



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**VARIABILIDAD EN VALORIZACIÓN DE ACTIVOS VIALES: APLICACIÓN PARA
PUENTES**

POR

Guillermo Alonso Ramírez Jaque

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero(a) Civil

Profesor(es) Guía
Tomás Echaveguren Navarro

Comisión Supervisora
Juan Antonio Carrasco

Julio 2023
Concepción, Chile

© 2023 Guillermo Alonso Ramírez Jaque

© 2023 Guillermo Alonso Ramírez Jaque

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

RESUMEN

La valorización de activos viales consiste en la determinación de su valor económico mediante métodos establecidos por las agencias responsables de su gestión. Estos métodos usualmente utilizan el costo, la vida útil y la condición del activo. Para el desarrollo de esta investigación se utiliza un modelo de valorización para puentes Elemental Decomposition and Multi-Criteria (EDMC) modificado, el cual corresponde a un modelo de flujo de valor el cual valoriza al activo vial componente a componente considerando la perspectiva tanto del usuario como de la agencia vial. Las variables y parámetros del modelo de valorización presentan incertidumbre en su determinación la cual se expresa como variabilidad en el valor del activo.

En este trabajo se cuantifica la incertidumbre presente en el modelo de valorización. Para ello, se desarrolló un procedimiento el cual consiste en dos etapas: una primera etapa donde se identifican y caracterizan las fuentes de incertidumbre presente en las variables y parámetros del modelo de valorización; y una segunda etapa donde se cuantifica la incertidumbre.

Las variables que poseen incertidumbre son la vida útil, el costo de reemplazo y la calificación de condición, mientras que los parámetros que poseen incertidumbre son los pesos relativos y los umbrales de condición. Se caracterizó incertidumbre presente en las variables y parámetros, y se asignaron distribuciones de probabilidad como la triangular, PERT y uniforme.

Se seleccionaron y analizaron 45 puentes de la red vial nacional categorizándolos según los criterios de longitud, condición y edad. La cuantificación de la incertidumbre se realizó a través de análisis de variabilidad y reducción de variabilidad con ayuda de simulaciones de Monte Carlo. Se concluyó que la variabilidad resultante aumenta a medida que disminuye la calificación de condición del puente, en cambio la longitud y edad del puente tienen una influencia menor en la variabilidad resultante. También se concluyó que reducir la variabilidad en la vida útil genera una disminución de la variabilidad resultante promedio en hasta un 40% en puentes sobre los 50 años; reducir la variabilidad en los costos de reemplazo disminuye la variabilidad resultante promedio en hasta un 47% en puentes con condición alta; reducir la variabilidad en la calificación de condición genera cambios menores al 5% en la variabilidad resultante.

ABSTRACT

Road asset valuation involves determining their economic value through methods established by the agencies responsible for their management. These methods usually use the cost, service life and asset condition. For the development of this research, a modified Elemental Decomposition and Multi-Criteria (EDMC) valuation model for bridges is used. This model represents a value stream model which valorizes the road asset component by component according to both the user and the road agency's perspective. The variables and parameters of the valuation model present uncertainty in their determination, