históricos de informes diarios de trabajo (DWR) y aplica técnicas como la minería de patrones secuenciales y la optimización multiobjetivo para mejorar la precisión de las decisiones en cada fase del proyecto. Esta investigación se centra en aprovechar datos preexistentes para reducir la incertidumbre y mejorar la toma de decisiones a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Este antecedente es relevante para investigaciones relacionadas con el análisis cuantitativo de riesgos en la construcción, ya que integra técnicas avanzadas de optimización multiobjetivo y minería de datos para mejorar la precisión en la gestión de costos y tiempos en proyectos con alto nivel de incertidumbre.

En el artículo de Senić et al. (2024) titulado "Predicting Extension of Time and Increasing Contract Price in Road Infrastructure Projects Using a Sugeno Fuzzy Logic Model", se aborda el desafío de gestionar los riesgos en proyectos de infraestructura vial mediante la aplicación de un modelo de lógica difusa Sugeno. El estudio identifica los principales factores que influyen en la extensión del tiempo (EoT) y el incremento en el precio del contrato (ICP), y propone un enfoque cuantitativo basado en un análisis predictivo preciso. Utilizando 10

características clave de proyectos completados, el modelo permite una mayor precisión en la previsión de retrasos y sobrecostos, mejorando así la toma de decisiones proactivas y la implementación de estrategias para mitigar los riesgos. Este antecedente es relevante para investigaciones que abordan la gestión de riesgos en infraestructura vial, ya que demuestra la viabilidad de utilizar técnicas avanzadas, como los sistemas difusos, para mejorar la predictibilidad en proyectos con altos niveles de incertidumbre. En este contexto, la integración de modelos cuantitativos, como la lógica difusa, proporciona una herramienta eficaz para optimizar el manejo de riesgos, una cuestión central en la investigación sobre la aplicación de métodos de inteligencia artificial en la gestión de proyectos viales.

1.5 Justificación

1.5.1 Justificación teórica

Esta investigación justifica teóricamente su aporte al campo de la gestión de riesgos en proyectos de infraestructura vial al proponer una metodología cuantitativa avanzada que, en contraste con los enfoques cualitativos predominantes en el Perú, mejora la precisión en la estimación de costos y plazos, optimiza la planificación y ejecución de proyectos de carreteras, y ofrece un marco riguroso replicable y adaptable a otros contextos geográficos, llenando un vacío teórico en ingeniería civil y gestión de riesgos.

1.5.2 Justificación Práctica

Esta investigación justifica su impacto práctico al optimizar la gestión de proyectos viales en el Perú mediante un enfoque cuantitativo para la identificación, cuantificación y mitigación de riesgos, lo que mejora el control de contingencias financieras y de tiempo, reduce la incertidumbre, y permite a profesionales y empresas constructoras tomar decisiones más informadas, incrementando la eficiencia operativa y la eficacia en la planificación y ejecución de proyectos de infraestructura pública y privada.

1.5.3 Justificación social

Esta investigación justifica su relevancia social al proponer un enfoque más riguroso y efectivo para la gestión de riesgos en la construcción de carreteras, contribuyendo a una infraestructura más confiable y segura que fomente el desarrollo sostenible, reduzca desigualdades sociales y mejore la calidad de vida en el Perú, al optimizar la estimación de costos y plazos, lo que permite completar proyectos viales de manera más eficiente en beneficio de las comunidades más vulnerables.

1.5.4 Justificación Metodológica

Esta tesis justifica su aporte metodológico al desarrollar una metodología innovadora para el análisis cuantitativo de riesgos en proyectos de construcción de carreteras, adaptada al contexto peruano, que integra técnicas avanzadas como la Simulación de Monte Carlo, modelos matemáticos y estadísticos, revisión documental y fichas de recolección de datos, estableciendo un enfoque sistemático y reproducible que mejora la precisión en la cuantificación, priorización y mitigación de riesgos, y ofrece una estructura clara y replicable para futuros investigadores y profesionales en la gestión de proyectos de ingeniería.

1.6 Limitaciones

Por un lado, la limitada difusión y adopción de prácticas de gestión de riesgos en el sector construcción en Perú dificulta la recolección de datos homogéneos y la aplicación práctica de metodologías cuantitativas, especialmente en un proyecto de alta inversión y complejidad como la Nueva Carretera Central. Además, la naturaleza única de este proyecto reduce la disponibilidad de casos de estudio similares, y el acceso restringido a datos confiables y completos puede limitar la profundidad y precisión del análisis. La variabilidad de factores económicos, sociales y culturales en el contexto latinoamericano también presenta desafíos para adaptar metodologías importadas de otros países.

Otro reto importante radica en la resistencia de organizaciones y profesionales acostumbrados a enfoques cualitativos, así como en la falta de capacitación técnica en análisis cuantitativos. A pesar de estas limitaciones, esta investigación representa una contribución significativa al campo de la gestión de proyectos de infraestructura en Perú, al proporcionar una herramienta que optimiza la planificación y ejecución de proyectos viales y establece las bases para futuras investigaciones.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo general

Implementar una metodología de análisis cuantitativo de riesgos que optimice la estimación de costos y tiempos en la construcción de carreteras en el Perú.

1.7.2 Objetivos específicos

Aplicar las técnicas de análisis cuantitativo de riesgos para optimizar la estimación de costos y plazos en proyectos de construcción de carreteras en Perú.

Desarrollar una metodología de análisis cuantitativos de riesgos que permita mejorar la cuantificación de contingencias de costos en proyectos de construcción de carreteras en Perú.

Implementar una metodología de análisis cuantitativo de riesgos que permita facilitar la proyección de reservas de tiempos en proyectos para abordar posibles retrasos en proyectos de construcción de carreteras en Perú.

1.8 Hipótesis

1.8.1 Hipótesis general

H.G.: Una metodología de análisis cuantitativo de riesgos permite optimizar significativamente la estimación de costos y tiempos en la construcción de carreteras en el Perú

1.8.2 Hipótesis específicas

H1: La aplicación de técnicas de análisis cuantitativo de riesgos, optimiza significativamente la estimación de costos y plazos en proyectos de construcción de carreteras en Perú.

H2: El uso de metodologías de análisis cuantitativo de riesgos permite mejorar significativamente la cuantificación de contingencias de costos en proyectos de construcción de carreteras en Perú

H3: La metodología de análisis cuantitativo de riesgos permite facilitar la proyección de reservas de tiempo para abordar posibles retrasos en proyectos de construcción de carreteras en Perú.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Bases Teóricas de la investigación

2.1.1 Marco de gestión de riesgos

La gestión de riesgos puede abordarse mediante diversos marcos y normas, desde estándares internacionales hasta enfoques específicos para diferentes industrias. La norma ISO 31000:2018 ofrece un enfoque sistemático y proactivo para identificar, analizar y evaluar riesgos, estableciendo un marco para la toma de decisiones y el control de riesgos. Por su parte, el PMBOK detalla un proceso de seis pasos para gestionar riesgos en proyectos, destacando como una referencia clave en gestión de proyectos.

Existen también marcos especializados, como el NIST Cybersecurity Framework para riesgos cibernéticos, el COSO Enterprise Risk Management Framework para riesgos empresariales, y el Enterprise Risk Management (ERM), que integra la gestión de riesgos en los objetivos organizacionales. En el ámbito financiero, herramientas como el Value at Risk (VaR) y el Expected Shortfall (ES) permiten medir y gestionar riesgos de inversión. Cada enfoque tiene fortalezas y limitaciones, por lo que es crucial seleccionar el más adecuado según el contexto y las necesidades específicas de la organización. Todo esto se resume en la Tabla 2.

Tabla 2

Marcos de gestión de riesgos en Proyectos

Característica	ISO 31000	COSO ERM	PMBOK
Origen y Propósito	Estándar internacional desarrollado por la Organización Internacional de Normalización (ISO).	Desarrollado por el Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (COSO) para integrar la gestión de riesgos en la estrategia	Guía desarrollada por el Project Management Institute (PMI) enfocada en la gestión de riesgos dentro de proyectos específicos.

empresarial.

Estructura y Componentes	Principios, marco de trabajo y proceso de gestión de riesgos.	Componentes interrelacionados que incluyen el entorno, la evaluación de riesgos, la respuesta a riesgos, la supervisión y la información y comunicación.	Procesos específicos de gestión de riesgos integrados en las áreas de conocimiento del PMBOK, como la identificación, análisis, planificación de respuestas y monitoreo.
Principios Clave	Integración, estructuración, personalización, inclusión, dinámica, mejora continua, basados en la mejor evidencia disponible.	Creencia en el riesgo como un aspecto inherente de la gestión empresarial, y la importancia de la comunicación y la información continuas.	Enfoque en la identificación proactiva y la planificación de respuestas a riesgos dentro del ciclo de vida del proyecto.
Enfoque	Enfoque holístico y sistemático aplicable a cualquier tipo de organización y contexto.	Enfoque integrado que alinea la gestión de riesgos con la estrategia y los objetivos empresariales. Principalmente orientado a grandes organizaciones que buscan integrar la gestión de riesgos en su estructura estratégica y operativa.	Enfoque específico en la gestión de riesgos dentro del contexto de proyectos, considerando su impacto en el alcance, tiempo y costos.
Ámbito de Aplicación	Aplicable a todo tipo de organizaciones, independientemente de su tamaño, industria o sector.	Se integra con otros componentes del marco COSO, como el control interno y el cumplimiento normativo, y puede alinearse con otros estándares empresariales.	Específico para la gestión de riesgos en proyectos, independientemente de la industria.
Integración con Otras Áreas	Compatible con otros estándares de gestión (como ISO 9001, ISO 27001) y fácil de integrar en la cultura organizacional existente.	Enfoque integral que alinea la gestión de riesgos con la estrategia empresarial, reconocido y ampliamente adoptado en grandes corporaciones.	Integrado en las áreas de conocimiento del PMBOK, facilitando la gestión de riesgos como parte integral de la gestión de proyectos.
Ventajas	Flexible, aplicable universalmente, enfoque basado en principios, promueve la mejora continua.		Específico para proyectos, proporciona procesos detallados y herramientas para la gestión de riesgos en el ciclo de vida del proyecto.

Limitaciones	Puede ser percibido como demasiado genérico para necesidades específicas de algunas organizaciones.	Puede ser complejo de implementar para pequeñas y medianas empresas, requiere un compromiso significativo de la alta dirección. No existen certificaciones específicas de COSO ERM, pero es ampliamente reconocido y utilizado como referencia en auditorías y evaluaciones de riesgos.	Enfocado únicamente en proyectos, lo que puede limitar su aplicación a la gestión de riesgos a nivel organizacional.
Certificaciones	Certificación ISO 31000 disponible para organizaciones que implementan el estándar.	COSO ERM – Integrado en la versión 2004, con actualizaciones menores posteriores enfocadas en su implementación práctica.	No hay certificaciones específicas de gestión de riesgos PMBOK, pero el PMI ofrece la certificación PMP que incluye conocimientos de gestión de riesgos.
Actualización Más Reciente	ISO 31000:2018 – Última versión publicada en 2018, que refina y actualiza los principios y el marco de gestión de riesgos.		PMBOK® Guide – Séptima Edición publicada en 2021, con actualizaciones continuas para reflejar las mejores prácticas actuales en gestión de proyectos y riesgos.

2.1.2 Metodologías de gestión de riesgos en ingeniería

En cada enfoque de gestión de riesgos, es posible considerar diferentes metodologías para concretar todos los procesos con cuales manejar los posibles impactos durante la ejecución de un proyecto. Cada metodología se crea a partir de las experiencias que cada empresa, proyecto u organización pudo aprender.

En la Tabla 3, se muestran algunas metodologías de la gestión de riesgos para diferentes sectores de la actividad sociolaboral como la ingeniería, la programación digital, el sector manufacturero, entre otros. Así, en cada metodología existen diferentes formas de análisis cuantitativo y cualitativo, así como también la ejecución de plan de respuesta ante riesgos, mas en muchas ocasiones las técnicas y los instrumentos son los mismos o se asemejan en algún punto.

Tabla 3.*Metodologías de gestión de riesgos*

Características	Metodologías				
	PMBOK (PMI)	Octopus SME	Método de análisis de riesgos [RAM]	Método de Schmidt Brasil	
Sector de aplicación	Construcción, ingeniería y software	Ingeniería y software	Construcción e ingeniería	Nuevas tecnologías	
Identificación de los riesgos	Riesgos probables	Mediante una lista de riesgos de proyectos anteriores	Con la planificación de recursos empresariales	Según la experiencia de los integrantes del proyecto	
Técnicas y herramientas para la identificación	Revisión de documentos, entrevistas, FODA, diagramas, etc.	Revisión de documentos, entrevistas, lluvia de ideas y diagramas	Lluvias de ideas, entrevistas, diagramas y lista de control	Lluvias de ideas, entrevistas, evaluación de riesgos de otros proyectos	
Análisis cualitativo	Priorización de riesgos	Parámetros como tamaño, equipo, edad, gobernabilidad, etc.	Probabilidad de ocurrencia	Se evalúa riesgos según la experiencia de los integrantes del proyecto	
Análisis cuantitativo	Calificación numérica de los efectos de riesgo	De acuerdo con el contexto previo	Según efecto sobre el proyecto entre muy desastroso y muy manejable	Se evalúa según la experiencia de los integrantes del proyecto	
Plan de respuesta al riesgo	Desarrollo de opciones para incrementar oportunidades y reducir amenazas	Mediante una lista de riesgos de proyectos anteriores	Planificación de recursos empresariales [ERP]	Plan de riesgo con asignación de responsabilidades, tiempos de ejecución, revisiones, etc.	
Marco conceptual matemático	Teoría de las probabilidades	Método de encolamiento según el parámetro de criticidad	Probabilístico	Teoría de colas	

De las metodologías descritas, la gestión de riesgos bajo el enfoque del PMBOK tiene mayor afinidad con la ingeniería civil. En el Perú, el Estado Peruano formuló la Directiva N° 012-2017-OSCE/CD “Gestión de riesgos en la planificación de la ejecución de obras”, la cual

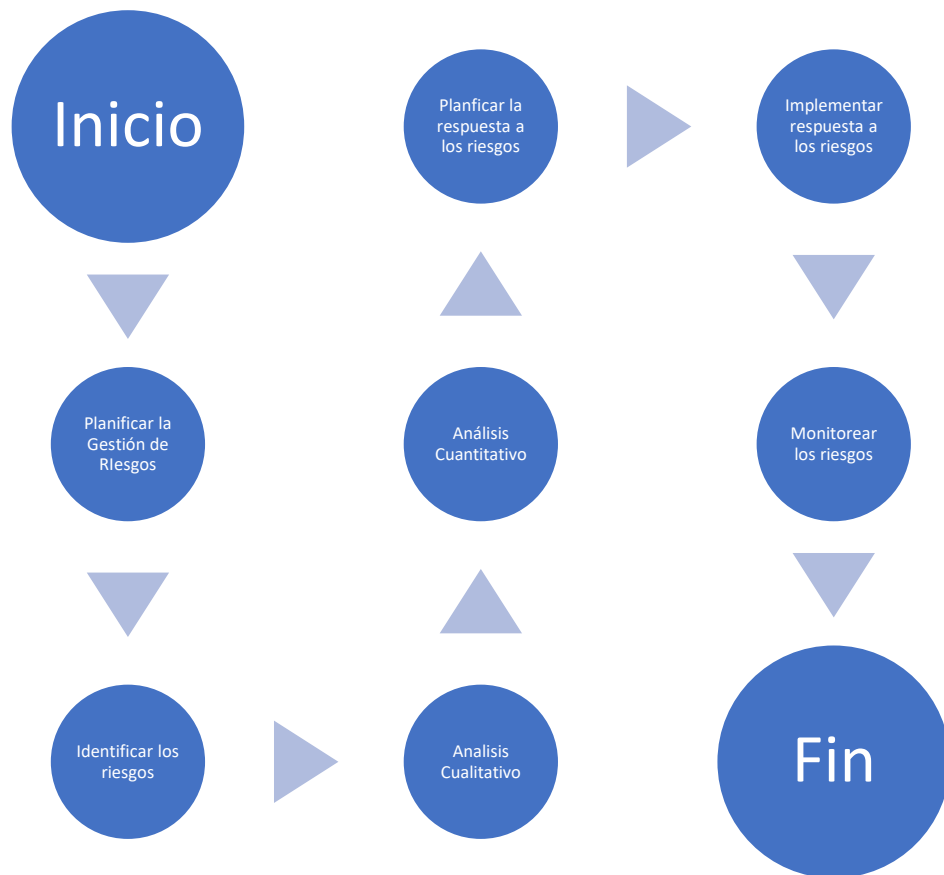
es de uso obligatorio para la formulación de expedientes técnicos de proyectos de infraestructura basada en el PMBOK. De no haberse formulado en ese momento, corresponde que la gestión de riesgos sea implementada en la etapa de ejecución de obra.

2.1.3 La gestión de riesgos según el PMBOK

En el Perú, las principales metodologías de gestión de proyectos y gestión de riesgos provienen de las prácticas establecidas por el Project Management Institute; cabe precisar que, éstas han sido diseñadas para su aplicación en el ámbito general de los proyectos (manufactura, industrial, textil, ingeniería civil, etc.). Por ello, es necesario adecuar estas metodologías para ser aplicadas en la ingeniería civil y específicamente en los proyectos de infraestructura vial. Con ello se justifica el desarrollo e implementación de un método práctico para su aplicación, considerando que en el Perú existe muy poca investigación aplicada respecto a este tópico.

La Figura 1 explica, en resumen, el conjunto de actividades que conforman los siete procesos de la gestión de riesgos bajo el enfoque del PMBOK. La metodología para aplicar la gestión de riesgos en nuestra investigación se basa en la estructura del PMBOK.

Figura 1.
Marco general para la gestión de riesgos en proyectos



Nota. Descripción de la metodología de Gestión de Riesgos según el PMI. Adaptado de PMBOK (PMI, 2017).

El método de gestión de riesgos basado en las prácticas de dirección de proyectos según el PMBOK involucra como mínimo los siguientes pasos: identificación de riesgos, análisis cualitativo de los riesgos, planificación de los riesgos, implementación de respuesta a los riesgos y monitoreo de los riesgos.

2.1.3.1 Identificación de riesgos. La fase de inicio en la gestión de un proyecto consiste en identificar los problemas o las necesidades del entorno, así como también las oportunidades o potenciales oportunidades. En otras palabras, en esta etapa se busca examinar distintos aspectos del interesado en el proyecto: económicos, sociales, políticos, emocionales, etc.

2.1.3.2 Análisis cualitativo de riesgos. Para el análisis cualitativo se utiliza una matriz que otorga valores numéricos en función de la probabilidad de ocurrencia del evento que ocasiona el riesgo y el impacto del evento en la ejecución de la obra. La Tabla 4 muestra la matriz para calificar cualitativamente los riesgos de un proyecto bajo en el enfoque convencional del PMI y adoptado también en Perú bajo la OSCE.

Tabla 4

Valoración del riesgo mediante el método cualitativo

		Calificación del riesgo = P X I					
Probabilidad de ocurrencia	Muy alta	0.9	0.045	0.09	0.18	0.36	0.72
	Alta	0.7	0.035	0.07	0.14	0.28	0.56
	Moderada	0.5	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4
	Baja	0.3	0.015	0.03	0.06	0.12	0.24
	Muy baja	0.1	0.005	0.01	0.02	0.04	0.08
			0.05	0.1	0.2	0.4	0.8
Impacto en la ejecución de la obra		Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	

En la Tabla 5, se hace una comparación entre la vista gerencial basada en el análisis cualitativo y la visión de la teoría de decisión basada en el análisis cuantitativo de riesgos según (Damjanovic & Reinschmidt, 2020).

Tabla 5*Comparación entre la perspectiva de decisión teórica y la gerencial*

Visión de la teoría de decisión	Vista gerencial
Ve los riesgos como probabilidades	Ve los riesgos como exposición
Sintetiza los riesgos individuales en un factor de riesgo	Divide los riesgos en componentes individuales para su mitigación
Cuantifica los riesgos numéricamente	Caracteriza los riesgos verbal y cualitativamente
Analiza las distribuciones de probabilidad sobre (idealmente) todos los resultados posibles	Analiza relativamente pocos resultados posibles
Ve los riesgos como eventos aleatorios	Considera que los riesgos son evitables o controlables
Encuentra soluciones óptimas bajo incertidumbre	Se mueve gradualmente hacia soluciones intuitivamente satisfactorias ("satisface")

2.1.3.3 Análisis cuantitativo de riesgos. El análisis cuantitativo de riesgos es un enfoque sistemático y riguroso para evaluar y medir el impacto de los riesgos en un proyecto o una iniciativa empresarial. Esta técnica combina la información sobre la probabilidad y la magnitud de los riesgos para producir una evaluación objetiva de la exposición total al riesgo. El análisis cuantitativo de riesgos involucra una serie de pasos, incluyendo la identificación de los riesgos, la evaluación de la probabilidad y la magnitud de los efectos negativos potenciales, la priorización de los riesgos y la selección de estrategias para abordarlos. El resultado del análisis cuantitativo de riesgos es una representación numérica de la exposición al riesgo, lo que permite a los tomadores de decisiones comparar diferentes escenarios y elegir la estrategia que mejor balancee el riesgo y la recompensa.

2.1.3.4 Planificación de la respuesta a los riesgos. La planificación de la respuesta a los riesgos es un proceso clave en la gestión de riesgos que permite a las organizaciones prepararse para los eventos negativos que pueden afectar sus objetivos. Esta planificación se realiza después de la identificación y evaluación de los riesgos y antes de que se produzca un evento de riesgo.

La planificación de la respuesta a los riesgos involucra dos pasos principales: 1) Identificación de las estrategias de respuesta a los riesgos: En este paso, se evalúan diferentes estrategias para abordar los riesgos identificados, como la evitación, la transferencia, la mitigación o la aceptación, 2) Desarrollo de un plan de respuesta: En este paso, se definen las acciones específicas que se tomarán en caso de un evento de riesgo, incluyendo la identificación de los responsables, los recursos necesarios y los plazos y 3) Monitoreo y revisión del plan de respuesta: Finalmente, es importante monitorear y revisar regularmente el plan de respuesta a los riesgos para asegurarse de que siga siendo relevante y efectivo.

2.1.4 Método de Simulación de Monte Carlo

La simulación de Monte Carlo es un conjunto de métodos que representan una cantidad de interés como un parámetro de una distribución y utilizan una muestra aleatoria de esa distribución para estimar dicho parámetro. Este método es especialmente útil en escenarios donde el análisis exacto es complejo o ineficaz. En esencia, Monte Carlo convierte un problema determinístico en uno probabilístico y, mediante la generación de muchas muestras o iteraciones, se aproxima la solución esperada (Sanz-Alonso & Al-Ghattas, 2024)

Sea z una unidad estándar Normal variable $[N(0, 1)]$, lo que significa que tiene media cero y varianza 1. Sea K un número de repeticiones del generador de números aleatorios, produciendo sucesivas variaciones uniformes independientes $r_1, r_2, \dots, r_j, \dots, r_k$ en el intervalo $[0, 1]$. Entonces se puede aproximar la unidad Normal variada z por:

$$z = \frac{\sum_{j=1}^K r_j - K/2}{\sqrt{K/12}}$$

Una elección obvia de K para simplificar esta expresión es $K = 12$, en cuyo caso:

$$z = \sum_{j=1}^K r_j - 6$$

Es decir, se genera una variable aproximadamente Normal tomando la suma de 12 instancias de la variable y restando 6. Se puede ver que $K = 12$ trunca la distribución normal dentro del intervalo $[-6, +6]$, es decir, seis desviaciones estándar por encima o por debajo de la media. Otro enfoque común para generar variables aleatorias independientes normalmente distribuidas es usar z variables y luego generar variables aleatorias normales a partir de la inversa de la función de distribución normal acumulativa. Si las varianzas y covarianzas son estimaciones subjetivas, tal vez obtenidas de diferentes expertos, ¿se garantiza que la matriz de

covarianzas es consistente y válida? Desafortunadamente, no. Por ejemplo, al considerar un matriz de 3x3:

$$V = \begin{pmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \rho_{13}\sigma_1\sigma_3 \\ \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 & \rho_{23}\sigma_2\sigma_3 \\ \rho_{13}\sigma_1\sigma_2 & \rho_{23}\sigma_2\sigma_3 & \sigma_3^2 \end{pmatrix}$$

El determinante de V es:

$$|V| = v_{11}v_{22}v_{33} - v_{11}v_{23}v_{32} - v_{12}v_{21}v_{31} + v_{13}v_{21}v_{32} - v_{13}v_{22}v_{31}$$

Si V es una matriz de covarianza, entonces la sustitución de las covarianzas como en la matriz anterior da:

$$|V| = \sigma_1^2 \sigma_2^2 \sigma_3^2 [1 - (\rho_{12}^2 + \rho_{13}^2 + \rho_{23}^2) + 2\rho_{12}\rho_{13}\rho_{23}]$$

Este valor sólo puede ser positivo si

$$1 - (\rho_{12}^2 + \rho_{13}^2 + \rho_{23}^2) + 2\rho_{12}\rho_{13}\rho_{23} > 0$$

El método de simulación Monte Carlo ofrece una estimación más precisa y confiable. No obstante, las investigaciones previas en relación con este enfoque se han enfocado únicamente en los efectos de la incertidumbre estocástica, mientras que han pasado por alto las implicaciones de otras modalidades de incertidumbre (Curto et al., 2022)

Numerosos ingenieros que emplean la simulación Monte Carlo determinan la cantidad de iteraciones en el rango de varios cientos. No obstante, la cifra real necesaria para obtener límites de confianza adecuados podría situarse en decenas de miles. Si se ha realizado la simulación de Monte Carlo, se conocen n y $\hat{p}$, por lo que se puede calcular la banda de confianza $\Delta\hat{p}$ para cualquier nivel de significancia definido por k . Esta banda de confianza se considera simétrica, por lo que utilizamos una prueba de dos colas basada en la aproximación normal, discutida anteriormente. Por ejemplo, para una banda de confianza del 95%,

corresponde a probabilidades de 0.025 en cada cola en una prueba de dos colas y $k = 1.96$ a partir de las tablas de la distribución normal. Para calcular el valor requerido de n antes de realizar la simulación de Monte Carlo, tomamos el cuadrado de ambos lados de la ecuación anterior, lo que da:

$$n = \left(\frac{k}{\Delta p} \right)^2 p(1 - p)$$

Antes de llevar a cabo la simulación, se debe estimar un valor para p . Se podría considerar que el valor de p de interés será aproximadamente el valor crítico de decisión p_{crit} . Por ejemplo, si el cliente o dueño del proyecto desea una probabilidad del 1% o menor de que el proyecto resulte desfavorable (al no cumplir con criterios financieros y otros aspectos relevantes). En este caso, se establece $p = 0.01$. Suponiendo que el patrocinador está dispuesto a aceptar una banda de confianza del 10% de este valor, tanto por encima como por debajo. Así, se fija $\Delta p = 0.001$, lo que significa que el intervalo de confianza será $0.009 \leq p \leq 0.011$. Si el cliente o dueño del proyecto demanda un 95% de confianza en que este intervalo de confianza incluye el verdadero valor poblacional p , entonces establezca $k = 1.96$. Usando estos valores numéricos en la ecuación para n , arriba, se obtiene:

$$n = \left(\frac{1.96}{0.001} \right)^2 (0.01)(0.99) = 38\,032 \text{ iteraciones}$$

Otra expresión para el cálculo de numero de iteraciones necesarias en la simulación Monte Carlo es la siguiente que fuese expuesta en artículo de Bukaçi et al. (2016), Driels & Shin (2004) y que se expresa de la siguiente forma:

$$n = \left[\frac{100 \times z_c \times S_x}{\underline{x}E} \right]^2$$

2.1.5 Método del Segundo momento

Los modelos de desempeño, lineales o no lineales, son fundamentales para la evaluación cuantitativa de riesgos en proyectos. Mientras que algunos aspectos, como los costos totales o la duración de la ruta crítica, pueden modelarse de forma lineal, otros requieren modelos no lineales, como los de costo paramétrico o productividad. Métodos aproximados, como el enfoque de segundo momento, pueden sustituir a la simulación de Monte Carlo, utilizando medias y varianzas para caracterizar incertidumbre. Este enfoque es útil cuando los datos disponibles son limitados o se basan en juicios subjetivos, permitiendo analizar la variabilidad total de un proyecto y priorizar elementos críticos sin recurrir a simulaciones extensas.

Además, el análisis de segundo momento facilita la identificación de los paquetes de trabajo que más contribuyen a la incertidumbre en el costo total, lo que permite al director de proyecto enfocar esfuerzos en áreas críticas. Este método también es aplicable a variables de desempeño como la capacidad de carga en edificaciones o el tiempo de ejecución en proyectos de software, permitiendo evaluar riesgos asociados a la variabilidad y proponer medidas correctivas en elementos con alta incertidumbre. En proyectos bajo control estadístico, este enfoque ofrece una solución sencilla y efectiva para gestionar riesgos sin depender de métodos computacionalmente intensivos como la simulación de Monte Carlo.

Este método no necesariamente resulta aplicable a procesos fuera de control, es decir, aquellos afectados por alguna causa externa única con una probabilidad de ocurrencia muy baja, pero con un impacto significativo como los cisnes negros (Taleb, 2007)

2.1.6 Aplicación de matrices de varianza y covarianza en riesgos

La matriz de varianzas y covarianzas es una herramienta utilizada en estadística para analizar la relación entre varias variables. Se construye con las varianzas y covarianzas de un

conjunto de datos, lo que permite entender no solo la variabilidad de cada variable, sino también cómo se relacionan entre sí. Existen varios pasos para desarrollar una matriz de varianzas y covarianzas. El primero es la recolección de datos, para cual debe contarse con un conjunto de datos con dos o más variables. Suponiendo que se tiene una matriz de datos con n riesgos y p variables.

$$\begin{pmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & \cdots & X_{np} \end{pmatrix}$$

Donde X_{ij} es el valor de la ij -ésima variable en la i -ésima observación. El segundo paso consiste en calcular las medias. Para ello se requiere calcular la media de cada variable X_j , para $j=1,2,\dots,p$.

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$$

El tercer paso es restar las medias. A cada valor de las variables X_{ij} , debe restarse la media correspondiente a $\bar{X}_j$ para obtener las desviaciones de la media.

$$X'_i = X_{ij} - \bar{X}_j$$

El cuarto paso es el cálculo de la covarianza. Para cada par de variables X_i y X_k , se calcula la covarianza.

$$Cov(X_i; X_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X'_{ij} * X'_{ik})$$

Si $j=k$, esto da la varianza de la variable X_j . El quinto paso consiste en construir la matriz. La matriz de varianzas y covarianzas será una matriz simétrica de $p \times p$, donde la diagonal contiene las varianzas de cada variable y los elementos fuera de la diagonal son las covarianzas entre las variables. Un ejemplo para tres variables se muestra a continuación.

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \text{Var}(X_1) & \text{Cov}(X_1, X_2) & \text{Cov}(X_1, X_3) \\ \text{Cov}(X_2, X_1) & \text{Var}(X_2) & \text{Cov}(X_2, X_3) \\ \text{Cov}(X_3, X_1) & \text{Cov}(X_3, X_2) & \text{Var}(X_3) \end{pmatrix}$$

2.2 Marco conceptual

2.2.1 *Definiendo el riesgo*

El riesgo es un concepto amplio y complejo. Diversos autores han formulado definiciones en función de sus formaciones académicas, de sus experiencias y sobre todo del enfoque que le han dado: netamente académico o incluso filosófico. Según Leveson (2011), ingeniera y profesora de aeronáutica y astronáutica en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, el riesgo se define como una medida de la probabilidad y gravedad de un evento adverso que puede ocurrir en un sistema. Haimes (2009), ingeniero y profesor en la Universidad de Virginia, donde también es fundador y director del Centro de Riesgo en Sistemas de Ingeniería y Medio Ambiente coincide mucho con Leveson y por ello define el riesgo como la interacción entre la probabilidad de un evento indeseable y sus consecuencias negativas en un sistema. Aven (2011) ingeniero y profesor de riesgo en la Universidad de Stavanger en Noruega, coincide en que el riesgo comprende probabilidad y para ello lo define como la combinación de la probabilidad de un evento y las consecuencias adversas resultantes de ese evento. Aquellos investigadores que han trasladado sus ideas al campo filosófico han incluido al riesgo en su definición como la exposición a eventos inciertos y potencialmente perjudiciales (Gigerenzer & Gerd, 2014; Taleb, 2007)

El término riesgo siempre ha estado asociado a la estimación de una probabilidad la cual tiene una mayor valoración dependiendo de la falta de certeza o conocimiento preciso sobre un evento o situación futura. A mayor conocimiento del evento, menor incertidumbre. A menor incertidumbre, mayor posibilidad de evaluar objetivamente la probabilidad del riesgo.

Según el PMBOK, un riesgo es un evento o condición incierta que, si sucede, tiene un efecto en por lo menos uno de los objetivos del proyecto y puede tener una o más causas y, si sucede, uno o más impactos. Asimismo, existe una afectación directa e inmediata a los objetivos del proyecto – costo, calidad o plazo - cuando un riesgo sucede. El riesgo tiene, naturalmente, dos dimensiones: la probabilidad de ocurrencia del evento y el impacto en la ejecución del proyecto; ambos parámetros no se pueden medir directamente y deben ser estimados a través de técnicas cualitativas o cuantitativas.

Aunque la mayoría de los eventos son predecibles, existen aquellos altamente improbables, pero de gran impacto a los que podemos denominar “el cisne negro” tal como los ha denominado Taleb (2007) en su libro “The Black Swan: The impact of Highly Improbable”, estos eventos son imposibles de predecir y su impacto puede ser enorme, pero a menudo se ignoran debido a la tendencia humana a confiar en las estadísticas y a la idea errónea de que el futuro puede ser predecible.

2.2.2 La gestión de riesgos

La gestión de riesgos es un enfoque sistemático para identificar, analizar, monitorear y responder a eventos inciertos y potencialmente negativos, con el propósito de aumentar la probabilidad de éxito del proyecto y reducir las posibles consecuencias adversas (Hillson, 2009; Pritchard, 2014)

Martinez Hernandez & Blanco Dopico (2017) indican que la gestión de riesgos ha tenido distintas definiciones en el transcurso de la historia. Así, la gestión de riesgos trasciende a los enfoques académicos como la práctica profesional. En un principio se entendía a la gestión de riesgos en relación con la seguridad de los empleados de una fábrica y a la protección de materiales. Asimismo, la gestión de riesgos se dividía en diferentes aspectos como los riesgos económicos, los riesgos legales y contractuales y los riesgos de la infraestructura.

Guerrero-Aguiar et al. (2019) indican que la gestión de riesgos, a nivel organizacional, es importante porque contribuye al mejoramiento del uso de recursos, al enfoque de procesos, a la cultura del control interno y a la minimización de los costos. Asimismo, con la gestión de riesgo es posible mejorar la toma de decisiones en la administración de procesos, ya que, al tener en cuenta las posibles amenazas o impactos, las probabilidades de ocurrencia de peligros disminuyen, por esa razón se busca aplicar métodos para afrontar dichos peligros, y, de ese modo, reducir el impacto.

2.2.3 *Análisis cualitativo y cuantitativo de riesgos*

Para el PMI (2019) en el *Estándar para la Gestión de Riesgos*, el análisis cualitativo de riesgos es la consideración de una serie de características tales como la probabilidad de ocurrencia, el grado de impacto sobre los objetivos, la capacidad de gestión, el momento en que podrían producirse los impactos, las relaciones con otros riesgos y las causas o efectos comunes. Asimismo, el análisis cuantitativo de riesgos es el efecto combinado de los riesgos identificados sobre el resultado deseado. Es importante en este punto apreciar la poca profundidad que existe en la definición del análisis cuantitativo de riesgos en un documento tomado como referente para la gestión de riesgos.

2.2.4 *Técnicas cuantitativas para la gestión de riesgos*

En el presente apartado, se muestran algunas de las técnicas cuantitativas utilizadas en el análisis de riesgos en ingeniería las cuales, por sus características para el manejo de eventos complejos y variables, son altamente adaptables al campo de la ingeniería civil. En algunos casos, estas herramientas ya se aplican en otros países como Estados Unidos y Alemania; sin embargo, tienen poca o nula difusión en Perú. Estas técnicas se apoyan de herramientas estadísticas y probabilísticas basadas en investigaciones en el campo de la matemática tales como el método de aproximación de tres puntos para variables aleatorias continuas (Keefer,

1994; Keefer & Bodily, 1983). Las técnicas más utilizadas en Análisis Cuantitativo de Riesgos se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6

Técnicas de análisis cuantitativo de riesgos según el PMI (2019)

Técnica (PMI)	Descripción Breve (según el PMI)
X6.4.1 Estimación de la Reserva de Contingencia	Consiste en determinar los fondos o tiempos adicionales que se necesitan asignar al proyecto para abordar los riesgos identificados, de acuerdo con su probabilidad e impacto. Su objetivo es mitigar los efectos de la incertidumbre.
X6.4.2 Análisis de Árbol de Decisión (Decision Tree Analysis)	Permite visualizar y evaluar las distintas rutas de acción, considerando sus riesgos, costos y beneficios. Se asignan valores monetarios o de probabilidad a cada rama del árbol para tomar la mejor decisión.
X6.4.3 Técnicas de Estimación Aplicadas a la Probabilidad e Impacto	Incluye métodos para medir cuantitativamente la probabilidad de los riesgos y su posible efecto en los objetivos del proyecto. Se utilizan estimaciones basadas en datos históricos, peritajes de expertos y modelos estadísticos.
X6.4.4 Valor Monetario Esperado (Expected Monetary Value)	Calcula el promedio ponderado de los posibles resultados, multiplicando la probabilidad de ocurrencia de cada riesgo por su impacto monetario. Útil para priorizar riesgos y tomar decisiones con base en criterios de costo-beneficio.
X6.4.5 Análisis FMEA / Árbol de Fallas (FMEA/Fault Tree Analysis)	El FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) identifica modos de falla potenciales y sus efectos, mientras que el Árbol de Fallas rastrea las causas raíz de un posible evento adverso. Ayuda a evaluar y mitigar riesgos críticos.
X6.4.6 Simulación Monte Carlo	Emplea iteraciones numéricas aleatorias para modelar la incertidumbre en costos, tiempos o cualquier variable de riesgo. Genera distribuciones de probabilidad que facilitan estimar la dispersión y la probabilidad de exceder valores.
X6.4.7 PERT (Técnica de Evaluación y Revisión de Programas)	Usa estimaciones optimistas, pesimistas y más probables para cada actividad, calculando una duración promedio ponderada. Facilita la identificación de la ruta crítica y la asignación de reservas de tiempo.

La AACE International (Association for the Advancement of Cost Engineering) cuenta con varios Recommended Practices (RP) donde se describen técnicas cuantitativas de análisis

de riesgos, alineadas con métodos como Monte Carlo, Análisis de Árbol de Decisión, Valor Monetario Esperado (EMV), entre otros.

2.3 Marco legal

2.3.1 Marco legal en Perú sobre gestión de riesgos

La ejecución de obras públicas en Perú requiere lineamientos legislativos para regular las contrataciones con el Estado. La Ley N.º 30225 establece normas para optimizar el uso de recursos públicos en la contratación de obras, servicios y bienes, mejorando su calidad y costo. Su reglamento complementario impone obligaciones como la identificación y análisis de riesgos en la elaboración de expedientes técnicos y la presentación de reportes semanales sobre riesgos durante la ejecución de la obra, tarea asignada al supervisor contratado por el Estado (Congreso de la República, 2014).

La Ley N.º 32069 y su Reglamento, vigentes desde abril de 2025, establecen que las entidades contratantes deben implementar una gestión integral de riesgos en todas las etapas de las contrataciones públicas. Esto implica identificar, analizar, valorar, gestionar, controlar y monitorear los riesgos asociados a la adquisición de bienes, servicios y obras, con el objetivo de maximizar las oportunidades y minimizar las amenazas que puedan afectar el cumplimiento de los fines públicos. Además, para obras cuyo valor supere los 50 millones de soles, es obligatorio conformar un Comité de Riesgos encargado de supervisar y asegurar la correcta aplicación de estas prácticas de gestión de riesgos.

La ley especifica que las entidades contratantes deben realizar la gestión de riesgos "a fin de aumentar la probabilidad y el impacto de riesgos positivos y disminuir la probabilidad y el impacto de riesgos negativos, que puedan afectar el cumplimiento de la finalidad pública buscada". Asimismo, se establece que los contratos regulados por la ley incluirán obligatoriamente una cláusula de "gestión de riesgos".

En relación al Comité de Riesgos, la normativa indica que, en proyectos de obra cuyo monto sea superior a 50 millones de soles, se deberá conformar un comité especializado responsable de supervisar la correcta aplicación de las prácticas de gestión de riesgos durante todo el proceso de contratación.

2.3.2 Marco legal en Brasil

El primer elemento relevante es la obligatoriedad de la cuantificación de riesgos establecida en la Ley n.º 14.133/2021, la cual regula las contrataciones públicas en Brasil. Esta normativa indica que, para obras y servicios de gran envergadura, o cuando se apliquen regímenes de contratación integrada y semi-integrada, resulta esencial cuantificar los riesgos y reflejarlos en una matriz de asignación entre el ente contratante y el contratista. En este sentido, el Artículo 22, §3º, señala que “(...) o edital contemplará obrigatoriamente matriz de alocação de riscos (...)”, y el Artículo 103, §3º, enfatiza que “a alocação dos riscos contratuais SERÁ QUANTIFICADA para fins de projeção dos reflexos de seus custos no valor estimado da contratação”.

Por otra parte, la ley también menciona la posibilidad de adoptar “métodos y estándares usualmente utilizados por entidades públicas y privadas” para la identificación, asignación y cuantificación financiera de los riesgos, según lo dispuesto en el Artículo 103, §6º. Esto se traduce en la facultad de las entidades para emplear procedimientos o protocolos de gestión de riesgos que sean reconocidos en el ámbito gubernamental o privado, siempre y cuando cumplan con los criterios mínimos de rigor y validez.

Asimismo, la normativa establece que el cálculo del valor estimado de la contratación puede incluir una “tasa de riesgo” compatible con el objeto de la licitación y con los riesgos asignados al contratista, según una metodología previamente definida. El Artículo 22, §4º, indica que “(...) o valor estimado da contratação poderá considerar taxa de risco compatível

com o objeto da licitação e com os riscos atribuídos ao contratado (...)”. Este enfoque obliga a proyectar los posibles impactos financieros de los riesgos asignados a cada parte, haciendo más transparente y realista la determinación del presupuesto de la obra.

En consecuencia, aquellas entidades públicas que aún no cuenten con un método establecido para cuantificar los riesgos en sus procesos de contratación se ven en la obligación de adaptarse con prontitud. La ley impone la necesidad de crear o adoptar procedimientos que permitan estimar el impacto financiero de los eventos inciertos que podrían ocurrir durante la ejecución de las obras. De esta manera, la normativa promueve la incorporación de técnicas y modelos cuantitativos en la etapa de planificación y licitación, contribuyendo a una mayor transparencia, control de costos y previsión de contingencias a lo largo del ciclo de vida del proyecto.

Este marco legal evidencia la importancia de la cuantificación financiera de los riesgos en la planificación y ejecución de obras públicas en Brasil. La existencia de una matriz de asignación de riesgos obliga a incorporar métodos cuantitativos, lo cual reduce la incertidumbre y facilita el control sobre las desviaciones presupuestarias. Para las entidades que no dispongan de protocolos formales de cuantificación, la ley demanda el uso de modelos o metodologías reconocidas, con el fin de garantizar la adecuada estimación del valor de la contratación y la asignación clara de los riesgos entre las partes involucradas.

2.3.3 Marco legal en Chile

En Chile, no existe actualmente una ley única y explícita que obligue a las entidades públicas a cuantificar los riesgos de manera similar a lo que ocurre en Brasil bajo la Ley n.º 14.133/2021. Sin embargo, se han desarrollado distintos instrumentos y lineamientos sectoriales que incorporan, de forma general o específica, la gestión y asignación de riesgos en proyectos de infraestructura. Uno de los principales marcos regulatorios es el sistema de

concesiones de obras públicas, regulado a través de la Ley de Concesiones de Obras Públicas (Ley N.º 21.044, que actualiza el Decreto con Fuerza de Ley N.º 164 de 1991). Aunque esta normativa no detalla de forma exhaustiva la obligatoriedad de un análisis cuantitativo de riesgos, sí establece la importancia de identificar y asignar riesgos entre el Estado y los concesionarios. En la elaboración de los contratos de concesión, se determinan las responsabilidades y posibles eventos que podrían afectar los costos y la continuidad de la obra, lo que permite incorporar metodologías de evaluación de riesgos, sin imponer una metodología cuantitativa obligatoria.

Por otra parte, el Ministerio de Obras Públicas (MOP), a través de la Coordinación de Concesiones y otras direcciones, ha emitido manuales y procedimientos técnicos que recomiendan la realización de análisis de riesgos en distintas etapas de los proyectos. Entre estos documentos, se incluyen el Manual de Concesiones, el Manual de Carreteras y diferentes especificaciones que orientan sobre la identificación y gestión de riesgos. Aunque no se exige siempre una cuantificación estricta, dichas guías promueven la utilización de técnicas para estimar la probabilidad y el impacto de eventos adversos, especialmente en la fase de anteproyectos de concesión y en la negociación de contratos. Asimismo, la Ley de Compras Públicas (Ley N.º 19.886) y su reglamento (D.S. N.º 250/2004) regulan la contratación de bienes y servicios del Estado, fomentando la transparencia y eficiencia, pero sin establecer procedimientos obligatorios de análisis cuantitativo de riesgos. La normativa señala la conveniencia de incluir cláusulas y garantías que mitiguen la incertidumbre en contratos relevantes, dejando a criterio de cada entidad el nivel de profundidad en los estudios de riesgos.

A diferencia de Brasil, donde la cuantificación de riesgos y el reflejo de su impacto financiero en el costo de las obras es un mandato legal, en Chile el requerimiento de un análisis riguroso depende del tipo de proyecto, la modalidad de financiamiento y la voluntad de la entidad pública o del concesionario. De este modo, no se cuenta con un cuerpo legal unificado

que exija, de manera taxativa, la cuantificación financiera de los riesgos en todos los contratos de obras públicas. Pese a esta ausencia de un mandato legal específico, se observa una tendencia creciente a incorporar metodologías cuantitativas de análisis de riesgos en proyectos de gran envergadura, impulsada por la experiencia internacional, la necesidad de reducir sobrecostos y las exigencias de organismos financieros o aseguradores. El MOP y las consultoras tienden a adoptar herramientas de simulación y modelos probabilísticos para estimar contingencias, ya sea por buenas prácticas internas o por requisitos de las bases de licitación. De esta forma, la metodología cuantitativa se va abriendo paso en Chile gracias a la búsqueda de mayor eficiencia y a la influencia de estándares internacionales, aunque su aplicación sigue sin estar uniformemente regulada a lo largo de todo el ciclo de contratación pública.

2.4 Marco filosófico

2.4.1 *La ciencia, la ingeniería y su filosofía*

Desde sus inicios, la filosofía ha guiado la búsqueda de respuestas a las grandes preguntas de la vida, inicialmente como fuente primordial para entender los fenómenos naturales, hasta que la ciencia emergió como una disciplina independiente durante la Revolución Científica, marcando un enfoque sistemático y riguroso para desentrañar el mundo natural. A pesar de su distanciamiento de la filosofía, la ciencia sigue dependiendo de esta última para cuestionar sus fundamentos lógicos, epistemológicos y éticos, complementando su capacidad de explicar el "cómo" con reflexiones sobre el "por qué" y el significado de los fenómenos.

Por otro lado, la ingeniería, tradicionalmente vista como una aplicación práctica de la ciencia, ha evolucionado en una disciplina autónoma con su propia metodología, enfocada en la creación de soluciones prácticas y originales que combinan ciencia, creatividad e intuición. Este desarrollo ha dado lugar a la filosofía de la ingeniería, una rama emergente que aborda las

preguntas fundamentales de la disciplina en el contexto del avance tecnológico, análoga a la filosofía de la ciencia pero centrada en las metodologías, los procesos creativos y el impacto social de la ingeniería. La Tabla 7 muestra una comparación entre la filosofía de la ciencia y la ingeniería, lo que nos permite identificar las diferencias y similitudes entre ambas.

Tabla 7.

Diferencias entre filosofía de la ciencia e ingeniería

Aspectos	Filosofía de la ciencia	Filosofía de la Ingeniería
Métodos	La ciencia se basa en la observación, experimentación y análisis para entender el mundo natural. Utiliza el método científico, que incluye la formulación de hipótesis, la recopilación de datos a través de la experimentación y el ajuste o rechazo de las hipótesis basado en los resultados experimentales.	La ingeniería se basa en la aplicación de principios científicos y matemáticos para resolver problemas prácticos. Utiliza el proceso de diseño de ingeniería, que incluye la identificación de problemas, la generación de posibles soluciones, la construcción y prueba de prototipos y la implementación de la solución final.
Desafíos	Incluyen la incertidumbre inherente a la investigación, la necesidad de financiación para experimentación y la comunicación de hallazgos complejos a una audiencia no científica.	Incluyen la necesidad de equilibrar múltiples factores en el diseño, como costo, funcionalidad, seguridad y sostenibilidad, así como la gestión de proyectos a gran escala y la coordinación de equipos de trabajo.
Cuestiones éticas	Incluyen la honestidad en la presentación de datos, la protección de sujetos humanos o animales en experimentos, y las implicaciones de la investigación científica en áreas controvertidas.	Pueden incluir la seguridad del público y del medio ambiente, la responsabilidad en el diseño y construcción de estructuras y productos, la sostenibilidad y la justicia social, y las implicaciones de las tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial.

Aunque la filosofía de la ciencia puede ayudar a responder valiosas interrogantes sobre cómo la ciencia explica los fenómenos de la naturaleza y si sus métodos son válidos, en ingeniería se dan origen a otras cuestiones filosóficas relevantes y que, en el marco de la presente

investigación, resultan de fundamental importancia. ¿Cómo se toman las decisiones en ingeniería?, ¿qué tipo de conocimiento se utilizan?, ¿cómo se genera, utiliza y comparte ese conocimiento?, ¿cuáles son las responsabilidades éticas de los ingenieros? y, ¿cómo pueden los ingenieros tomar decisiones éticas en situaciones que pueden ser técnicamente complejas, inciertas y socialmente ambiguas?

2.4.2 Cuestiones filosóficas respecto a la gestión de riesgos

La gestión de riesgos, fundamental en múltiples disciplinas, plantea interrogantes epistemológicas y filosóficas clave, como la definición y cuantificación del riesgo, especialmente bajo condiciones de incertidumbre y datos limitados. Estas cuestiones están intrínsecamente relacionadas con conceptos como probabilidad, incertidumbre e ignorancia, desafiando nuestra capacidad para evaluar y gestionar riesgos de manera efectiva. Además, la valoración del riesgo implica juicios éticos y técnicos sobre qué niveles de riesgo son aceptables, mientras que la comunicación adecuada del riesgo es esencial para influir en la percepción y la toma de decisiones.

La toma de decisiones bajo condiciones de incertidumbre requiere no solo herramientas técnicas, sino también un enfoque reflexivo que integre lógica y epistemología para superar las limitaciones del conocimiento humano. Investigaciones recientes, como en proyectos de infraestructuras viales frente a inundaciones (Ariza Flores et al., 2024), destacan la importancia de estrategias adaptativas y la integración de conceptos epistemológicos para mejorar la toma de decisiones informadas, subrayando la necesidad de combinar análisis técnico y reflexión crítica en la gestión de riesgos.

III. MÉTODO

3.1 Tipo de investigación

La investigación científica a diferencia de otros tipos de investigaciones es llevada cabo con procesos más ordenados, sistematizados y rigurosos (Hernández Sampieri et al., 2014; Hernández Sampieri & Mendoza Torres, 2018). De acuerdo con el tipo de estudio que se pretende abordar en la presente investigación en la cual se desarrolla una metodología de gestión de riesgos basada en técnicas analíticas y cuantitativas a implementarse en proyectos de construcción, se reconoce que ésta corresponde a investigación aplicada. asumimos que, por el propósito del estudio, la investigación es aplicada.

Esta investigación, de enfoque cuantitativo y diseño correlacional, busca medir numéricamente la relación entre la implementación de una metodología de análisis cuantitativo de riesgos y los resultados en la gestión de riesgos en proyectos de construcción, utilizando análisis estadísticos para evaluar su efectividad en aspectos como la reducción de riesgos y la mejora en la eficiencia de recursos. Además, se empleará un diseño longitudinal que permitirá analizar el impacto de la metodología a lo largo del tiempo y en diferentes etapas de los proyectos, comparándola con metodologías existentes.

El estudio sigue el método hipotético-deductivo, partiendo de la observación de desafíos en la gestión de riesgos en proyectos viales y planteando hipótesis sobre la optimización de indicadores mediante el análisis cuantitativo. Los datos empíricos recopilados permitirán evaluar, corroborar o refutar estas hipótesis, proporcionando evidencia del valor de la metodología propuesta, aunque sin establecer causalidad, lo que podría explorarse en investigaciones futuras con enfoques experimentales complementarios.

3.2 Población y muestra

La población es un conjunto de individuos, objetos o eventos sobre los cuales se quiere obtener información o realizar un estudio. La muestra, por otro lado, es un subconjunto representativo de la población. El objetivo de seleccionar una muestra es representar a la población y obtener información sobre ella sin tener que evaluar a todos los individuos de la población. Para el caso de la red vial nacional, el Ministerio de Transportes cuenta con una base de datos de la red vial, extensión y características que forma parte del Anexo II de la presente investigación. El detalle de la red se muestra en la Tabla 8 según el MTC (2025)

Tabla 8

Red Vial Nacional Peruana

SUPERFICIE RODADURA	Definitiva - No concesionada	Definitiva - Concesionada	Definitiva - Total	Definitiva - %	Temporal - RNT	Temporal - %	TOTAL	TOTAL - %	TOTAL PVN	TOTAL PVN - %
Pavimentado	16112	6759	22871	83	1427	69	24298	82	17539	77
Asfaltado	8830	6622	15451	56	160	8	15611	53	8990	39
Solución Básica	7283	137	7420	27	1267	61	8686	29	8549	37
No Pavimentado	4648	6	4654	17	646	31	5300	18	5294	23
Afirmado	2722	6	2728	10	552	27	3280	11	3274	14
Sin Afirmar	714		714	3	42	2	763	3	763	3
Trocha	1212		1212	4	45	2	1257	4	1257	6
Proyectada					110		2035		2035	
TOTAL (Km)	22686	6765	29451		2182		31633		24868	100

La población está determinada por toda la red vial nacional. La red vial nacional de Perú cuenta con una extensión aproximada de 23,687 kilómetros, de los cuales 22,623 kilómetros están pavimentados, lo que representa alrededor del 83.7% de la red total. Esta infraestructura es fundamental para la conectividad del país, especialmente en proyectos viales como la Carretera Central, que desempeña un papel clave en la integración de las regiones andinas y costeras.

El muestreo será no probabilístico y seleccionado a conveniencia. A forma de referencia, para un muestreo estratificado y un muestreo por conglomerados con una población de 23,687 kilómetros, considerando un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%, se necesitaría una muestra de aproximadamente 378 kilómetros en ambos casos, utilizando la siguiente formula:

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{e^2 \cdot (N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot (1 - p)}$$

Donde:

N : es el tamaño de la población (total de la red vial),

Z es el valor correspondiente al nivel de confianza (por ejemplo, 1.96 para el 95%),

p es la proporción estimada de la población que tiene la característica de interés (usualmente 0.5 si no se tiene certeza),

Para ello, se tomarán tres carreteras como ejemplo con sus respectivas extensiones: Nueva Carretera Central (185 km de extensión), Carretera Oyón Ambo (150 kms de extensión) y Carretera Combapata en Cusco (23 km).

3.3 Operacionalización de variables

TITULO: METODOLOGÍA DE ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS PARA OPTIMIZAR LA ESTIMACIÓN DE COSTOS Y TIEMPOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS EN PERÚ

Tabla 9. Matriz de Operacionalización de las variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Índice	Escala y Valores	Niveles y Rango	Metodología
V1: Metodología de Análisis Cuantitativo de Riesgos	Conjunto de técnicas y procedimientos sistemáticos para identificar y cuantificar riesgos usando modelos matemáticos y estadísticos (Buchtik, 2012)	Aplicación de fichas de recolección de datos para cuantificar riesgos en proyectos de carreteras en Perú.	1. Técnicas de Análisis Cuantitativo	1.1 Cantidad de técnicas	Nivel de implementación	Escala ordinal (1-5)	Ver niveles detallados en cada dimensión	Evaluación documental, análisis de modelos, entrevistas
			2. Modelos Matemáticos	2.1 Cantidad de modelos matemáticos	Número y adecuación de distribuciones utilizadas	Escala ordinal (1-5)		
			3. Modelos Estadísticos	3.1 Cantidad de modelos estadísticos	Numero de modelos estadísticos	Escala ordinal (1-5)		
V2: Estimación de Costos y Plazos	Proceso de determinación de recursos financieros y tiempo necesario, considerando riesgos e incertidumbres (Ramos, 2003)	Medición a través del control de contingencias financieras y gestión de reservas de tiempo en proyectos de carreteras en Perú.	1. Control de Contingencias Financieras	1.1 Nivel de confianza del presupuesto	Porcentaje de variación costo estimado vs real	Escala porcentual (%)	Niveles detallados en cada dimensión	Comparación de estimaciones vs resultados reales, análisis financiero y de cronograma
				1.2 Contingencia presupuestaria adecuada	Porcentaje de contingencia asignada	Valor numérico (S/.)		
			2. Gestión de Reservas de Tiempo	2.1 Nivel de confianza del cronograma	Porcentaje de variación plazo estimado vs real	Escala porcentual (%)		
				2.2 Contingencia de cronograma adecuada	Días o porcentaje de reserva de tiempo	Valor numérico (días o %)		

3.4 Instrumentos

La investigación utilizará diversos instrumentos para recopilar, analizar y evaluar datos relacionados con los riesgos en proyectos viales. Uno de los instrumentos principales será la ficha de recolección de datos. Este instrumento garantizará su validez de contenido mediante revisiones exhaustivas que aseguren la inclusión de todos los aspectos clave del análisis cuantitativo de riesgos, como costos, plazos y eventos imprevistos. La validez de criterio será evaluada correlacionando los resultados de la ficha con metodologías validadas como la simulación de Monte Carlo, mientras que la validez de constructo será confirmada mediante análisis factoriales para verificar la congruencia de los ítems con los subconstructos esperados. Asimismo, la confiabilidad se medirá a través del coeficiente Alfa de Cronbach para garantizar la consistencia interna, y se analizarán las valideces convergente y discriminante para asegurar que la ficha se enfoque exclusivamente en el análisis cuantitativo de riesgos.

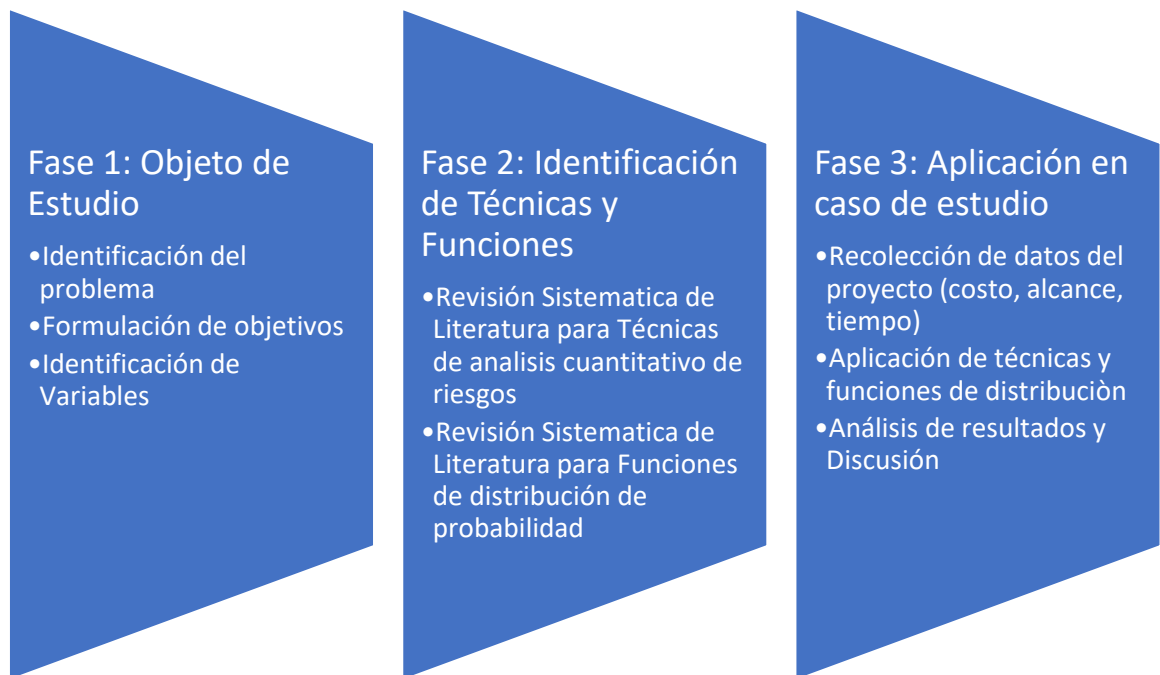
Otro instrumento será la revisión documental, que recopilará información de fuentes secundarias como informes, artículos académicos y normativas vigentes. Este instrumento asegurará la validez de contenido seleccionando documentos clave y actualizados que aborden aspectos relevantes de la gestión de riesgos en proyectos viales. La validez de criterio se evaluará comparando los hallazgos de la revisión con estudios previos y datos empíricos, mientras que la validez de constructo será comprobada mediante la categorización de riesgos en subconstructos teóricos relacionados con los desafíos específicos del sector vial. La confiabilidad de este instrumento se garantizará mediante un proceso replicable de selección y análisis de documentos, reforzado por la consistencia de hallazgos en múltiples fuentes. Además, las valideces convergente y discriminante se analizarán asegurando que los documentos revisados refuercen otros métodos de análisis de riesgos y se enfoquen

exclusivamente en el contexto vial, excluyendo riesgos de sectores no relacionados como minería o edificación.

3.5 Procedimientos

La metodología de la tesis doctoral, que se muestra en la Figura 2, se estructura en tres etapas principales. En la primera etapa, se define el objeto de estudio mediante la identificación del problema de investigación, la formulación de objetivos e hipótesis, y la identificación de variables. Luego, se evalúa si el estudio aporta novedad científica; en caso contrario, se replantean los objetivos y la hipótesis. La segunda etapa comprende la identificación y selección de técnicas de análisis cuantitativo de riesgos (QAT) y funciones de distribución de probabilidad (PDF) mediante una revisión sistemática de literatura académica y técnica en bases de datos indexadas (Scopus, WoS y ProQuest), así como en libros, manuales y fuentes no académicas. Esta etapa incluye además consultas a expertos para validar y complementar las técnicas y distribuciones seleccionadas, así como el desarrollo y aplicación de un piloto mediante encuestas, cuyos resultados son analizados estadísticamente para validar la relevancia de los QAT y PDF elegidos. Una vez confirmados, se formula el método de análisis cuantitativo de riesgos. En la tercera etapa, se aplica el método en tres estudios de caso reales, iniciando con la recolección de datos del proyecto (CAPEX/OPEX, cronograma y matriz de riesgos). Posteriormente, se ejecutan simulaciones estocásticas mediante la Simulación de Monte Carlo para la estimación de costos y el Schedule Risk Analysis para la estimación del tiempo. Finalmente, se realiza un análisis de sensibilidad con diagramas de tornado, seguido de la discusión de resultados y la presentación de conclusiones y recomendaciones. Esta metodología busca ser rigurosa, pero a la vez accesible, permitiendo su aplicación práctica en contextos con limitada experiencia en análisis cuantitativo de riesgos.

Figura 2.
Esquema de investigación de la tesis doctoral



3.6 Análisis de datos

3.6.1 Técnicas de Análisis Cuantitativo de riesgos

Uno de los primeros aspectos relevantes es identificar cuáles serán las técnicas de análisis cuantitativo de riesgos. Diversas investigaciones han probado la aplicación de un sinnúmero de técnicas cuantitativas de riesgos. Técnicas como la Simulación Monte Carlo, el Valor Monetario Esperado son las más conocidas. Sin embargo, las técnicas de análisis cuantitativos que se utilicen corresponden a herramientas de mayor utilización por los profesionales. El PMI (2019), en la Guía Estándar de Gestión de Riesgos propuso una amplia lista de técnicas; sin embargo, se busca las técnicas mayormente utilizadas en el campo de la construcción en general.

Para lograr esta identificación se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura existente identificando. Las fuentes de datos utilizadas para la revisión sistemática incluyen las

bases de datos electrónicas Scopus, Web of Science y ProQuest, las cuales se especializan en cubrir áreas clave como la construcción, la ingeniería y la seguridad. Estas plataformas fueron seleccionadas debido a su amplia cobertura de publicaciones relevantes en los temas abordados.

La estrategia de búsqueda para esta revisión sistemática se diseñó siguiendo un enfoque estructurado. En primer lugar, se identificaron los términos clave y sus sinónimos relacionados con accidentes en la construcción, análisis de riesgos y métodos cuantitativos. Este paso fue crucial para garantizar que los términos seleccionados abarquen de manera integral los conceptos necesarios para el análisis.

En segundo lugar, los términos clave y sus sinónimos fueron combinados mediante el uso de operadores booleanos (AND, OR y NOT) y truncamientos. Esto permitió construir cadenas de búsqueda completas y precisas, diseñadas para capturar un amplio espectro de publicaciones pertinentes sin perder sensibilidad en los resultados.

Finalmente, las cadenas de búsqueda específicas para cada base de datos, junto con las combinaciones booleanas aplicadas, se detallan en la Tabla 10, lo que facilita la replicabilidad del proceso de búsqueda. Asimismo, la Tabla 11 muestra los resultados de dicha búsqueda.

Tabla 10

Conectores booleanos aplicados para la búsqueda de técnicas cuantitativas de riesgos

Base de Datos	Cadena de Búsqueda
Scopus	TITLE-ABS-KEY ("construction*" OR "building*" OR "project*") AND TITLE-ABS-KEY ("cost*" OR "time*" OR "optimization*" OR "budget*") AND TITLE-ABS-KEY ("risk*" OR "hazard*" OR "danger*") AND TITLE-ABS-KEY ("analysis*" OR "assessment*" OR "evaluation*" OR "measurement*" OR "prediction*" OR "optimization*") AND TITLE-ABS-KEY ("quantitative*" OR "statistical*" OR "mathematical*" OR "simulation*" OR "artificial intelligence*") AND TITLE-ABS-KEY ("method*" OR "model*" OR "technique*" OR "tool*")
Web of Science	TS=("construction*" OR "building*" OR "project*") AND TITLE-ABS-KEY ("cost*" OR "time*" OR "optimization*" OR "budget*") AND TS=("risk*" OR "hazard*" OR "danger*") AND TS=("analysis*" OR "assessment*" OR "evaluation*" OR "measurement*" OR "prediction*" OR "optimization*") AND TS=("quantitative*" OR "statistical*" OR "mathematical*" OR "simulation*" OR "artificial intelligence*") AND TS=("method*" OR "model*" OR "technique*" OR "tool*")
ProQuest	AB("construction*" OR "building*" OR "project*") AND TITLE-ABS-KEY ("cost*" OR "time*" OR "optimization*" OR "budget*") AND ("risk*" OR "hazard*" OR "danger*") AND ("analysis*" OR "assessment*" OR "evaluation*" OR "measurement*" OR "prediction*" OR "optimization*") AND ("quantitative*" OR "statistical*" OR "mathematical*" OR "simulation*" OR "artificial intelligence*") AND ("method*" OR "model*" OR "technique*" OR "tool*")

Tabla 11*Identificación de técnicas cuantitativas más utilizados*

Categoría	Técnica de Análisis Cuantitativo	¿Recomendado por PMI?	# artículos	Mayor Uso Identificado	Fuentes
Análisis Estadístico	Estimación de Reserva de Contingencia	Sí	12	En análisis de riesgos en seguridad y salud ocupacional debido a las exigencias regulatorias internacionales de presentar estadísticas de accidentes.	(Chen et al., 2022; Hwang et al., 2023; Jeong & Jeong, 2021, 2022; Lee et al., 2022; Lu et al., 2021; Oguz Erkal et al., 2021; Santiago Oliveira et al., 2023; Selleck et al., 2023; Won et al., 2024; Xu & Zou, 2021; Zermane et al., 2023)
	Análisis de correlación	No			
Modelamiento Matemático	Análisis mediante Árbol de Decisiones	Sí		Son los métodos más utilizados	
	Valor Monetario Esperado	Sí	4	aunque pueden estar sujetos a subjetividad porque estas técnicas podrían trabajar con valores estimados; sin embargo, el juicio experto puede minimizar el sesgo.	(Małysa, 2023; Won et al., 2024; Zaneldin & Ahmed, 2024; Zermane et al., 2023)
	Análisis de Árbol de Fallas	Sí			
Simulación	Simulación Monte Carlos	Sí		Son los métodos más utilizados por especialistas sin embargo, requieren una base sólida de conocimientos en estadística,	(Bukaçi et al., 2016; Gleißner & Wolfrum, 2019; Kang et al., 2023; Koulinas et al., 2021; Montufar Benítez et al., 2024)(Fitzsimm
	PERT	Sí	9		
	Simulación de Eventos Discretos				
	Schedule Risk Analysis	No			

Inteligencia Artificial				probabilidad así como contar con información de las variables que generan incertidumbre en el modelo.	ons et al., 2022; Kostrzewa-Demczuk & Rogalska, 2023; Ökmen & Öztaş, 2008; Sackey & Kim, 2019)
	Machine Learning (Random Forest, XGBoost, etc.)	No	19	Mayoritariamente en costos que, en tiempos, pero se requiere gran volumen de información.	(Abd et al., 2024; Amicosante et al., 2025; Anjum et al., 2024; Elfaki et al., 2014; Ghadbhan Abed et al., 2022; Hamdy et al., 2024; He et al., 2011; Helaly et al., 2025; Jiang, 2019; Kang et al., 2023; Koc, 2023; Moussa et al., 2024; Pham et al., 2023; Ruiz et al., 2025; salama, 2025; Tayefeh Hashemi et al., 2020; Turkyilmaz & Polat, 2024; Yuan & Yin, 2023; Yun, 2022)
	Algoritmos de Optimización	No			
	Deep Learning	No			

3.6.2 Funciones de distribución de probabilidad

Las funciones de distribución de probabilidad o *probability distribution function (PDF)* desempeñan un papel crucial en el análisis de datos, la evaluación de riesgos y el modelado de confiabilidad en varios campos. Proporcionan una base teórica para describir las características de los datos y permiten el análisis cuantitativo y la predicción (Li, 2024). Los modelos más utilizados corresponden la distribución Normal, la distribución Pert (o Beta Pert) y la

Distribución Triangular. Estas dos últimas se guían del modelo de tres puntos ampliamente estudiado por (Keefer, 1994; Keefer & Bodily, 1983).

En la práctica, se utilizan comúnmente diferentes distribuciones, como la normal, la log-normal, la uniforme, la exponencial y la de Weibull, cada una identificada por parámetros específicos (Putcha et al., 2021). Estas funciones son particularmente valiosas para modelar conjuntos de datos sesgados y evaluar eventos extremos en el análisis de riesgo actuarial (Hamedani et al., 2023). En el contexto de los sistemas de energía, las funciones de distribución de probabilidad se emplean para evaluar el desempeño de la confiabilidad, utilizando índices como la frecuencia y duración promedio de las interrupciones del sistema (Mohd Fauzi et al., 2023). La selección y aplicación de funciones de distribución de probabilidad apropiadas puede mejorar significativamente la precisión y la eficiencia del análisis de datos, ofreciendo un valioso apoyo para los procesos de toma de decisiones en todas las disciplinas (Bosch-Badia et al., 2020). Todo lo anterior, permite vislumbrar que existen muchas funciones de distribución de probabilidad cada una de ellas, apropiadas para diferentes usos y campos. Recae entonces la necesidad de identificar las funciones de distribución de probabilidad adecuadas para los fines de la presente investigación.

Para identificar las funciones de distribución de probabilidad más utilizadas en la estimación de costos y tiempos en proyectos viales, se realizó una búsqueda que combinó literatura de sectores afines y fuentes no académicas, incluyendo manuales técnicos, informes de consultoras y tesis especializadas. Este proceso permitió mapear las referencias a distribuciones como la normal, triangular, beta PERT, lognormal y uniforme, así como la justificación y frecuencia de uso en diferentes contextos de ingeniería civil y gestión de proyectos. De manera complementaria, se analizó la documentación y guías de herramientas de software (por ejemplo, @RISK, Crystal Ball, Safran Risk, Oracle Primavera Risk Analysis),

para entender cómo se implementan estas distribuciones en la práctica y cuáles se recomiendan con mayor frecuencia según la disponibilidad de datos y el tipo de riesgo (costos o plazos).

Finalmente, se trianguló la información proveniente de dichas fuentes para identificar los criterios que explican la selección de cada función de distribución y su aplicabilidad en la construcción de carreteras. Este enfoque permitió superar la escasez de literatura académica estrictamente enfocada en el sector vial, al incorporar la evidencia procedente de otros ámbitos de ingeniería, la experiencia recogida en manuales de software y la revisión de casos prácticos documentados. La Tabla 12 muestra los criterios utilizados para la triangular de la información.

Tabla 12

Proceso para la identificación de funciones de Distribución de Probabilidad

Etapas	Acciones Principales
1. Revisión de Literatura	- Búsqueda en bases académicas (libros de especialistas afines a la ingeniería y/o construcción).
2. Fuentes No Académicas	- Consulta de manuales técnicos, informes de consultoras y tesis. - Análisis de guías profesionales y casos prácticos de proyectos viales.
3. Análisis de Software Especializado	- Revisión de documentación (@RISK, Crystal Ball, Safran, Primavera). - Registro de librerías y recomendaciones para costos y tiempos.
4. Triangulación de Información	- Comparación de hallazgos (literatura, práctica, software). - Selección de funciones de distribución más relevantes y justificación de su uso.

Los resultados de la búsqueda bajo el criterio mixto indican los siguientes usos mostrados en la Tabla 13.

Tabla 13

Identificación de PDF más utilizados

Función de Distribución	Tipo de Uso	Número de Fuentes	Fuentes
Normal o Gaussiana	Para modelar variables que se concentran alrededor de un valor promedio, como los costos estimados o tiempos de ejecución con variaciones simétricas	8	Manuales Técnicos: AACE International (RP 42R-08, RP 57R-09) NASA Cost Estimating Handbook (2015) Libros académicos: (Damnjanovic & Reinschmidt, 2020; Hofstadler & Kummer, 2017) Guía de Software: (Palisade, 2020)
Triangular	Común en la estimación de riesgos donde se conoce el valor mínimo, el máximo y el más probable, pero no se cuenta con muchos datos históricos.	8	Manuales Técnicos: - PMI (PMBOK® Guide) - AACE International (RP 17R-97) Libros académicos:(Damnjanovic & Reinschmidt, 2020; Hofstadler & Kummer, 2017) Guía de Software: (Oracle, 2025; Palisade, 2020; Safran, 2024)
Beta PERT	Ideal para modelar incertidumbres en proyectos, ya que utiliza un enfoque similar al de la distribución triangular, pero con mayor suavidad en los extremos.	8	Manuales Técnicos: - PMI (PMBOK® Guide, menciona PERT para estimación de tiempos) Libros académicos: (Damnjanovic & Reinschmidt, 2020; Hofstadler & Kummer, 2017) Guía de Software: (Oracle, 2025; Palisade, 2020; Safran, 2024)
Uniforme	Utilizada cuando todos los valores dentro de un rango tienen la misma probabilidad de ocurrir, típicamente para modelar riesgos con información limitada.	6	Manuales Técnicos: - NASA Cost Estimating Handbook (2015) - AACE (mencionado en discusiones de RP de Cost/Risk) Libros académicos: (Hofstadler & Kummer, 2017) Guía de Software: (Oracle, 2025; Palisade, 2020)

LogNormal	Empleada para variables que no pueden tomar valores negativos, como costos o duraciones, y que tienen una distribución sesgada hacia valores mayores.	5	Manuales Técnicos: - AACE International (RP 42R-08) Libros académicos: Guía de Software:(Safran, 2024)
Poisson	Para eventos discretos como ocurrencias de accidentes o interrupciones	5	Manuales Técnicos: - NASA Cost Estimating Handbook (2015) - AACE, en referencias a conteo de eventos Libros académicos: (Damjanovic & Reinschmidt, 2020) Guía de Software: (Palisade, 2020; Safran, 2024)
Ajuste de Distribución	Para modelar cuando existe una considerable cantidad de información del proyecto y se sospecha que las funciones tradicionales no se ajustan	3	Manuales Técnicos: - AACE International (Discusión en RP sobre fitting de distribuciones) Libros académicos: Guía de Software: (Palisade, 2020)

3.6.3 *Primer Caso de Estudio: Nueva Carretera Central*

La nueva Carretera Central es un proyecto de gran envergadura impulsado por el gobierno peruano para optimizar la conexión entre Lima y la región central del país. Con el paso de los años, la antigua Carretera Central se ha visto congestionada por el crecimiento del tráfico y la intensa actividad comercial, lo que ha generado la necesidad de una vía más moderna, segura y eficiente que facilite el tránsito de personas y mercancías hacia los departamentos de Junín, Pasco, Huancavelica y otras zonas del centro del Perú.

De acuerdo con la información disponible públicamente, la futura vía tendrá una extensión aproximada de 185 kilómetros, partiendo desde la zona de Chacabayo (al este de Lima) hasta la localidad de La Oroya, en la región Junín. A lo largo de su recorrido, se contemplan varios tramos de doble calzada y la construcción de numerosos puentes y viaductos

para sortear la compleja geografía andina. Además, el proyecto incluye la edificación de túneles estratégicamente ubicados, cuyo objetivo principal es reducir los desniveles más pronunciados y minimizar los riesgos de accidentes en zonas de alta sinuosidad.

La inversión estimada para esta megaobra asciende a aproximadamente 6 mil millones de dólares (cifra que puede variar según los estudios definitivos y los costos de materiales y mano de obra). Este presupuesto cubrirá las etapas de diseño, construcción y la implementación de sistemas de señalización y seguridad vial. Asimismo, se tiene proyectada una duración de ejecución de entre cinco y seis años, plazo que responde a la complejidad técnica y geográfica de la zona, así como a la necesidad de realizar estudios de impacto ambiental y social antes de cada fase constructiva.

El proyecto consiste, de manera integral, en el mejoramiento y ampliación de la infraestructura vial para agilizar el transporte terrestre, tanto de carga como de pasajeros. Entre sus características más destacadas se incluyen carriles adicionales para separar el tránsito de vehículos ligeros y pesados, áreas de descanso, sistemas de iluminación en túneles, señalética actualizada y sistemas de peaje automatizados. Todo ello busca reducir significativamente el tiempo de viaje entre Lima y las regiones del centro, pasando de un promedio de siete u ocho horas a cerca de la mitad, contribuyendo así al desarrollo económico y turístico de estas zonas.

La Tabla 14 muestra las características técnicas principales de la Nueva Carretera Central y que son datos relevantes que sirven como base para la estimación de costos y tiempos. Toda la información reportada proviene de los portales de Transparencia e información pública del Estado Peruano.

Tabla 14*Características técnicas principales de la Nueva Carretera Central*

Característica	Resultado
Nombre	Nueva Carretera Central
Extensión	185 kms
Costo Estimado	S/.24'365,000,000 (Soles)
Tiempo de Ejecución estimado	5 años.
Entidad a cargo del Proyecto	Provias Nacional
Tipo de Contrato	Gobierno a Gobierno

3.6.4 Segundo Caso de Estudio: Carretera Oyon Ambo

La Carretera Oyon-Ambo es un importante proyecto de integración vial impulsado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) del Perú, que conecta de forma más ágil y segura la zona norte de la región Lima con la región Huánuco. Esta vía, concebida como parte del gran corredor vial de la Sierra Central, inicia en la localidad de Oyon (provincia de Oyon, región Lima) y se extiende hasta la ciudad de Ambo (provincia de Ambo, región Huánuco), atravesando zonas de geografía compleja y elevadas altitudes en la cordillera andina.

Con una longitud aproximada que supera los 140 kilómetros, la Carretera Oyon-Ambo contempla obras de mejoramiento y ampliación de calzadas, así como la construcción de puentes y túneles necesarios para sortear la accidentada geografía. Se proyectan tramos de doble carril en las zonas de mayor tránsito, junto con la implementación de sistemas de drenaje, señalización inteligente y áreas de emergencia. Estas intervenciones buscan mejorar tanto la seguridad vial como la fluidez del tránsito de vehículos ligeros y pesados, reduciendo de manera significativa los tiempos de viaje y potenciando el traslado de mercancías.

La inversión destinada a este proyecto se estima en más de mil millones de soles, monto que incluye los costos de estudios preliminares, obras civiles, supervisión y equipamiento. Parte de este financiamiento proviene de fondos del propio Estado peruano, así como de organismos

nacionales e internacionales que apoyan el desarrollo de la infraestructura vial. El tiempo de ejecución, según los cronogramas oficiales, se extendería entre cuatro y cinco años, periodo en el que se prevén fases de diseño final, remoción de tierras, construcción de puentes y pavimentación total del corredor, además de evaluaciones de impacto ambiental y social para mitigar posibles efectos negativos en las comunidades.

El proyecto en su conjunto apunta a consolidar un corredor estratégico que no solo beneficiará a la población local de Oyón y Ambo, sino que también favorecerá a diversas provincias y distritos aledaños, permitiendo un mayor intercambio comercial y turístico entre Lima, Pasco y Huánuco. De esta manera, se espera que la nueva vía brinde oportunidades de crecimiento económico y desarrollo social, al acercar a productores agrícolas, empresarios y visitantes a mercados y destinos antes de difícil acceso.

3.6.5 Tercer Caso de Estudio: Carretera Local Combapata

El proyecto denominado “Mejoramiento del Camino Vecinal EMP. PE-3S (Combapata) – Huatuccane – Jayunbamba – Pte. Circuito Sallca – EMP. CU-1452 (Cullucyre); EMP. PE-3S – DV. Huantura – Chiara – DV. Laullini – Cullucyre – EMP. CU-1450, Distrito de Combapata – Provincia de Canchis – Departamento de Cusco”, con Código Único de Inversiones (CUI) N.º 2413430, fue declarado viable el 23 de mayo de 2019. Se trata de una iniciativa que busca mejorar la infraestructura vial en la zona andina de la región Cusco, facilitando la comunicación terrestre entre diversos centros poblados y contribuyendo al desarrollo económico y social de las comunidades beneficiadas.

El ámbito del proyecto comprende la rehabilitación y mejoramiento de una red de caminos vecinales que parten de la intersección con la carretera PE-3S (a la altura de Combapata) y recorren sectores como Huatuccane, Jayunbamba, Pte. Circuito Sallca, Cullucyre, Huantura, Chiara, Laullini y otras localidades cercanas. Entre las principales obras

contempladas se incluyen el afirmado o pavimentado de la vía según corresponda, la construcción de muros de contención y cunetas para un mejor drenaje, la señalización vertical y horizontal, y la implementación de medidas de seguridad vial en zonas donde la topografía es más accidentada.

Gracias a estas intervenciones, se espera una disminución significativa en los tiempos de viaje para el transporte de personas y mercancías, así como una reducción de los costos logísticos para los productores agrícolas de la zona. Además, al contar con una infraestructura vial más segura, se promueve el acceso de servicios básicos (educación, salud, comercio) y el fomento de actividades turísticas en la provincia de Canchis, fortaleciendo la economía local y regional.

3.7 Consideraciones éticas

Las consideraciones éticas son cruciales en la investigación de ingeniería, particularmente cuando involucra a sujetos humanos (Sochacka et al., 2018). Los investigadores deben obtener la aprobación de las juntas de revisión ética antes de realizar estudios. En el caso de la presente investigación no se ha recurrido a estudiar con seres humanos, ni tampoco con animales, vegetaciones o especies en extinción. La presente investigación se basa en la búsqueda de mejores prácticas de gestión, lo cual no amerita la validación del comité de ética de la Universidad. Sin embargo, a pesar de que este requisito no se contempla para la presente investigación, se han tomado consideraciones de carácter ético respecto a la información, confidencialidad de los datos recopilados y el impacto social, económico y ambiental que son discutidos en la sección de Discusión de la presente investigación.

La investigación ha garantizado la confidencialidad de los datos recopilados mediante su anonimización y la protección de la identidad de las partes involucradas, además ha

requerido el consentimiento informado de los participantes, quienes han sido informados sobre los objetivos, procedimientos, beneficios, riesgos y su derecho a retirarse sin repercusiones. Se mantuvo la integridad investigativa a través de un diseño y análisis imparciales, citando adecuadamente las fuentes y reportando los resultados con transparencia. Asimismo, se evaluó el impacto social, económico y ambiental de la metodología propuesta, promoviendo su uso responsable y ético en la gestión de riesgos, fomentando la colaboración y minimizando los riesgos en la toma de decisiones.

IV. RESULTADOS

4.1 Optimización de Costos en Tiempos y Carreteras en el Proyecto I

4.1.1 Estimación de Contingencias de costos en el Proyecto I

Para la estimación de contingencias se ha utilizado la estructura de costos proveniente del CAPEX para el Proyecto. En esta estructura de costos divide los nueve tramos del proyecto en función de sus tres principales componentes: Vía principal, compuesto por carreteras; Túneles y Viaductos. Con ello, se procede a mostrar en la Tabla 15 el desglose de los costos para las diferentes versiones del Costo CAPEX

Tabla 15.

Cuadro de Costos según CAPEX del Proyecto I

Ítem	Descripción	Costo a Nivel de Perfil (2023)	Costo a Nivel de Perfil (2024)	Perfil Optimizado (2024)	Trazo Optimizado con Variantes (2024)
1	TRAMO T1	1,238,003,862	1,375,460,586	1,449,250,865	1,449,250,865
1.01	VÍA PRINCIPAL	73,644,620	115,902,693	65,332,734	65,332,734
1.02	TUNELES	1,115,462,464	1,223,301,945	1,251,795,717	1,251,795,717
1.03	VIADUCTOS	48,896,778	36,255,948	132,122,414	132,122,414
2	TRAMO T2	1,478,899,449	2,454,555,567	1,708,203,078	1,708,203,078
2.01	VÍA PRINCIPAL	59,542,444	164,180,073	155,887,196	155,887,196
2.02	TUNELES	960,164,282	1,406,546,820	1,175,959,208	1,175,959,208
2.03	VIADUCTOS	459,192,723	883,828,674	376,356,675	376,356,675
3	TRAMO T3	2,318,511,481	2,502,757,069	2,395,956,030	6,166,446,606
3.01	VÍA PRINCIPAL	395,142,451	479,667,687	517,836,650	2,102,912,412
3.02	TUNELES	406,240,803	550,222,132	988,556,770	2,320,275,454
3.03	VIADUCTOS	1,517,128,227	1,472,867,250	889,562,610	1,743,258,741
4	TRAMO T4	1,561,766,179	2,038,028,869	1,836,950,891	-
4.01	VÍA PRINCIPAL	333,715,067	536,114,663	759,303,703	-
4.02	TUNELES	839,054,825	1,081,755,221	663,723,040	-
4.03	VIADUCTOS	388,996,287	420,158,986	413,924,148	-

5	TRAMO T5	1,598,499,349	1,967,047,547	2,155,060,991	-
5.01	VÍA PRINCIPAL	57,287,774	521,689,767	523,788,950	-
5.02	TUNELES	1,089,247,775	903,288,684	960,674,745	-
5.03	VIADUCTOS	451,963,800	542,069,096	670,597,295	-
6	TRAMO T6A	1,241,488,034	565,391,817	523,451,966	523,451,966
6.01	VÍA PRINCIPAL	1,085,772,134	510,296,433	491,995,289	491,995,289
6.02	TUNELES	89,638,715	55,095,384	-	-
6.03	VIADUCTOS	66,077,185	-	31,456,677	31,456,677
7	TRAMO T6B		735,121,684	779,260,625	779,260,625
7.01	VÍA PRINCIPAL		557,371,082	557,319,663	557,319,663
7.02	TUNELES		62,421,480	-	-
7.03	VIADUCTOS		115,329,121	221,940,961	221,940,961
8	TRAMO T7A	1,958,854,614	1,497,675,758	1,523,440,726	1,534,500,757
8.01	VÍA PRINCIPAL	637,542,884	852,656,966	438,054,512	438,054,512
8.02	TUNELES	805,897,086	350,222,132	971,588,617	982,648,648
8.03	VIADUCTOS	515,414,644	294,796,660	113,797,597	113,797,597
9	TRAMO T7B		714,092,606	649,668,976	649,651,113
9.01	VÍA PRINCIPAL		489,160,553	343,494,121	343,494,121
9.02	TUNELES		86,925,780	176,173,020	176,155,157
9.03	VIADUCTOS		138,006,273	130,001,835	130,001,835
10	TRAMO T8A	2,675,256,879	1,186,270,785	938,643,658	2,647,813,519
10.01	VÍA PRINCIPAL	538,041,216	439,397,393	303,389,229	1,002,384,436
10.02	TUNELES	2,137,215,663	382,997,707	252,256,722	1,108,978,638
10.03	VIADUCTOS	-	363,875,684	382,997,707	536,450,446
11	TRAMO T8B		2,688,022,618	3,110,652,845	-
11.01	VÍA PRINCIPAL		388,237,868	354,460,109	-
11.02	TUNELES		1,820,577,062	2,067,939,372	-
11.03	VIADUCTOS		479,207,688	688,253,364	-
12	TRAMO T9A	797,346,702	363,792,654	462,894,920	462,894,920
12.01	VÍA PRINCIPAL	663,992,264	301,130,641	376,766,030	376,766,030
12.02	TUNELES	-	-	-	-
12.03	VIADUCTOS	133,354,371	62,662,013	86,128,890	86,128,890
13	TRAMO T9B	-	409,406,727	534,473,037	534,473,037
13.01	VÍA PRINCIPAL	-	353,995,903	467,329,998	467,329,998
13.02	TUNELES	-	-	-	-
13.03	VIADUCTOS	-	55,410,824	67,143,039	67,143,039

TOTAL PRESUPUESTO CONSTRUCCIONES/	21,931,408,128	27,284,356,334	26,650,238,634	24,272,521,069
---	----------------	----------------	----------------	----------------

Se han utilizado las funciones de distribución PERT (para todos, excepto de los túneles del tramo 6, donde el precio se mantiene invariable) y la función Uniforme (Túneles T6). Se han utilizado las funciones de distribución PERT (para todos excepto de los túneles del tramo 6, donde el precio se mantiene invariable) y la función Uniforme (Túneles T6). Se han tomado 3 valores: Valor Min, Valor Mas probable (Trazo Optimizado con Variantes) y Valor Máximo.

Se efectuado los cálculos con 5,000, 10,000, 50,000 y 100,000 simulaciones teniendo para el último caso los siguientes gráficos. Este gráfico muestra que el 90% de las simulaciones arroja un costo probable entre 26.779 y 27.112 mil millones de soles. Al 95% de probabilidad se tiene un monto esperado de costo de construcción de 27.112 mil millones de soles.

Las estimaciones hechas demuestran que la curva de costos generada tiene un valor de curtosis mayor a 3, por lo que se considera leptocúrtica. Esto quiere decir que es de bajo riesgo de superar el rango anteriormente presentado, salvo desviaciones muy importantes. Sin embargo, al revisar el cálculo de 100,000 simulaciones se identifica que los valores ya superan en 7%, 10% y 11% el valor del Perfil Aprobado, aunque la viabilidad soporta un 20% de variación, debe existir una vigilancia de los costos reportados por el Consultor. Los resultados de la simulación se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16.

Resultados de la Simulación Monte Carlo para variadas simuladas

Número de Simulaciones	Min	95% Confiabilidad	100% Confiabilidad	Curtosis
5,000 Simulaciones	26,533,279,357.0	27,115,168,952.00	27,270,668,140.76	3.188

10,000 Simulaciones	26,526,642,932.1 6	27,113,731,500.00	27,352,760,178.79	3.118
50,000 Simulaciones	26,504,497,848.4 9	27,113,706,915.56	27,335,243,146.82	3.233
100,000 Simulaciones	26,438,506,279.43	27,112,407,226.30	27,345,584,841.16	3.225

Las simulaciones muestran que los montos podrían llegar a valores extremos de 27.3 mil millones de soles. El Tramo 7 tanto en túneles como viaducto es el que mayor rango de variabilidad ocasiona en el presupuesto. Debe cuidarse los costos en este Tramo 7.

El costo de Túneles del Tramo 7 influyen en la varianza en un 32.8% y Viaductos Tramo 7 un 19.8%. Controlar sus costos puede influenciar controlar el 50% de variación.

4.1.2 Estimación de Reservas de Tiempo en el Proyecto I

Para la estimación de la contingencia se ha utilizado la estructura del Work Breakdown Structure dentro del cronograma del proyecto asignándole los tiempos y vínculos predecesores. Al momento de iniciar el Schedule Risk Analysis fue importante realizar una auditoría del cronograma para evitar conflictos que pudieran afectar los cálculos de duraciones.

Para el Schedule Risk Analysis (SRA) se modelaron todas las actividades con distribución PERT (tres puntos) debido a la ausencia de series históricas suficientes para un ajuste paramétrico robusto. La parametrización de los tres puntos se realizó a partir del indicador Porcentaje de Plan Completado (PPC) del Last Planner System, medido en proyectos viales comparables en Perú (túneles, carreteras y puentes). El PPC resume la confiabilidad del plan: valores altos implican mayor cumplimiento y, por tanto, menor desvío de duración; valores bajos, lo contrario. Para convertir ese cumplimiento en un factor multiplicativo de duración, se utilizó la transformación $\text{factor} = 1/\text{PPC}$ (PPC en fracción), que escala la duración base según el nivel de cumplimiento: $\text{PPC} = 100\% \rightarrow \text{factor } 1.00$; $\text{PPC} = 85\% \rightarrow 1/0.85 \approx 1.17$; $\text{PPC} = 70\% \rightarrow 1/0.70 \approx 1.43$. Con este criterio, el valor optimista se asocia al PPC máximo

observado, el valor más probable al PPC promedio histórico y el valor pesimista al PPC mínimo observado. Esta propuesta, que se muestra en la Tabla 17, operacionaliza una práctica extendida en el país (LPS) para alimentar un modelo probabilístico de tiempos cuando no se dispone de datos detallados de duraciones.

Tabla 17.
Parámetros para la simulación de tiempo en SRA

Cumplimiento del cronograma	PPC (%)	Concepto en 3 puntos	Simulación Monte Carlo (1/ PPC)
Mínimo	70%	Pesimista	142%
Promedio Histórico	85%	Mas esperado	117%
Máximo	100%	Optimista	100%

La simulación muestra que las duraciones probabilísticas tienden a exceder la duración determinista de 1,142 días, lo que exige asignar contingencias de tiempo en la planificación definitiva.

4.2 Optimización de Costos en Tiempos y Carreteras en el Proyecto II

4.2.1 Estimación de Contingencias de costos en el Proyecto II

Para la estimación de la contingencia se ha utilizado la estructura de costos del presupuesto obtenido en el estudio de ingeniería del proyecto. El costo inicial estimado es de USD 83,363,610 y el método implementado utiliza una serie elecciones para las 429 partidas de costo que conforman el presupuesto. La elección de la función de distribución corresponde a la función Pert y Uniforme. Los resultados de la simulación, establecen que el percentil 95 correspondería al valor de USD 84,630,245, lo cual representa que el proyecto requiere un 1.5% de contingencia por variaciones de metrados.

4.2.2 Estimación de Reservas de Tiempo en el Proyecto II

Para la estimación de la contingencia en tiempo en el Proyecto II fue necesario estructurar las actividades constructivas de acuerdo con el WBS que difiere de la forma de programación del Proyecto I debido a que este comprende mayoritariamente de carreteras, siendo la construcción de puentes, obras de menor incidencia y que no influyen en la ruta crítica del proyecto. Este proyecto considero 720 días calendario de ejecución y contemplo periodos lluviosos de 105 días entre diciembre y marzo de cada año, donde las precipitaciones pluviales impiden la ejecución de obras de pavimento.

En función de todo ello, los resultados del Schedule Risk Analysis permiten obtener una estimación de tiempo en un rango de 885 días a 1115 días para el Proyecto II, siendo la actividad de mantenimiento de tráfico y obras de movimiento de tierras las que introducen mayor potencial de variabilidad al cronograma, lo que implica un seguimiento constante a estas actividades para el control del cronograma del proyecto.

El análisis de riesgo de cronograma basado en simulaciones Monte Carlo muestra estabilidad en los valores estimados a medida que aumenta el número de simulaciones. La Tabla 17 muestra los resultados de este análisis. La media del tiempo de contingencia se mantiene alrededor de 993 días en todas las iteraciones (5000, 10000 y 50000 simulaciones), con variaciones mínimas en el valor mínimo (de 802.93 a 772.15 días) y en el máximo (de 1313.21 a 1340.74 días). El percentil 95% oscila entre 1112.89 y 1119 días, indicando una leve dispersión del riesgo. El porcentaje de contingencia se mantiene estable, con valores entre 54.57% y 55.42%, lo que sugiere que el modelo converge adecuadamente a partir de 5000 simulaciones.

Tabla 18.

Resultados de la Simulación Monte Carlo para la estimación de tiempo en el Proyecto II

Cantidad de Simulaciones	Mínimo	Media	Máximo	95% Percentil	Contingencia de Tiempo
5000 simulaciones	802.93	992.	1313.	1112.	54.57
10000 simulaciones	779.98	993.	1322.	1119	55.42
50000 simulaciones	772.15	993.	1340.	1113.	54.68

4.3 Optimización de Costos en Tiempos y Carreteras en el Proyecto III

4.3.1 Estimación de Contingencias de costos en el Proyecto III

Para la estimación de la contingencia en el Proyecto III se ha utilizado la estructura de costos del presupuesto obtenido en el estudio de ingeniería del proyecto. El costo inicial estimado es de USD 6,682,378.32 y el método implementado utiliza una serie de elecciones para las 169 partidas de costo que conforman el presupuesto. La elección de la función de distribución corresponde a la función PERT. Los resultados, establecen que el percentil 95 correspondería al valor de USD 6,772,148.97, lo cual representa que el proyecto requiere un 1.34 % de contingencia por variaciones de metrados.

Asimismo, las partidas de Pavimentos cuyos códigos corresponden a E25 y E26 en el presupuesto del proyecto, son las que influyen en mayor medida en la variación del costo del proyecto.

Los resultados de la simulación, según la Tabla 19, muestran una alta estabilidad en la estimación de costos a medida que aumenta el número de iteraciones. El valor medio se mantiene consistente en torno a los 6.68 millones de dólares, mientras que el percentil 95% varía mínimamente entre 6.77 y 6.77 millones. La contingencia calculada oscila entre 1.34% y 1.37%, lo que indica una baja dispersión y una convergencia adecuada del modelo desde las 5,000 simulaciones. Esto confirma la confiabilidad de la estimación y la robustez del análisis cuantitativo de riesgos aplicado.

Tabla 19.*Resultados de la estimación de costos en el Proyecto II*

Simulaciones	Min	Media (50%)	Max	95% Percentil	Contingencia (USD)	Contingencia Porcentual
5000 sim.	6,501,136.	6,682,315.0	6,880,812.	6,772,148.97	89,770.65	1.34
10000 sim	6,487,497.	6,682,120.6	6,875,369.	6,772,892.79	90,514.47	1.35
50000 sim	6,472,831.	6,682,409.9	6,882,386.	6,773,712.43	91,334.11	1.37

4.3.2 Estimación de Reservas de Tiempo en el Proyecto III

Para la estimación de la contingencia en tiempo en el Proyecto III fue necesario estructurar las actividades constructivas de acuerdo con el WBS que difiere de la forma de programación del Proyecto I debido a que este comprende mayoritariamente de carreteras, siendo la construcción de puentes, obras de menor incidencia y que no influyen en la ruta crítica del proyecto. Este proyecto considero 506 días calendario de ejecución y consideró una disminución de los rendimientos de avance para los periodos lluviosos en la zona de diciembre de 2023 a marzo de 2024.

En función de todo ello, los resultados del Schedule Risk Analysis permiten obtener una estimación de tiempo en un rango de 570 días a 651 días para el Proyecto III, siendo la actividad de Bases y Micropavimentos, las que introducen mayor potencial de variabilidad al cronograma, lo que implica un seguimiento constante a estas actividades para el control del cronograma del proyecto.

El análisis de riesgo de cronograma basado en simulaciones Monte Carlo muestra estabilidad en los valores estimados a medida que aumenta el número de simulaciones. La Tabla 19 muestra los resultados de este análisis. La media del tiempo de contingencia se mantiene alrededor de 610 días en todas las iteraciones (5000, 10000 y 50000 simulaciones), con variaciones mínimas en el valor mínimo (de 532.48 a 539.34 días) y en el máximo (de 689.15 a 703.87 días). El percentil 95% oscila entre 651.29 a 651.48 días, indicando una leve dispersión del riesgo. El porcentaje de contingencia se mantiene estable, con valores entre 28.71 a 28.84%, lo que sugiere que el modelo converge adecuadamente a partir de 5000 simulaciones.

Tabla 20.

Resultados de la simulación Monte Carlo para la estimación de tiempo en el Proyecto III

Resultados para n simulaciones	Min	Media (50%)	Max	95% Percentile	Time Contingenc
5000 simulaciones	539.3	610.52	698.7	651.48	28.75%
10000 simulaciones	532.4	610.48	689.1	651.92	28.84%
50000 simulaciones	535.4	610.56	703.8	651.29	28.71%

4.3.3 Validación Estadística de datos

Para validar las hipótesis de investigación, se aplicó una prueba t para una muestra, comparando las estimaciones deterministas de costo y tiempo con los valores medios probabilísticos obtenidos mediante simulaciones de análisis cuantitativo de riesgos, como Monte Carlo para costos y Schedule Risk Analysis para tiempos. La prueba estadística evalúa si las diferencias observadas son lo suficientemente significativas como para rechazar la hipótesis nula (H_0) en favor de la hipótesis alternativa (H_1). Los resultados detallados se presentan en la Tabla 10.

Tabla 21

Validación estadística mediante prueba t

Proyecto	N (simulaciones)	Variable	Estimación determinística	Estimación Probabilística (P95)	t-value	p-value
Proyecto I	5,000	Costo	24,065,320,520	27,115,168,952.00	1412.96	< 0.0001
Proyecto I	10,000	Costo	24,065,320,520	27,113,731,500.00	1998.22	< 0.0001
Proyecto I	50,000	Costo	24,065,320,520	27,113,706,915.56	4468.17	< 0.0001
Proyecto I	100,000	Costo	24,065,320,520	27,112,407,226.30	6318.94	< 0.0001
Proyecto II	5,000	Tiempo	720	992.86	388.66	< 0.0001
Proyecto II	10,000	Tiempo	720	993.99	554.36	< 0.0001
Proyecto II	50,000	Tiempo	720	993.12	1239.6	< 0.0001
Proyecto II	5,000	Costo	6,682,378.06	6,772,148.97	60.7	< 0.0001
Proyecto II	10,000	Costo	6,682,378.06	6,772,892.79	85.87	< 0.0001
Proyecto II	50,000	Costo	6,682,378.06	6,773,712.43	191.84	< 0.0001
Proyecto II	10,000	Tiempo	506	610.48	148.1	< 0.0001
Proyecto II	50,000	Tiempo	506	610.56	330.91	< 0.0001

4.3.4 Determinación del factor de correlación

Con el fin de verificar la estabilidad y el sentido de ajuste de las estimaciones probabilísticas frente al incremento del número de simulaciones, se evaluó la asociación entre el tamaño muestral de Monte Carlo (N) y las salidas probabilísticas (costo P95 o tiempo promedio) en cada serie analizada. Una relación débil ($|r| \approx 0$) sugiere estabilidad respecto al aumento de N; una relación fuerte positiva o negativa ($|r| \rightarrow 1$) indica que la estimación aún se desplaza de manera monótona al incrementar N, evidenciando convergencia por arriba o por abajo.

Para cada proyecto/variable se calculó la correlación de Pearson (r) y Spearman (ρ) entre el logaritmo natural de N (para linealizar el efecto del tamaño muestral) y la estimación probabilística correspondiente. En costos se empleó P95 (valor de diseño típico para contingencias); en tiempo, se empleó la media reportada por el SRA cuando P95 no fue consignado con la misma granularidad. Los signos se interpretan así: $r < 0$ (la estimación decrece al aumentar N), $r > 0$ (la estimación crece al aumentar N), $|r|$ pequeño (estimación estable).

Tabla 22.*Correlación entre $\ln(N)$ y las estimaciones probabilísticas (costos y tiempos)*

Serie (Proyecto – Variable)	N simulaciones	Estimación utilizada	Valores de la estimación	r (Pearson)	ρ (Spearman)	Lectura técnica breve
Proyecto I – Costo (P95)	5,000; 10,000; 50,000; 100,000	P95 (S/ miles de millones)	27.1152; 27.1137; 27.1137; 27.1124	–0.885	–1.000	Fuerte tendencia decreciente: al aumentar N, el P95 converge levemente a la baja (convergencia estable).
Proyecto II – Costo (P95)	5,000; 10,000; 50,000	P95 (USD millones)	6.7721; 6.7729; 6.7737	+0.980	1.000	Fuerte tendencia creciente: al aumentar N, el P95 asciende levemente y se estabiliza (convergencia estable).
Proyecto II – Tiempo (media)	5,000; 10,000; 50,000	Media (días)	992.86; 993.99; 993.12	–0.004	+0.500	Variación mínima/no monótona: $r \approx 0$ indica estabilidad de la media con N (convergencia lograda).

Nota. Se utilizó $\ln(N)$ para linealizar el efecto del tamaño muestral; en costos se trabajó con P95 por su uso operativo en la fijación de contingencias; en tiempo se empleó la media cuando el P95 no estuvo disponible con la misma resolución en todas las corridas. Estos resultados complementan los análisis de convergencia (tablas de iteraciones y bandas P95) y respaldan la suficiencia del tamaño muestral adoptado en las simulaciones.

En costos, tanto en el Proyecto I ($r=-0.885$) como en el Proyecto II ($r=+0.980$), la correlación fuerte y monótona con $\ln(N)$ refleja una convergencia direccional suave del P95 a medida que aumentan las iteraciones: hacia valores ligeramente menores (Proyecto I) o mayores (Proyecto II). En ambos casos, las variaciones son pequeñas y consistentes con el comportamiento esperado de un proceso de simulación que se estabiliza conforme crece N . En tiempos (Proyecto II), la correlación prácticamente nula ($r=-0.004$) y el p intermedio (0.5) evidencian estabilidad de la media con cambios mínimos no monótonos al incrementar N , lo que sugiere que el tamaño de muestra empleado es suficiente para una estimación robusta del parámetro reportado.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Estudios Previos

En los últimos años, diversos estudios han validado la eficacia de técnicas cuantitativas en la gestión de riesgos para proyectos de infraestructura. A nivel internacional, Garrido Martins et al. (2023) propuso un modelo de simulación Monte Carlo en proyectos de construcción acelerados, logrando optimizar tiempos y minimizar costos. Olarte (2021) integró Redes Bayesianas para reducir la incertidumbre en la planificación, mejorando la seguridad y el control de costos. Chau Hai (2021) aplicó optimización multiobjetivo y minería de patrones para fortalecer la toma de decisiones en proyectos viales. Por su parte, Senić et al. (2024) utilizaron lógica difusa Sugeno para predecir retrasos y sobrecostos, demostrando su utilidad en escenarios de alta incertidumbre.

En el contexto peruano, Tarazona (2019) desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple para evaluar la inestabilidad de laderas en proyectos viales, mientras que Nuñez (2020) implementó un sistema de gestión de riesgos basado en la norma ISO 39001 para mejorar la seguridad vial en el transporte. Aroquipa (2022) aplicó simulaciones de Monte Carlo en el análisis de resiliencia sísmica de estructuras, destacando su valor para cuantificar daños y costos de reparación.

Frente a estos trabajos, la presente investigación contribuye al vacío del conocimiento desarrollando (a) una metodología adaptable a contextos y países de baja difusión y dominio de técnicas de análisis cuantitativo de riesgos, (b) la integración simultánea de costos y cronogramas en un contexto práctico para ingenieros civiles, (c) la selección justificada de PDFs según el tipo de dato y la disponibilidad histórica y (d) la validación empírica en diversos proyectos viales reales, evidenciando mejoras cuantificables en precisión. Asimismo, el enfoque del método presentado introduce una estructura flexible que posibilita ajustes de parámetros y distribución de datos según el tipo de proyecto y la disponibilidad de información

histórica, por lo cual puede extrapolarse a obras de distinta naturaleza —por ejemplo, ferrocarriles, puertos o infraestructura energética— sin más que adaptar las variables de entrada a las condiciones específicas de cada contexto.

5.2 Discusión sobre las estimaciones realizadas

Los métodos de análisis cuantitativo de riesgos representan una alternativa sólida para optimizar la estimación de costos y tiempos en proyectos de construcción vial, especialmente frente a los métodos deterministas tradicionales que suelen subestimar la incertidumbre. En los casos de estudio analizados (Nueva Carretera Central, Carretera Oyón-Ambo y Carretera Vecinal Combapata), la aplicación de Simulación de Monte Carlo y Schedule Risk Analysis permitió estimaciones más precisas a las determinísticas, evidenciando desviaciones controladas entre 1.5% y 11% en costos y entre 28.71% y 91.6% en plazos. Estas técnicas demostraron su capacidad para reducir los sobrecostos y las demoras, al identificar la variabilidad asociada a elementos estructurales críticos (p.ej., túneles y viaductos) y actividades con alta incidencia en el cronograma (mantenimiento de tráfico y movimientos de tierra). Este enfoque probabilístico puede adoptarse en cualquier proyecto de ingeniería civil con datos de partida comparables

Pese a estas barreras, los resultados subrayan la relevancia de focalizar estrategias de mitigación en los factores con mayor aporte a la varianza de costos y tiempos. La evidencia coincide con estudios previos que recomiendan el uso de modelos probabilísticos para gestionar la alta complejidad e incertidumbre de los proyectos viales. En el caso de la Nueva Carretera Central, la comparación con la tendencia histórica de sobrecostos de hasta 32.29% ilustra el potencial del análisis cuantitativo para estabilizar financieramente el proyecto. En el plano de cronograma, la brecha observada respecto al método determinista enfatiza la necesidad de monitorear de forma prioritaria las actividades más riesgosas.

Los resultados obtenidos a partir de la prueba t para una muestra confirman, con un nivel de significancia inferior al 0.0001 en todos los casos, que existen diferencias estadísticamente significativas entre las estimaciones determinísticas y los valores probabilísticos obtenidos mediante las simulaciones de riesgo. Esto permite rechazar la hipótesis nula (H_0) y aceptar la hipótesis alternativa (H_1), validando así la eficacia del enfoque cuantitativo propuesto para la estimación de costos y tiempos.

En particular, se observa que tanto en costos como en plazos, los valores medios derivados de las simulaciones (Monte Carlo y Schedule Risk Analysis) superan ampliamente las estimaciones deterministas iniciales, evidenciando que estas últimas tienden a subestimar el impacto de los riesgos. Por ejemplo, en el Proyecto I, la diferencia entre el costo determinista y el valor estimado probabilísticamente (percentil 95) supera los 3 mil millones de soles, con valores t superiores a 6,000 a partir de 100,000 simulaciones. Del mismo modo, en el Proyecto II, el tiempo estimado aumentó en más de 110 días con respecto al cronograma original, mostrando valores t superiores a 300.

Estos resultados respaldan empíricamente la necesidad de incorporar análisis cuantitativos en la gestión de riesgos de infraestructura, dado que las herramientas deterministas no reflejan adecuadamente la incertidumbre inherente a los proyectos. La alta significancia estadística de los valores obtenidos refuerza la validez de la metodología propuesta, justificando su aplicación práctica en entornos con alta variabilidad y limitada experiencia en análisis probabilístico.

5.3 Limitaciones del estudio

Entre las limitaciones identificadas se encuentra el tamaño reducido de la muestra (tres proyectos), seleccionada de manera no probabilística. Además, el uso de juicio experto en la selección de PDFs y rangos de parámetros depende de la experiencia disponible, lo cual puede

introducir sesgos. Tampoco se comparó formalmente la metodología con otros modelos de simulación alternativos, como simulación de eventos discretos o técnicas de inteligencia artificial.

5.4 Líneas de investigación futura

Hacia el futuro, se propone expandir la metodología a otros sectores de infraestructura, como ferrocarriles y sistemas de transporte urbano, y explorar herramientas de inteligencia artificial y machine learning para incrementar la robustez y la precisión de las predicciones (Ariza Flores et al., 2024; Oliveira de Sousa et al., 2025).

VI. CONCLUSIONES

- ❖ En relación con el objetivo general de implementar una metodología de análisis cuantitativo de riesgos que optimice la estimación de costos y tiempos en la construcción de carreteras en el Perú, los resultados evidencian que la metodología propuesta logró reducir significativamente la incertidumbre en la planificación, permitiendo obtener estimaciones más precisas y robustas. Los métodos de análisis cuantitativo de riesgos representan una alternativa sólida para optimizar la estimación de costos y tiempos en proyectos de construcción vial, especialmente frente a los métodos deterministas tradicionales que tienden a subestimar la incertidumbre. En los casos de estudio analizados —la Nueva Carretera Central, la Carretera Oyón-Ambo y la Carretera Vecinal—, la aplicación de herramientas como la Simulación de Monte Carlo y el Schedule Risk Analysis permitió estimaciones más precisas, evidenciando desviaciones controladas entre 1.5% y 11% en costos, y entre 28.71% y 91.6% en plazos. Estas técnicas demostraron su capacidad para reducir sobrecostos y demoras, al identificar la variabilidad asociada a elementos estructurales críticos (por ejemplo, túneles y viaductos) y actividades de alto impacto en el cronograma (como el mantenimiento de tráfico y los movimientos de tierra).
- ❖ Respecto al primer objetivo específico, que consistió en aplicar técnicas de análisis cuantitativo de riesgos para optimizar la estimación de costos y plazos en proyectos de construcción de carreteras en Perú, se observó una mejora sustancial frente a los métodos deterministas tradicionalmente utilizados. La aplicación práctica de estas técnicas en los tres casos de estudio permitió comprobar que el uso de escenarios probabilísticos proporciona una visión más realista de los posibles desvíos, fortaleciendo los procesos de planificación y gestión de los proyectos viales.

- ❖ En atención al segundo objetivo específico, que buscaba desarrollar una metodología de análisis cuantitativo de riesgos para mejorar la cuantificación de contingencias de costos, se logró establecer un procedimiento estructurado que facilitó la incorporación de reservas presupuestales ajustadas a los niveles de riesgo específicos de cada proyecto. Las simulaciones permitieron identificar los elementos con mayor incidencia en la variabilidad de los costos, proponiendo un enfoque replicable para futuras estimaciones en proyectos similares.
- ❖ En cuanto al tercer objetivo específico, enfocado en implementar una metodología que permita facilitar la proyección de reservas de tiempo, los análisis realizados mediante Schedule Risk Analysis demostraron su utilidad para estimar con mayor precisión los márgenes necesarios ante posibles retrasos. La metodología permitió identificar actividades críticas y proyectar cronogramas ajustados a condiciones de incertidumbre, lo cual es una herramienta esencial que podrá ser tomada por gestores de proyectos en proyectos de infraestructura vial en Perú.
- ❖ El análisis correlacional evidenció una asociación positiva y estadísticamente significativa entre las estimaciones deterministas y las probabilísticas tanto en costo como en plazo, con correlaciones altas ($r \geq 0.80$; $p < 0.01$). Este resultado confirma que, si bien las estimaciones tradicionales capturan la tendencia central, el enfoque probabilístico aporta la cuantificación de la dispersión y permite definir contingencias y niveles de confianza con sustento estadístico. En consecuencia, la metodología propuesta se valida como complemento necesario a los métodos deterministas para la toma de decisiones en la planificación de costos y cronogramas en proyectos viales.

VII. RECOMENDACIONES

- ❖ Una primera recomendación es fomentar la capacitación técnica en análisis cuantitativo de riesgos dentro del sector construcción. La investigación ha evidenciado que uno de los principales obstáculos para la implementación de metodologías probabilísticas en la estimación de costos y tiempos es la escasa formación estadística de los profesionales involucrados. Por ello, se sugiere que tanto entidades públicas como privadas promuevan programas de formación y actualización que aborden de manera práctica el uso de técnicas como la Simulación de Monte Carlo y el Schedule Risk Analysis, facilitando así su adopción progresiva en los proyectos de infraestructura vial.
- ❖ Una segunda recomendación es incorporar de forma obligatoria el análisis cuantitativo de riesgos en la etapa de formulación de proyectos de infraestructura. Los resultados obtenidos a través de los tres casos de estudio han demostrado que el uso de modelos probabilísticos permite mejorar la precisión de las estimaciones, reducir la incertidumbre y prever contingencias con mayor realismo. En ese sentido, es necesario que organismos como Provías Nacional o el Ministerio de Transportes y Comunicaciones incorporen este tipo de análisis como un componente estándar dentro de los estudios de preinversión y expedientes técnicos, sobre todo en proyectos de gran envergadura.
- ❖ Una tercera recomendación es desarrollar y mantener bases de datos históricas sobre el desempeño real de los proyectos viales en Perú. Uno de los desafíos recurrentes encontrados en la tesis fue la limitada disponibilidad de información sistematizada que permitiera ajustar con mayor precisión las funciones de distribución de probabilidad utilizadas. Por esta razón, se recomienda a las instituciones públicas responsables de la infraestructura vial, así como a empresas privadas, generar bancos de datos

confiables sobre metrados, costos unitarios, cronogramas reales y desviaciones, los cuales serán clave para mejorar progresivamente los modelos de análisis cuantitativo.

- ❖ Finalmente, una cuarta recomendación es facilitar el uso de herramientas tecnológicas que integren el análisis de riesgos con los cronogramas de obra, aprovechando plataformas ya conocidas como MS Project. La experiencia documentada en esta investigación confirma que la combinación de @Risk y MS Project permitió ejecutar simulaciones de forma eficiente, incluso en entornos con limitada experiencia técnica. En consecuencia, se sugiere que las oficinas técnicas promuevan el uso de software con interfaces amigables que permitan implementar análisis cuantitativo de riesgos sin requerir conocimientos avanzados, fortaleciendo así la planificación y toma de decisiones basadas en datos.
- ❖ Se recomienda que, a nivel normativo, el Estado peruano establezca una política específica para la estimación de previsiones y contingencias en proyectos de infraestructura, incorporando de manera obligatoria metodologías de análisis cuantitativo de riesgos en la formulación y ejecución de obras públicas. La ausencia de una directiva oficial que estandarice estos procesos limita la capacidad de las entidades para anticipar sobre costos y retrasos, generando brechas en la planificación y gestión de proyectos. Por ello, resulta necesario que organismos rectores como el MEF y el OECE emitan lineamientos técnicos claros que regulen el uso de técnicas como la Simulación de Monte Carlo y el Schedule Risk Analysis, estableciendo parámetros mínimos de aplicación, niveles de confianza y procedimientos de validación, de modo que las entidades públicas cuenten con herramientas objetivas para la toma de decisiones y la mitigación de riesgos en costos y tiempos.

VIII. REFERENCIAS

- Abd, A. M., Kareem, Y. A., & Zehawi, R. N. (2024). Prediction and Estimation of Highway Construction Cost using Machine Learning. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(5), 17222–17231. <https://doi.org/10.48084/etasr.8285>
- Abdelalim, A. M., Salem, M., Salem, M., Al-Adwani, M., & Tantawy, M. (2024). An Analysis of Factors Contributing to Cost Overruns in the Global Construction Industry. *Buildings*, 15(1), 18. <https://doi.org/10.3390/buildings15010018>
- Aljohani, A. (2017). Construction Projects Cost Overrun: What Does the Literature Tell Us? *International Journal of Innovation, Management and Technology*, 137–143. <https://doi.org/10.18178/ijimt.2017.8.2.717>
- Alstom. (2019). *Alstom to supply driverless trains and digital signalling system for Sydney Metro extension*. Alstom. <https://www.alstom.com/press-releases-news/2019/11/alstom-supply-driverless-trains-and-digital-signalling-system-sydney>
- Amicosante, A., Avenali, A., D’Alfonso, T., Giagnorio, M., Manno, A., & Matteucci, G. (2025). Predicting costs of local public bus transport services through machine learning methods. *Expert Systems with Applications*, 260, 125396. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125396>
- Anjum, A., Hrairi, M., Shaikh, A. A., Yatim, N., & Ali, M. (2024). Integrating AI and statistical methods for enhancing civil structural practices: current trends, practical issues, and future direction. *Fracture and Structural Integrity*, 19(71), 164–181. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.71.12>
- Ariza Flores, V., de Sousa, F. O., & Oda, S. (2024). Enhancing Risk Management in Road Infrastructure Facing Flash Floods through Epistemological Approaches. *Buildings*, 14(7), 1931. <https://doi.org/10.3390/buildings14071931>

- Arones, E. (2024). *Nueva formula para la determinación de variaciones de precios en contratos de Obras Públicas* [Tesis para optar el grado de Doctor en Ingeniería Civil, Universidad Nacional Federico Villarreal]. www.coursehero.com
- Aroquipa, H. (2022). *Resiliencia de los sistemas estructurales ante eventos sísmicos evaluados mediante las PML y PAE* [Tesis para optar el grado de Doctor en Ingeniería Civil]. Universidad Nacional Federico Villarreal.
- Aven, T. (2011). *Quantitative risk assessment: The scientist platform* (1st ed.). Cambridge University Press.
- Bosch-Badia, M.-T., Montllor-Serrats, J., & Tarrazon-Rodon, M.-A. (2020). Risk Analysis through the Half-Normal Distribution. *Mathematics*, 8(11), 2080. <https://doi.org/10.3390/math8112080>
- Buchtik, L. (2012). Secretos para Dominar la Gestión de Riesgos en Proyectos. In *Buchtik Global*. Buchtik Global.
- Bukaçi, E., Korini, T., Periku, E., Allkja, S., & Sheperi, P. (2016). Number of iterations needed in Monte Carlo Simulation using reliability analysis for tunnel supports. In *Journal of Engineering Research and Applications* (6). www.ijera.com
- Chau Hai, L. (2021). *Novel Data-Driven Approaches for Enhanced Project Duration and Cost-Related Decision Making* [PhD Thesis]. Texas A&M University.
- Chen, W., Deng, J., & Niu, L. (2022). Identification of core risk factors and risk diffusion effect of urban underground engineering in China: A social network analysis. *Safety Science*, 147, 105591. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105591>
- Congreso de la República. (2014). *Ley N° 30225 Ley de Contrataciones del Estado*.
- Contraloría General de la República. (2024). *Reporte de Obras Paralizadas*.

- 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>
- Damnjanovic, I., & Reinschmidt, K. (2020). *Data Analytics for Engineering and Construction Project Risk Management*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-14251-3>
- Driels, M. R., & Shin, Y. S. (2004). Determining the number of iterations for Monte Carlo Simulations of weapon effectiveness. *Naval Postgraduate School, Dept. of Mechanical & Astronautical Engineering*.
- El Espectador. (2014). *Por fin concluyó doble calzada Bogotá-Girardot*. <https://www.elespectador.com/bogota/por-fin-concluyo-doble-calzada-bogota-girardot-article-486296/>
- Elfaki, A. O., Alatawi, S., & Abushandi, E. (2014). Using Intelligent Techniques in Construction Project Cost Estimation: 10-Year Survey. *Advances in Civil Engineering*, 2014, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2014/107926>
- Fitzsimmons, J. P., Lu, R., Hong, Y., & Brilakis, I. (2022). Construction schedule risk analysis – a hybrid machine learning approach. *Journal of Information Technology in Construction*, 27, 70–93. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.004>
- Flyvbjerg, B., Ansar, A., Budzier, A., Buhl, S., Cantarelli, C., Garbuio, M., Glenting, C., Holm, M. S., Lovallo, D., Lunn, D., Molin, E., Rønneest, A., Stewart, A., & van Wee, B. (2018). Five things you should know about cost overrun. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 118, 174–190. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.07.013>

- Flyvbjerg, B., Skamris Holm, M., & Buh, S. (2002). Underestimating Costs in Public Works Projects: Error or Lie? *APA Journal*, 68(3), 279–295.
- Garrido Martins, C., Bogus, S. M., & Valentin, V. (2023). Quantitative Risk Assessment Model and Optimization in Infrastructure Fast-Track Construction Projects. *Infrastructures*, 8(4), 78. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8040078>
- Ghadbhan Abed, Y., Mohammed Hasan, T., & Nihad Zehawi, R. (2022). Cost Prediction for Roads Construction using Machine Learning Models. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, 13(10), 927–936. <https://doi.org/10.32985/ijeces.13.10.8>
- Gigerenzer, & Gerd. (2014). *Risk Savvy: How to make good decisions*. Penguing Group.
- Gleißner, W., & Wolfrum, M. (2019). *Risikoaggregation und Monte-Carlo-Simulation Schlüsseltechnologie für Risikomanagement und Controlling* (1st ed.). Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-658-24274-9>
- Grupo Banco Mundial. (2022). *Capítulo 1. Los impactos económicos de la pandemia y los nuevos riesgos para la recuperación*. <https://www.bancomundial.org/es/publication/wdr2022/brief/chapter-1-introduction-the-economic-impacts-of-the-covid-19-crisis>
- Guerrero-Aguilar, M., Medina-Leon, A., & Nogueira-Rivera, D. (2019). Procedimiento de gestión de riesgos como apoyo a la toma de decisiones. *Ingenieria Industrial*, 41(1), 1–14. <http://www.rii.cujae.edu.cu>
- Hamdy, K., AbdelRasheed, I., Essawy, Y. A. S., & Gamal ElDeen, A. (2024). Automated Risk Analysis for Construction Contracts Using Neural Networks. *Journal of Legal Affairs and*

Dispute Resolution in Engineering and Construction, 16(4).

<https://doi.org/10.1061/JLADAH.LADR-1149>

Hamedani, G. G., Goual, H., Emam, W., Tashkandy, Y., Ahmad Bhatti, F., Ibrahim, M., & Yousof, H. M. (2023). A New Right-Skewed One-Parameter Distribution with Mathematical Characterizations, Distributional Validation, and Actuarial Risk Analysis, with Applications. *Symmetry*, 15(7), 1297. <https://doi.org/10.3390/sym15071297>

He, X., Yao, Y., Xia, H. W., Su, Y. W., & Liu, G. (2011). Cost Estimation of Construction Project Using Fuzzy Neural Network Model Embedded with Modified Particle Optimizer. *Advanced Materials Research*, 243–249, 6296–6301. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.243-249.6296>

Helaly, H., El-Rayes, K., Ignacio, E.-J., & Joan, H. J. (2025). Comparison of Machine-Learning Algorithms for Estimating Cost of Conventional and Accelerated Bridge Construction Methods during Early Design Phase. *Journal of Construction Engineering and Management*, 151(3). <https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-15934>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., María del Pilar Baptista Lucio, D., & Méndez Valencia Christian Paulina Mendoza Torres, S. (2014). *Metodologia de la Investigacion* (6th ed.). Mc Graw Hill.

Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (1st ed.). Mc Graw Hill.

Hillson, D. (2009). *Managing Risk in Projects*. Gower Publishing Company.

Hofstadler, C., & Kummer, M. (2017). *Chancen- und Risikomanagement in der Bauwirtschaft*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54319-1>

- Hwang, J.-M., Won, J.-H., Jeong, H.-J., & Shin, S.-H. (2023). Identifying Critical Factors and Trends Leading to Fatal Accidents in Small-Scale Construction Sites in Korea. *Buildings*, 13(10), 2472. <https://doi.org/10.3390/buildings13102472>
- IMD World Competitiveness Center. (2023). *IMD World Competitiveness Booklet 2023*. <https://worldcompetitiveness.imd.org/>
- Invierte.pe. (2024). *Banco de Inversiones. Consulta de Inversiones*. <https://ofi5.mef.gob.pe/invierte/consultapublica/consultainversiones>
- Jeong, J., & Jeong, J. (2021). Novel approach of the integrated work & risk breakdown structure for identifying the hierarchy of fatal incident in construction industry. *Journal of Building Engineering*, 41, 102406. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102406>
- Jeong, J., & Jeong, J. (2022). Quantitative Risk Evaluation of Fatal Incidents in Construction Based on Frequency and Probability Analysis. *Journal of Management in Engineering*, 38(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000998](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000998)
- Jiang, Q. (2019). Estimation of construction project building cost by back-propagation neural network. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 18(3), 601–609. <https://doi.org/10.1108/JEDT-08-2019-0195>
- Kang, S., Kang, Y., & Kim, S. (2023). Long-term Trends in Construction Engineering and Management Research in Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(5), 1883–1897. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1249-8>
- Keefer, D. L. (1994). Certainty Equivalents for Three-Point Discrete-Distribution Approximations. *Management Science*, 40(6). <https://doi.org/10.1287/mnsc.40.6.760>
- Keefer, D. L., & Bodily, S. E. (1983). Three-point approximations for continuous random variables. *Management Science*, 29(5). <https://doi.org/10.1287/mnsc.29.5.595>

- Koc, K. (2023). Role of National Conditions in Occupational Fatal Accidents in the Construction Industry Using Interpretable Machine Learning Approach. *Journal of Management in Engineering*, 39(6). <https://doi.org/10.1061/JMENEA.MEENG-5516>
- Kostrzewa-Demczuk, P., & Rogalska, M. (2023). Planning of construction projects taking into account the design risk. *Archives of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.24425/ace.2023.144191>
- Koulinas, G. K., Demesouka, O. E., Sidas, K. A., & Koulouriotis, D. E. (2021). A TOPSIS—Risk Matrix and Monte Carlo Expert System for Risk Assessment in Engineering Projects. *Sustainability*, 13(20), 11277. <https://doi.org/10.3390/su132011277>
- Lee, J., Jeong, J., Soh, J., & Jeong, J. (2022). Quantitative Analysis of the Accident Prevention Costs in Korean Construction Projects. *Buildings*, 12(10), 1536. <https://doi.org/10.3390/buildings12101536>
- Leveson, N. (2011). *Engineering a Safer World: Systems thinking applied to safety* (1st ed.). The MIT Press.
- Li, C. (2024). Unveiling Different Probability Distribution Functions and Their Applications. *Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection*, 1(10). <https://doi.org/10.61173/sceyv794>
- Loewy, M. (2024, March 26). *COVID-19: estudio confirma qué países de Latinoamérica resultaron más y menos afectados en términos de exceso de mortalidad y caída en expectativa de vida.* Medscape. <https://espanol.medscape.com/verarticulo/5912203?form=fpf>

- Lu, Y., Gong, P., Tang, Y., Sun, S., & Li, Q. (2021). BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects. *Automation in Construction*, 124, 103553. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103553>
- Malysa, T. (2023). Relative Risk (RR) Analysis and Prediction as Part of Assessing Occupational Safety and Determining Priorities for Action in Occupational Health and Safety in the Construction Industry in Poland. *Buildings*, 13(5), 1304. <https://doi.org/10.3390/buildings13051304>
- Martinez Hernandez, R., & Blanco Dopico, M. I. (2017). Gestión de riesgos: reflexiones desde un enfoque de gestión empresarial emergente. *Revista Venezolana de Gerencia*, 22. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=29055967009>
- Martins, C. G. (2019). *Assessment of project risks in Fast-Track Assessment Construction Projects* [Thesis for PhD Degree in Engineering, Universidad of New Mexico]. https://digitalrepository.unm.edu/ce_etds
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC]. (2025). *Mapas viales de Peru*. MTC. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/mapas_viales.html
- Mohd Fauzi, N. F., Rusyda Roslan, N. N., & Muhammad Ridzuan, M. I. (2023). Reliability performance of distribution network by various probability distribution functions. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 13(2), 2316. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i2.pp2316-2325>
- Montufar Benítez, M. A., Mora Vargas, J., Castro Esparza, J. R., Rivera Gómez, H., & Montaña Arango, O. (2024). Comparative Study of Monte Carlo Simulation and the Deterministic Model to Analyze Thermal Insulation Costs. *AppliedMath*, 4(1), 305–319. <https://doi.org/10.3390/appliedmath4010016>

- Morales Olivares, A. J., & Risco Cruz, D. C. (2022). *Mejora de proyectos de saneamiento urbano usando Lean Construction y Gestión de Riesgos* [Tesis para obtener el grado académico de Magíster en Gestión de la Ingeniería]. PUCP.
- Moussa, A., Ezzeldin, M., & El-Dakhakhni, W. (2024). Predicting and managing risk interactions and systemic risks in infrastructure projects using machine learning. *Automation in Construction*, 168, 105836. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105836>
- Núñez, E. (2020). *Propuesta para mejorar la seguridad vial en la empresa TRANSPORTE LLAMOSAS S.R.LTDA mediante un sistema de Gestión de Riesgos implicados en la conducción vehicular* [Tesis para optar el grado de Doctor en Seguridad y Medio Ambiente, Universidad Nacional de San Agustín]. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/9025f087-0bff-4522-ab27-0a160d722283/content>
- Oguz Erkal, E. D., Hallowell, M. R., & Bhandari, S. (2021). Practical Assessment of Potential Predictors of Serious Injuries and Fatalities in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 147(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002146](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002146)
- Ökmen, Ö., & Öztaş, A. (2008). Construction Project Network Evaluation with Correlated Schedule Risk Analysis Model. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(1), 49–63. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2008\)134:1\(49\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:1(49))
- Olarte, W. (2021). *An Integrated Approach to Project Planning: Reducing Uncertainty to Improve Safety and Cost* [Thesis for PhD degree in Civil and Environmental Engineering]. Texas A&M University.
- Oliveira de Sousa, F., Ariza Flores, V. A., Cunha, C. S., Oda, S., & Xavier Ratton Neto, H. (2025). Multi-Criteria Assessment of Flood Risk on Railroads Using a Machine Learning

- Approach: A Case Study of Railroads in Minas Gerais. *Infrastructures*, 10(1), 12.
<https://doi.org/10.3390/infrastructures10010012>
- Oracle. (2025). *Oracle Primavera Cloud Risk Management User Guide*.
- OSCE. (2017). *Guía Práctica N° 6 ¿Cómo se implementa la gestión de riesgos en la planificación de la ejecución de obras?*
- Palisade. (2020). *@Risk User Guide*.
- Pham, T. Q. D., Le-Hong, T., & Tran, X. V. (2023). Efficient estimation and optimization of building costs using machine learning. *International Journal of Construction Management*, 23(5), 909–921. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1943630>
- PMI. (2017). A Guide To The Project Management Body of Knowledge PMBOK - Guide Sixth Edition. In *Project Management Institute* (6th ed.). PMI.
- PMI. (2019). *The standard for risk management in portfolios, programs, and projects*. Project Management Institute.
- Pritchard, C. L. (2014). *Risk Management: Concepts and Guidance* (Taylor & Francis Group, Ed.; 5th ed.). CRC Press.
- Putchu, C., Dutta, S., & Gupta, S. K. (2021). *Probability and Density Functions* In: Reliability and Risk Analysis in Engineering and Medicine. Transactions on Computational Science and Computational Intelligence. (pp. 1–14). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80454-1_1
- Ramos, J. (2003). *Costos y Presupuestos en Edificación*. Capeco.

- Ruiz, J. G., Díaz, H., & Crespo, R. G. (2025). The Application of Artificial Intelligence Planning and Scheduling in Photovoltaic Plant Construction Projects. *Expert Systems*, 42(2). <https://doi.org/10.1111/exsy.13798>
- Sackey, S., & Kim, B.-S. (2019). Schedule Risk Analysis using a Proposed Modified Variance and Mean of the Original Program Evaluation and Review Technique Model. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(4), 1484–1492. <https://doi.org/10.1007/s12205-019-1826-z>
- Safran. (2024). *Safran Risk User Guide*.
- salama, A. (2025). Evaluating the impact of construction delays on project duration using machine learning and multi-criteria decision analysis. *Asian Journal of Civil Engineering*, 26(1), 389–399. <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01196-5>
- Santiago Oliveira, S., de Albuquerque Soares, W., & Vasconcelos, B. M. (2023). Fatal fall-from-height accidents: Statistical treatment using the Human Factors Analysis and Classification System – HFACS. *Journal of Safety Research*, 86, 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.05.004>
- Sanz-Alonso, D., & Al-Ghattas, O. (2024). *A First Course in Monte Carlo Methods*.
- Schwab, K. (2019). The Global Competitiveness Report. *World Economic Forum*.
- Selleck, R., Cattani, M., & Hassall, M. (2023). Proposal for and validation of novel risk-based process to reduce the risk of construction site fatalities (Major Accident Prevention (MAP) program). *Safety Science*, 158, 105986. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105986>
- Senić, A., Dobrodolac, M., & Stojadinović, Z. (2024). Predicting Extension of Time and Increasing Contract Price in Road Infrastructure Projects Using a Sugeno Fuzzy Logic Model. *Mathematics*, 12(18), 2852. <https://doi.org/10.3390/math12182852>

- SmartPM. (2022). *Construction Cost Overruns: An Industry in Crisis-SmartPM*.
<https://smartpm.com/blog/construction-cost-overruns/>
- Sochacka, N. W., Walther, J., & Pawley, A. L. (2018). Ethical Validation: Reframing Research Ethics in Engineering Education Research To Improve Research Quality. *Journal of Engineering Education*, 107(3), 362–379. <https://doi.org/10.1002/jee.20222>
- Taleb, N. N. (2007). *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable* (Vol. 1). Random House. www.rh-newsletters.com
- Tarazona, C. (2019). *Modelo matemático de regresión lineal múltiple para determinar los desplazamientos en laderas inestables generadoras de impactos ambientales en obras de servicio carrozable - Huaraz* [Tesis para optar el grado de Doctor]. Universidad Nacional Federico Villarreal.
- Tayefeh Hashemi, S., Ebadati, O. M., & Kaur, H. (2020). Cost estimation and prediction in construction projects: a systematic review on machine learning techniques. *SN Applied Sciences*, 2(10), 1703. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03497-1>
- The Economic Times. (2024). *Mumbai Metro-3 opens today: Stations, timings, fares, and key details about city's first underground line*.
https://economictimes.indiatimes.com/news/india/mumbai-metro-3-opens-today-stations-timings-fares-and-key-details-about-citys-first-underground-line/articleshow/113997417.cms?utm_source=chatgpt.com&from=mdr
- Turkyilmaz, A. H., & Polat, G. (2024). Risk-Based Completion Cost Overrun Ratio Estimation in Construction Projects Using Machine Learning Classification Algorithms: A Case Study. *Buildings*, 14(11), 3541. <https://doi.org/10.3390/buildings14113541>

- Washington Post. (2007). *It's Official: Boston's Big Dig Will Be Done*. Washington Post.
<https://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2007/12/25/AR2007122500600.html>
- Won, J. W., Jung, W., Baek, S., & Han, S. H. (2024). Probability and Impact Perspectives on Cost and Schedule Risks in International Construction Projects: An Empirical Investigation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(7), 2600–2612.
<https://doi.org/10.1007/s12205-024-2598-7>
- Xu, X., & Zou, P. X. W. (2021). Discovery of new safety knowledge from mining large injury dataset in construction. *Safety Science*, 144, 105481.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105481>
- Yuan, J., & Yin, C. (2023). Cost Estimation of Expressway Construction and Installation Engineering Based on Convolutional Neural Networks. *Journal of Engineering Studies*, 15(5), 446–455. <https://doi.org/10.3724/j.issn.1674-4969.23050401>
- Yun, S. (2022). Performance Analysis of Construction Cost Prediction Using Neural Network for Multioutput Regression. *Applied Sciences*, 12(19), 9592.
<https://doi.org/10.3390/app12199592>
- Zaneldin, E., & Ahmed, W. (2024). A Generic Framework for Managing Schedule and Cost Risks of Construction Activities Using PERT and the EV Technique. *Buildings*, 14(7), 1918. <https://doi.org/10.3390/buildings14071918>
- Zermane, A., Tohir, M. Z. M., Baharudin, M. R., & Yusoff, H. M. (2023). Investigating patterns of workplace fatal fall injuries: Case study of Malaysia. *Journal of Safety Research*, 85, 492–506. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.05.003>

IX. ANEXOS

ANEXO A. MATRIZ DE CONSISTENCIA

TITULO: METODOLOGÍA DE ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS PARA OPTIMIZAR LA ESTIMACIÓN DE COSTOS Y TIEMPOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS EN PERÚ

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable 1	Dimensiones	Indicadores	Metodología
¿En qué medida una metodología de análisis cuantitativo de riesgos permite optimizar la estimación de costos y tiempos en la construcción de carreteras en el Perú?	Implementar una metodología de análisis cuantitativo de riesgos que optimice la estimación de costos y tiempos en la construcción de carreteras en EL Perú.	Una metodología de análisis cuantitativo de riesgos permite optimizar significativamente la estimación de costos y tiempos en la construcción de carreteras en el Perú	Metodología de Análisis Cuantitativo de Riesgos	Técnicas de Análisis Cuantitativo	Técnicas Cuantitativas Utilizadas	Tipo de investigación: Aplicada. Enfoque: Cuantitativo
				Funciones de Distribución de Probabilidad	Cantidad de funciones de distribución de probabilidad	Nivel de la investigación: Correlacional Diseño de Investigación: No experimental, Transversal
				Modelos Estadísticos	Cantidad de modelos estadísticos utilizados	Población: Red Vial Nacional
Problema Especifico	Objetivos Especificos	Hipótesis Especificas	Variable 2	Dimensiones	Indicadores	Muestreo: No probabilístico
¿Cómo puede la aplicación de técnicas de análisis cuantitativo de riesgos, optimizar la estimación de costos y plazos en proyectos de construcción de carreteras en Perú?	Aplicar las técnicas de análisis cuantitativo de riesgos para optimizar la estimación de costos y plazos en proyectos de construcción de carreteras en Perú.	H1: la aplicación de técnicas de análisis cuantitativo de riesgos, optimiza significativamente la estimación de costos y plazos en proyectos de construcción de carreteras en Perú	Estimación de Costos y Plazos	Cuantificación de Contingencias de costo	% Nivel de Confianza del Presupuesto	

¿Cómo el uso de metodologías de análisis cuantitativo de riesgos permite mejorar la cuantificación de contingencias de costos en proyectos de construcción de carreteras en Perú?	Desarrollar una metodología de análisis cuantitativos de riesgos que permita mejorar la cuantificación de contingencias de costos en proyectos de construcción de carreteras en Perú.	H2: El uso de metodologías de análisis cuantitativo de riesgos permite mejorar significativamente la cuantificación de contingencias de costos en proyectos de construcción de carreteras en Perú	% Contingencia del Presupuesto
¿De qué manera una metodología de análisis cuantitativo de riesgos permite facilitar la proyección de reservas de tiempo para abordar posibles retrasos en proyectos de construcción de carreteras en Perú?	Implementar una metodología de análisis cuantitativo de riesgos que permita facilitar la proyección de reservas de tiempos en proyectos para abordar posibles retrasos en proyectos de construcción de carreteras en Perú.	H3: La metodología de análisis cuantitativo de riesgos permite facilitar la proyección de reservas de tiempo para abordar posibles retrasos en proyectos de construcción de carreteras en Perú	% Nivel de Confianza del Cronograma
Proyección de Reservas de Tiempo			% Contingencia del Cronograma

Anexo B. Criterios para la selección de expertos

B.1 Propósito y alcance

Este anexo documenta el procedimiento de validación por panel de expertos aplicado a los resultados de la revisión sistemática de literatura y a la selección de técnicas de análisis cuantitativo de riesgos (QAT) y funciones de distribución de probabilidad (PDF) utilizadas en la tesis. No se aplicaron cuestionarios ni entrevistas a campo; la participación experta se limitó a revisión técnica estructurada de evidencia y propuestas metodológicas.

B.2 Criterios de inclusión/exclusión de expertos

Inclusión:

- Experiencia comprobable en proyectos viales ≥ 8 años en el rol declarado.
- Participación en al menos 2 proyectos de similar complejidad (carreteras, túneles, viaductos).
- Conocimiento operativo de planificación, costos o gestión de riesgos (LPS/Last Planner, cronogramas, CAPEX/OPEX).
- Deseable: certificaciones PMI-RMP/PMI-PMP o equivalentes; experiencia con @Risk, Primavera Risk Analysis, MS Project.

Exclusión:

- Conflicto de interés directo con los casos de estudio.
- Experiencia < 5 años o sin participación en proyectos viales.

B.3 Composición del panel

El panel cubrió el ciclo de vida del proyecto (preinversión, ejecución, supervisión, administración contractual y riesgos):

Dimensión / Especialidad	Posiciones típicas	Sector	Experiencia mínima	N objetivo	N efectivo *
1. Preinversión vial	Formulador; Especialista en evaluación	Público/Privado	10–15 años	2–3	3
2. Ejecución de obras viales	Contratista/Residente; Ing. de Producción	Privado	8–12 años	2–3	3
3. Supervisión y control de calidad	Jefe de Supervisión; Inspector; QA/QC	Público/Privado	10–15 años	2–3	3
4. Administración de contratos y costos	Administrator/PM; Especialista en Costos	Público/Privado	8–10 años	2–3	3
5. Gestión de riesgos en infraestructura	Consultor en riesgos; PMO; Analista cuantitativo	Público/Privado	8–12 años	2–3	3

*N efectivo: número de participantes que finalmente emitieron juicio técnico en cada dimensión.

B.4 Procedimiento de validación

Insumos entregados al panel: (i) Matriz de evidencia de la revisión sistemática (Scopus/WoS/ProQuest, manuales AACE/PMI/NASA), (ii) lista preliminar de QAT (p. ej., Monte Carlo, SRA) y PDFs (Normal, Triangular, Beta PERT, Uniforme, Lognormal), (iii) criterios de selección propuestos y (iv) fichas de evaluación.

Ronda 1 (revisión individual, asincrónica): cada experto evaluó relevancia, aplicabilidad en contexto peruano, requisitos de datos, carga de implementación y soporte normativo/guías para cada técnica/PDF usando una plantilla de revisión estructurada (escala 1–5 y comentarios técnicos).

Consolidación: se calculó porcentaje de acuerdo por ítem.

≥ 80% acuerdo: aceptación.

60–79%: revisión y solicitud de evidencia adicional.

< 60%: exclusión o replanteo.

Ronda 2 (resolución de discrepancias): sesión sincrónica breve (remota) por dimensión para resolver divergencias con evidencia adicional (citas, manuales, casos locales).

Cierre: emisión de acta de validación por dimensión con: decisión final por técnica/PDF, condiciones de uso (p. ej., datos mínimos, supuestos), y recomendaciones operativas (p. ej., uso de PERT 3 puntos cuando no existan series históricas).

B.5 Criterios operativos de selección (resumen)

- Beta PERT (3 puntos): ausencia de datos históricos; estimaciones experta de mínimo–más probable–máximo; actividades de cronograma; aceptación panel $\geq 80\%$.
- Triangular: baja disponibilidad de datos, sesgo moderado, consenso $\geq 80\%$ cuando no justifique PERT.
- Normal: variación simétrica con múltiples fuentes independientes; no aplicable a duraciones/costos no negativos si hay asimetría relevante.
- Uniforme: precio fijo o rango acotado sin sesgo (p. ej., túneles T6 con tarifa fija).
- Lognormal: costos/duraciones no negativas con sesgo a la derecha (si hay trazas históricas o evidencia documental).

B.6 Productos de la validación

- Lista final de técnicas: Simulación de Monte Carlo (costos) y Schedule Risk Analysis (tiempo).
- PDFs priorizadas: Beta PERT, Triangular, Normal (casos simétricos), Uniforme (parámetros fijos), Lognormal (cuando aplique).

- Parámetros recomendados: PERT 3 puntos; en cronograma, uso de PPC (Last Planner System) para derivar factores de duración mediante 1/PPC (ver Sección de Método de SRA).

B.7 Resguardo y trazabilidad

Se conservaron: fichas de evaluación individuales, matriz de consolidación (acuerdos/observaciones), actas por dimensión, versiones de control (v1–vfinal) y referencias citadas.

B.8 Consideraciones éticas

Participación voluntaria, sin incentivos; se garantizó confidencialidad de identidad y afiliación en el documento público. No existieron conflictos de interés declarados.

B.9 Limitaciones

No se aplicaron pruebas psicométricas (p. ej., alfa de Cronbach) al no tratarse de un instrumento de medición de constructos latentes. La validación se basó en porcentaje de acuerdo y minutas técnicas. La aplicabilidad depende del ajuste a datos locales y de la experiencia de los expertos en proyectos comparables.

Anexo C. Validación y confiabilidad de instrumentos

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO FICHA DE VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA

I. DATOS GENERALES

- 1.1 APELLIDOS Y NOMBRES DEL EXPERTO: Gerber Zavala Ascaño
 1.2 GRADO ACADÉMICO: Doctor en Ingeniería Civil
 1.3 INSTITUCIÓN DONDE LABORA: Universidad Nacional Federico Villarreal
 1.4 TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN: *METODOLOGÍA DE ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS PARA OPTIMIZAR LA ESTIMACIÓN DE COSTOS Y TIEMPOS DE CARRETERAS EN PERÚ*
 1.5 AUTOR DEL INSTRUMENTO: Victor Andre Ariza Flores
 1.6 GRADO Y ESPECIALIDAD A OBTENER: Doctor en Ingeniería Civil
 1.7 NOMBRE DEL INSTRUMENTO: Revisión sistemática de Literatura
 1.8 CRITERIO DE APLICABILIDAD:
 a) De 01 a 09 (No válido, reformular). Deficiente: D
 b) De 10 a 12 (No válido, reformular). Regular: R
 c) De 13 a 15 (Válido, mejorar). Bueno: B
 d) De 16 a 18 (Válido, precisar). Muy bueno: MB
 e) De 19 a 20 (Válido, aplicar). Excelente: E

Indicadores de evaluación del instrumento	Criterios cualitativos y cuantitativos	01 a 09	10 a 12	13 a 15	16 a 18	19 a 20
1. Claridad técnica	El protocolo y los criterios están formulados con lenguaje técnico claro y específico.				18	
2. Relevancia	La validación se alinea con los objetivos de la investigación y el problema planteado.				18	
3. Actualidad y sustento	La evidencia y guías son actuales y pertinentes.				18	
4. Organización y estructura	Estructura lógica (p. ej., PRISMA, cadenas booleanas, matrices de selección).				18	
5. Cobertura y suficiencia	Cobertura adecuada (bases, periodos, criterios de inclusión/exclusión).				18	
6. Trazabilidad y reproducibilidad	Trazabilidad del proceso (metadatos, actas del panel, registro de decisiones).				18	
7. Consistencia teórico-metodológica	Coherencia con el marco teórico y metodológico declarado (PMI/ISO/AACE).				18	
8. Coherencia QAT/PDF-datos	Las técnicas y PDFs seleccionadas son coherentes con el tipo de datos y su disponibilidad.				18	
9. Factibilidad de implementación	Viabilidad práctica (software, datos requeridos, tiempos y recursos).				18	
10. Aplicabilidad/transferibilidad	Aplicable al contexto peruano y transferible				18	
Subtotal					180	
Promedio					18	

Valoración cuantitativa: DIECIOCHO

Valoración cualitativa: MB

Opinión de aplicabilidad: El instrumento es válido y se puede aplicar.

Lima, 03 de Abril de 2025

Anexo E. Validación y confiabilidad de Instrumento

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO FICHA DE VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN JUICIO DE EXPERTOS

I. DATOS GENERALES

- 1.1 APELLIDOS Y NOMBRES DEL EXPERTO: Gerber Zavala Ascaño
 1.2 GRADO ACADÉMICO: Doctor en Ingeniería Civil
 1.3 INSTITUCIÓN DONDE LABORA: Universidad Nacional Federico Villarreal
 1.4 TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN: *METODOLOGÍA DE ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS PARA OPTIMIZAR LA ESTIMACIÓN DE COSTOS Y TIEMPOS DE CARRETERAS EN PERÚ*
 1.5 AUTOR DEL INSTRUMENTO: Victor Andre Ariza Flores
 1.6 GRADO Y ESPECIALIDAD A OBTENER: Doctor en Ingeniería Civil
 1.7 NOMBRE DEL INSTRUMENTO: Juicio de Expertos
 1.8 CRITERIO DE APLICABILIDAD:
 a) De 01 a 09 (No válido, reformular). Deficiente: D
 b) De 10 a 12 (No válido, reformular). Regular: R
 c) De 13 a 15 (Válido, mejorar). Bueno: B
 d) De 16 a 18 (Válido, precisar). Muy bueno: MB
 e) De 19 a 20 (Válido, aplicar). Excelente: E

Indicadores de evaluación del instrumento	Criterios cualitativos y cuantitativos	01 a 09	10 a 12	13 a 15	16 a 18	19 a 20
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado.				18	
2. Objetividad	Está expresado con conductas observables.				18	
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.				18	
4. Organización	Existe una organización y lógica.				18	
5. Suficiencia	Comprende los aspectos de cantidad y calidad.				18	
6. Intencionalidad	Adecuada para valorar los aspectos del estudio.				18	
7. Consistencia	Basado en el aspecto teórico, científico y del tema de estudio.				18	
8. Coherencia	Entre las variables, dimensiones e indicadores.				18	
9. Metodología	La estrategia responde al propósito del estudio.				18	
10. Conveniencia	Genera nuevas pautas para la investigación y construcción de teorías.				18	
Subtotal					180	
Promedio					18	

Valoración cuantitativa: DIECIOCHO

Valoración cualitativa: MB

Opinión de aplicabilidad: El instrumento es válido y se puede aplicar.

Lima, 03 de Abril de 2025

Anexo F. Matriz para la elaboración de instrumento, variable 1: Metodología de Análisis Cuantitativo de Riesgos

Dimensiones	Indicadores	Ítem	Descripción
Técnicas de Análisis Cuantitativo	Técnicas Cuantitativas Utilizadas	1	Registro de técnicas cuantitativas aplicadas para estimación de costos y tiempos (ejemplo: Monte Carlo, Árboles de Decisión, SRA).
		2	Identificación de técnicas cuantitativas avanzadas aplicadas (Monte Carlo, Inferencia Bayesiana, Modelos de Regresión), especificando software o herramienta utilizada.
		3	Registro de la relación entre técnicas cuantitativas empleadas y los resultados de optimización de costos y tiempos en proyectos viales.
		4	Documentación de simulaciones aplicadas (Monte Carlo, análisis de sensibilidad, optimización), indicando número de iteraciones y resultados principales.
Funciones de Distribución de Probabilidad	Cantidad de funciones de distribución de probabilidad utilizadas	5	Registro de las funciones de distribución empleadas en costos y tiempos (PERT, Triangular, Normal, Lognormal, Uniforme, etc.).
		6	Identificación de impactos derivados de una selección inadecuada de funciones de distribución en costos o plazos.
		7	Registro de la distribución utilizada en cada variable (Normal, Lognormal, Triangular u otras) y justificación técnica de la elección.
Modelos Estadísticos	Cantidad de modelos estadísticos utilizados	8	Verificación del procedimiento de validación de funciones de distribución (ajuste empírico con datos históricos o selección teórica fundamentada).
		9	Registro de modelos estadísticos empleados para predecir desviaciones en costos y plazos.
		10	Identificación de mejoras observadas en la gestión de riesgos al aplicar modelos estadísticos.

- | | |
|----|--|
| 11 | Registro del tipo de modelo estadístico aplicado (Regresión Lineal, Monte Carlo, ARIMA, ACP, otros) y su campo de aplicación. |
| 12 | Evaluación de si los modelos estadísticos utilizados reflejan de manera adecuada la incertidumbre y riesgos en los proyectos analizados. |
-

Anexo G. Matriz de validación variable 1

Variable	Dimensiones	Indicadores	Condicion	Opciones de respuesta				
				1. Muy en desacuerdo	2. En desacuerdo	3. Ni de acuerdo ni en	4. De acuerdo	5. Totalmente de
Metodología de análisis cuantitativo de riesgos	Técnicas de Análisis Cuantitativo	Técnicas Cuantitativas Utilizadas	Registro de técnicas cuantitativas aplicadas para estimación de costos y tiempos (ejemplo: Monte Carlo, Árboles de Decisión, SRA).					
			Identificación de técnicas cuantitativas avanzadas aplicadas (Monte Carlo, Inferencia Bayesiana, Modelos de Regresión), especificando software o herramienta utilizada.					
			Registro de la relación entre técnicas cuantitativas empleadas y los resultados de optimización de costos y tiempos en proyectos viales.					
			Documentación de simulaciones aplicadas (Monte Carlo, análisis de sensibilidad, optimización), indicando número de iteraciones y resultados principales.					
	Funciones de Distribución de Probabilidad	Cantidad de funciones de distribución de probabilidad utilizadas	Registro de las funciones de distribución empleadas en costos y tiempos (PERT, Triangular, Normal, Lognormal, Uniforme, etc.).					
			Identificación de impactos derivados de una selección inadecuada de funciones de distribución en costos o plazos.					
			Registro de la distribución utilizada en cada variable (Normal, Lognormal, Triangular u otras) y justificación técnica de la elección.					
			Verificación del procedimiento de validación de funciones de distribución (ajuste empírico con datos históricos o selección teórica fundamentada).					
	Modelos Estadísticos	Cantidad de modelos estadísticos utilizados	Registro de modelos estadísticos empleados para predecir desviaciones en costos y plazos.					
			Identificación de mejoras observadas en la gestión de riesgos al aplicar modelos estadísticos.					
			Registro del tipo de modelo estadístico aplicado (Regresión Lineal, Monte Carlo, ARIMA, ACP, otros) y su campo de aplicación.					
			Evaluación de si los modelos estadísticos utilizados reflejan de manera adecuada la incertidumbre y riesgos en los proyectos analizados.					

Anexo H. Ficha de recolección de datos, variable 1

FICHA DE RECOLECCION DE DATOS EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS EN PERÚ

Título de la investigación:

Metodología de análisis cuantitativo de riesgos para optimizar la estimación de costos y tiempos en la construcción de carreteras en Perú.

Proyecto / Caso de estudio: _____

Ubicación: _____

Fuente de información: (Estudio de ingeniería / Presupuesto / Cronograma / Informes técnicos)

Fecha de recolección: ____ / ____ / ____

Sección 1. Técnicas de Análisis Cuantitativo		
Ítem	Técnicas Cuantitativas Utilizadas	Registro de Datos
1	Técnicas aplicadas para estimación de costos y tiempos (ejemplo: Monte Carlo, Árbol de Decisión, SRA)	
2	Técnicas avanzadas aplicadas (Monte Carlo, Bayesiano, Regresión, etc.) y software empleado	
3	Relación entre técnica aplicada y optimización de costos/tiempos observada	
4	Simulaciones ejecutadas (tipo, número de iteraciones, resultados principales)	
Sección 2. Funciones de Distribución de Probabilidad (PDF)		
Ítem	Funciones de Distribución	Registro de Datos
5	Funciones aplicadas en costos y tiempos (PERT, Triangular, Normal, Lognormal, Uniforme, etc.)	
6	Efectos de una selección inadecuada de PDF sobre costos o plazos	
7	Distribución utilizada en cada variable y justificación técnica	
8	Procedimiento de validación (ajuste empírico / selección teórica)	
Sección 3. Modelos Estadísticos		
Ítem	Modelos Estadísticos Utilizados	Registro de Datos
9	Modelos aplicados para predecir desviaciones en costos/plazos	
10	Mejoras observadas en gestión de riesgos con modelos aplicados	
11	Tipo de modelo empleado (Regresión, Monte Carlo, ARIMA, ACP, otros) y ámbito de aplicación	
12	Evaluación de si el modelo refleja adecuadamente incertidumbre y riesgos	

Anexo I. Validación y confiabilidad de Instrumento – Variable 2

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO FICHA DE VALIDACIÓN DEL INSTRUMENTO DE INVESTIGACIÓN FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

I. DATOS GENERALES

- 1.1 APELLIDOS Y NOMBRES DEL EXPERTO: Gerber Zavala Ascaño
 1.2 GRADO ACADÉMICO: Doctor en Ingeniería Civil
 1.3 INSTITUCIÓN DONDE LABORA: Universidad Nacional Federico Villarreal
 1.4 TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN: *METODOLOGÍA DE ANÁLISIS CUANTITATIVO DE RIESGOS PARA OPTIMIZAR LA ESTIMACIÓN DE COSTOS Y TIEMPOS DE CARRETERAS EN PERÚ*
 1.5 AUTOR DEL INSTRUMENTO: Victor Andre Ariza Flores
 1.6 GRADO Y ESPECIALIDAD A OBTENER: Doctor en Ingeniería Civil
 1.7 NOMBRE DEL INSTRUMENTO: FICHA DE RECOLECCION DE DATOS
 1.8 CRITERIO DE APLICABILIDAD:
 a) De 01 a 09 (No válido, reformular). Deficiente: D
 b) De 10 a 12 (No válido, reformular). Regular: R
 c) De 13 a 15 (Válido, mejorar). Bueno: B
 d) De 16 a 18 (Válido, precisar). Muy bueno: MB
 e) De 19 a 20 (Válido, aplicar). Excelente: E

Indicadores de evaluación del instrumento	Criterios cualitativos y cuantitativos	01 a 09	10 a 12	13 a 15	16 a 18	19 a 20
1. Claridad	Está formulado con lenguaje apropiado.				18	
2. Objetividad	Está expresado con conductas observables.				18	
3. Actualidad	Adecuado al avance de la ciencia y la tecnología.				18	
4. Organización	Existe una organización y lógica.				18	
5. Suficiencia	Comprende los aspectos de cantidad y calidad.				18	
6. Intencionalidad	Adecuada para valorar los aspectos del estudio.				18	
7. Consistencia	Basado en el aspecto teórico, científico y del tema de estudio.				18	
8. Coherencia	Entre las variables, dimensiones e indicadores.				18	
9. Metodología	La estrategia responde al propósito del estudio.				18	
10. Conveniencia	Genera nuevas pautas para la investigación y construcción de teorías.				18	
Subtotal					180	
Promedio					18	

Valoración cuantitativa: DIECIOCHO

Valoración cualitativa: MB

Opinión de aplicabilidad: El instrumento es válido y se puede aplicar.

Lima, 03 de Abril de 2025

Anexo J. Matriz para la elaboración de instrumento, variable 2: Estimación de costos y tiempos

Dimensiones	Indicadores	Ítem	Descripción
Cuantificación de Contingencias de Costo	% Nivel de Confianza del Presupuesto	1	Registro del nivel de confianza asignado al presupuesto del proyecto (ej. 80%, 85%, 95%).
		2	Fuente utilizada para establecer el nivel de confianza (análisis estadístico, normativas locales, criterios empíricos).
		3	Registro de actualizaciones en los niveles de confianza durante la ejecución del proyecto.
		4	Identificación de si los niveles de confianza se alinean con estándares internacionales (AACE, PMI) o con prácticas locales.
	% Contingencia del Presupuesto	5	Registro del porcentaje de contingencia aplicado en el presupuesto.
		6	Método de cálculo del porcentaje de contingencia (modelos cuantitativos, criterios empíricos, referencias históricas).
		7	Registro de la variación de la contingencia en función del tipo de proyecto vial.

		8	Registro de ajustes realizados en la contingencia presupuestaria durante la ejecución del proyecto frente a imprevistos.
Proyección de Reservas de Tiempo	% Nivel de Confianza del Cronograma	9	Registro del nivel de confianza asignado a los cronogramas (ej. 70%, 80%, 90%).
		10	Método utilizado para establecer los niveles de confianza del cronograma (simulación, análisis histórico, juicio experto).
		11	Registro de actualizaciones en los niveles de confianza del cronograma conforme avanza el proyecto.
		12	Identificación de si los niveles de confianza se ajustan a prácticas internacionales de gestión de riesgos o solo a criterios locales.
	% Contingencia del Cronograma	13	Registro del porcentaje de contingencia aplicado al cronograma del proyecto.
		14	Método de cálculo de la contingencia en tiempo (simulación Monte Carlo, metodologías estadísticas, juicio experto).
		15	Registro de ajustes en las reservas de tiempo en función del progreso de la obra.
		16	Evaluación de la efectividad de las contingencias aplicadas en la reducción de impactos por retrasos.

Anexo K. Matriz de validación variable 2

Variable	Dimensiones	Indicadores	Pregunta	Opciones de respuesta				
				1. Muy en desacuerdo	2 .En desacuerdo	3. Ni de acuerdo ni en	4 .De acuerdo	5. Totalmente de
Estimación de costos y tiempos	Cuantificación de Contingencias de Costo	% Nivel de Confianza del Presupuesto	Registro del nivel de confianza asignado al presupuesto del proyecto (ej. 80%, 85%, 95%).					
			Fuente utilizada para establecer el nivel de confianza (análisis estadístico, normativas locales, criterios empíricos).					
			Registro de actualizaciones en los niveles de confianza durante la ejecución del proyecto.					
			Identificación de si los niveles de confianza se alinean con estándares internacionales (AACE, PMI) o con prácticas locales.					
		% Contingencia del Presupuesto	Registro del porcentaje de contingencia aplicado en el presupuesto.					
			Método de cálculo del porcentaje de contingencia (modelos cuantitativos, criterios empíricos, referencias históricas).					
			Registro de la variación de la contingencia en función del tipo de proyecto vial.					
			Registro de ajustes realizados en la contingencia presupuestaria durante la ejecución del proyecto frente a imprevistos.					
	Proyección de Reservas de Tiempo	% Nivel de Confianza del Cronograma	Registro del nivel de confianza asignado a los cronogramas (ej. 70%, 80%, 90%).					
			Método utilizado para establecer los niveles de confianza del cronograma (simulación, análisis histórico, juicio experto).					
			Registro de actualizaciones en los niveles de confianza del cronograma conforme avanza el proyecto.					
			Identificación de si los niveles de confianza se ajustan a prácticas internacionales de gestión de riesgos o solo a criterios locales.					
		% Contingencia	Registro del porcentaje de contingencia aplicado al cronograma del proyecto.					

		del Cronograma	Método de cálculo de la contingencia en tiempo (simulación Monte Carlo, metodologías estadísticas, juicio experto).					
			Registro de ajustes en las reservas de tiempo en función del progreso de la obra.					
			Evaluación de la efectividad de las contingencias aplicadas en la reducción de impactos por retrasos.					

Anexo L. Instrumento Ficha de Recolección de Datos, variable 2

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS- GESTIÓN DE RIESGOS EN PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS EN PERÚ

Título de la investigación:

Metodología de análisis cuantitativo de riesgos para optimizar la estimación de costos y tiempos en la construcción de carreteras en Perú.

Proyecto / Caso de estudio: _____

Ubicación: _____

Fuente de información: (Estudio de ingeniería / Presupuesto / Cronograma / Informes técnicos)

Fecha de recolección: ____ / ____ / ____

Dimensión: Cuantificación de Contingencias de Costo			
Indicador	Ítem	Dato a Registrar	Fuente de Verificación
% Nivel de Confianza del Presupuesto	1	Nivel de confianza asignado al presupuesto (ej. 80%, 85%, 95%)	Estudio de ingeniería / informe de costos
	2	Fuente del nivel de confianza (estadístico, normativa, criterio empírico)	Documento de presupuesto / normativa
	3	Actualizaciones del nivel de confianza durante la ejecución	Informes de avance / modificaciones contractuales
	4	Alineación con estándares internacionales (AACE, PMI) o locales	Documentos técnicos / informes comparativos
% Contingencia del Presupuesto	5	Porcentaje de contingencia aplicado	Presupuesto detallado

	6	Método de cálculo de la contingencia (simulación, empírico, histórico)	Informe de riesgos / presupuesto
	7	Variación del % de contingencia según tipo de proyecto vial	Presupuesto comparado por tipología
	8	Ajustes realizados durante la ejecución frente a imprevistos	Informes de control de obra
Dimensión: Proyección de Reservas de Tiempo			
Indicador	Ítem	Dato a Registrar	Fuente de Verificación
% Nivel de Confianza del Cronograma	9	Nivel de confianza del cronograma (ej. 70%, 80%, 90%)	Cronograma contractual / MS Project
	10	Método de cálculo (simulación, análisis histórico, juicio experto)	Informe de planificación
	11	Actualizaciones del nivel de confianza durante la ejecución	Informes de control / reprogramaciones
	12	Alineación con estándares internacionales o criterios locales	Comparación con guías (PMI, AACE, OSCE)
% Contingencia del Cronograma	13	Porcentaje de contingencia en tiempo	Cronograma contractual
	14	Método de cálculo de la contingencia en tiempo	Simulación / metodología aplicada

	15	Ajustes dinámicos en función del progreso de la obra	Informes de seguimiento
	16	Evaluación de la efectividad de las contingencias aplicadas	Resultados comparados (planificado vs real)

Anexo M. Guía para la Implementación del Análisis Cuantitativo de Riesgos

M.1 Objetivo y alcance

Este anexo describe, paso a paso, cómo implementar un análisis cuantitativo de riesgos (AQR) para estimar contingencias de costo (CAPEX/OPEX) y tiempo (SRA: Schedule Risk Analysis) en proyectos de carreteras. La guía cubre insumos, roles, modelado, simulación, validación, documentación y gobierno, con énfasis en escenarios con datos limitados y equipos con experiencia inicial en métodos probabilísticos.

M.2 Principios operativos

1. Trazabilidad: cada supuesto debe tener fuente y responsable.
2. Parcimonia: usar el menor número de parámetros que represente el fenómeno con fidelidad.
3. Consistencia costo–tiempo: coherencia entre estructura de costos y cronograma.
4. Convergencia: toda simulación debe evidenciar estabilidad de percentiles.
5. Reproducibilidad: modelos y datos deben permitir réplica independiente.

M.3 Roles y responsabilidades

- Líder de riesgos (LR): coordina el AQR, valida supuestos y aprueba entregables.
- Especialista de costos (EC): estructura CAPEX/OPEX, define partidas críticas.
- Planificador (PL): audita cronograma, define lógica, calendarios y WBS.
- Modelador cuantitativo (MQ): parametriza PDFs, corre simulaciones y verifica convergencia.

- Equipo experto (EE): aporta datos históricos, rangos 3-puntos y dependencias; valida salidas.
- Documentador (DO): controla versiones, minutas, plantillas y archivo técnico.

M.4 Insumos y calidad de datos

- Costos: presupuesto por WBS/partida, supuestos de metrados y precios, histórico de variaciones.
- Cronograma: WBS, secuencia lógica, duraciones deterministas, calendarios (clima), holguras.
- Riesgos: registro con evento, causa, probabilidad/impacto, dueño y respuesta.
- Contexto: estacionalidad (lluvias), accesos, geotecnia, requisitos ambientales y sociales.

Criterios mínimos: precisión de $\pm 10\%$ en metrados críticos; cronograma sin relaciones abiertas, solapes injustificados o calendarios incoherentes; registro de riesgos deduplicado.

M.5 Flujo de trabajo general

1. Definir alcance del AQR y unidad de análisis (tramos/contratos).
2. Preparar Estructura de Costos y Cronograma auditados.
3. Identificar riesgos de costo y tiempo; mapear a partidas/actividades.
4. Seleccionar PDFs y parametrizar (3-puntos o ajuste estadístico).
5. Modelar dependencias (correlaciones o “risk drivers”).
6. Simular (Monte Carlo para costo; SRA para tiempo).

7. Analizar salidas (P50, P80, P90/P95), sensibilidad (tornado) y rutas críticas probabilísticas.
8. Determinar contingencias y reservas; emitir recomendaciones.
9. Validar, documentar y establecer plan de actualización.

M.6 Implementación para costos

M.6.1 Estructura de costos y unidad de modelado

- Desagregar el CAPEX por WBS/partida con atributos: monto base, fuente, criticidad, riesgo asociado.
- Agrupar partidas homogéneas (p.ej., túneles, viaductos, movimientos de tierra); evitar agrupar partidas con comportamientos estadísticos disímiles.

M.6.2 Identificación y mapeo de riesgos de costo

- Para cada riesgo, especificar: driver (metrados, productividad, precio unitario, rendimientos, interferencias, clima, reclamos), mecanismo de transmisión y partidas impactadas.
- Distinguir incertidumbre de estimación (variabilidad base) de riesgos discretos (eventos con probabilidad <1).

M.6.3 Selección de funciones de distribución (PDFs)

- Triangular / Beta-PERT: cuando sólo se dispone de 3 puntos (mínimo, más probable, máximo).
- Normal: variaciones simétricas con posibilidad de valores por encima y debajo del promedio.
- Lognormal: costos estrictamente positivos con sesgo a la derecha.

- Uniforme: rango acotado sin evidencia de concentración.
- Ajuste de distribución: si hay datos históricos suficientes; aplicar K-S o A-D y elegir la mejor.

M.6.4 Parametrización

- Tres puntos: obtener min–MP–max por partida/rubro mediante datos históricos y juicio experto estructurado.
- Ajuste estadístico: estimar parámetros por máxima verosimilitud; registrar prueba de bondad de ajuste y p-valor.
- Documentar fuente de cada parámetro y fecha.

M.6.5 Dependencias y correlaciones

- Declarar correlaciones entre partidas con drivers comunes (p.ej., precio del acero, geotecnia compartida).
- Si el software lo permite, usar matrices de correlación o risk drivers que propaguen impactos a varias partidas.
- Mantener parcimonia: correlacionar solo donde exista causalidad clara.

N.6.6 Simulación Monte Carlo

- Iteraciones recomendadas: $\geq 10,000$; aumentar a 50,000–100,000 para estabilidad del P90/P95.
- Registrar semilla, iteraciones, número de variables aleatorias y tiempo de cómputo.
- Verificar convergencia: cambios $< 0.5\%$ en P90/P95 al aumentar N; estabilidad del histograma/estadísticos.

M.6.7 Determinación de contingencias

- Seleccionar percentil objetivo según apetito de riesgo/contrato (P80–P95 frecuente en obras lineales).
- Contingencia de costo = P_k – Base determinista. Distinguir contingencia (riesgos identificados) de reserva de gestión (incógnitas desconocidas).

N.6.8 Sensibilidad y focos de mitigación

- Emplear diagrama de tornado para identificar partidas que explican la mayor varianza.
- Priorizar medidas de ingeniería, abastecimiento o constructibilidad sobre factores dominantes.

M.7 Implementación para tiempos (SRA)

M.7.1 Auditoría del cronograma

- Revisar lógica (sin cuellos abiertos), holguras razonables, calendarios realistas, rutas críticas presentes.
- Eliminar vínculos innecesarios, duraciones “fijas” sin sustento y calendarios inconsistentes.

N.7.2 Incertidumbre en actividades (tres puntos)

- Asignar optimista–más probable–pesimista por actividad (PERT/triangular); sustentar con históricos y PPC (si se usa Last Planner System).
- Mapear riesgos discretos (clima extremo, interferencias, permisos) a paquetes de actividades con probabilidad/impacto.

M.7.3 Calendarios y estacionalidad

- Incluir calendarios climáticos (ventanas de lluvia) por zona/tramo.
- Evitar un único calendario si existen climas diferenciados.

M.7.4 Dependencias y correlación de duraciones

- Correlacionar actividades con mismo driver de rendimiento (p.ej., frentes de movimiento de tierras).
- Si se usa método de risk drivers, modelar eventos que al activarse impactan varias actividades.

M.7.5 Simulación y métricas

- Iteraciones: $\geq 10,000$; revisar convergencia de P80/P90.
- Reportar distribución de duración total, probabilidad de cumplir fecha y ruta crítica probabilística.
- Reserva de tiempo: diferencia entre fecha base y percentil objetivo (p.ej., P80).

N.7.6 Sensibilidad temporal

- Identificar actividades/caminos con mayor importancia crítica (frecuencia de criticidad $> X\%$).
- Focalizar controles en mantenimiento de tráfico, movimientos de tierra, túneles y actividades con calendarios restrictivos.

M.8 Integración costo–tiempo

- Alinear paquetes de trabajo del presupuesto con actividades del cronograma.
- Para escenarios integrados, vincular drivers (p.ej., clima) que afecten simultáneamente costo y tiempo.

- Evitar doble contabilización de un mismo riesgo en costo y tiempo.

M.9 Validación, verificación y calidad

- Bondad de ajuste: K-S o A-D cuando hay datos; si no, justificar uso de 3-puntos.
- Convergencia: documentar estabilidad de P80/P95 al aumentar N.
- Back-testing: contrastar con proyectos comparables; validar órdenes de magnitud.
- Revisión cruzada: LR/EC/PL revisan modelos y supuestos; EE valida salidas clave.

M.10 Gobernanza y control de cambios

- Versionar: vX.Y con fecha, cambios y responsables.
- Minutar todas las decisiones de PDFs, parámetros y correlaciones.
- Establecer puntos de control: fin de ingeniería, prelicitación, adjudicación, rebase de contingencia.

M.11 Implementación por fase del ciclo de vida

- Perfil/Prefactibilidad: rangos amplios, PDFs 3-puntos, P90/P95.
- Factibilidad/Expediente: calibración con pruebas de campo; posible ajuste de distribución.
- Licitación: contingencias coherentes con asignación contractual de riesgos.
- Ejecución: actualización periódica; re-simular ante cambios mayores; burndown de riesgo.

M.12 Recomendaciones para contextos con datos limitados

- Priorizar Triangular/Beta-PERT con 3-puntos trazables.

- Incorporar expertos con experiencia directa en tramos y tecnologías constructivas.
- Usar calendarios climáticos por región; parametrizar productividad por altitud y accesos.
- Empezar con correlaciones esenciales (geotecnia, precios clave), no modelar dependencias espurias.

M.13 Entregables mínimos

- Libro de supuestos (costos/tiempos, PDFs, parámetros, fuentes).
- Modelo de simulación con seed, N, matrices de correlación.
- Reporte de resultados: P50/P80/P90/P95, contingencias, sensibilidad (tornado), rutas críticas probabilísticas, recomendaciones.
- Plan de actualización y criterios de re-cálculo.

M.14 Riesgos de implementación frecuentes y mitigación

- Sobreparametrización → simplificar PDFs y dependencias.
- Cronogramas no auditados → auditar antes de simular.
- Duplicidad de riesgos (costo/tiempo) → matriz de trazabilidad.
- Falsa precisión (N alto sin datos) → documentar límites y supuestos.
- No convergencia → aumentar N y revisar PDFs/correlaciones.

M.15 Plan de capacitación

- Módulos: fundamentos de probabilidad, selección de PDFs, Monte Carlo, SRA, lectura de salidas y toma de decisiones.
- Taller con caso real del proyecto; roles LR/EC/PL/MQ.

M.16 Métricas de éxito

- Técnicas: estabilidad de P80/P95 ($<0.5\%$ al aumentar N), % riesgos con PDF trazable, bondad de ajuste cuando aplica.
- De gestión: reducción de desviación costo/plazo vs. líneas base anteriores, adopción de medidas sobre elementos del tornado, frecuencia de cumplimiento de hitos en P80.

M.17 Consideraciones éticas y legales

- Transparencia en supuestos y tratamiento de incertidumbre.
- Consistencia con marco normativo aplicable (gestión de riesgos exigida, bases de contratación, asignación de riesgos).
- Resguardo de datos sensibles y de terceros.

M.18 Referencias técnicas sugeridas (no exhaustivas)

Guías y prácticas de gestión de riesgos de proyectos (PMI/PMBOK), prácticas recomendadas AACE para contingencias y SRA, manuales de software de simulación (@RISK, Oracle Primavera Risk Analysis, Safran Risk), literatura técnica sobre PDFs (Normal, Lognormal, Triangular, Beta-PERT), pruebas de bondad de ajuste (K-S, A-D) y metodologías de correlación/risk drivers.

Anexo N. Cálculos específicos para los proyectos materia de investigación.

El Anexo M compila los cálculos específicos realizados para los tres proyectos materia de estudio (Proyecto I, Proyecto II y Proyecto III), diferenciando costos (CAPEX) y plazos. Para costos, se documenta la parametrización de las funciones de distribución de probabilidad (Beta PERT, Triangular, Uniforme y, cuando corresponde, Lognormal), los rangos mínimo–más probable–máximo por partida/coste agregado, y la configuración de la Simulación de Monte Carlo con corridas de 5,000; 10,000; 50,000 y 100,000 iteraciones. Se reportan medidas de tendencia y dispersión, percentiles P50/P80/P95, y los resultados del análisis de sensibilidad (diagramas de tornado) que identifican los principales aportantes a la varianza del presupuesto.

Para plazos, se presenta el Schedule Risk Analysis (SRA) a partir del cronograma base (WBS, lógicas y calendarios), modelado con PERT de tres puntos. La obtención de los tres puntos se realiza mediante el indicador PPC (Last Planner System) transformado a factor de duración con $1/PPC$ (PPC en fracción), asignando el valor optimista al PPC máximo observado, el más probable al promedio histórico y el pesimista al mínimo. Se incluyen intervalos de confianza, percentiles de duración del proyecto y el tornado de actividades críticas con mayor contribución a la variabilidad del plazo.

En todos los casos se consignan supuestos y parámetros de entrada (unidades, moneda y fecha de base, calendarios de trabajo, ventanas climáticas), versiones de archivos utilizados (p. ej., MS Project y @Risk) y criterios de convergencia de simulación (variación relativa $<0.5\%$ en P50/P95).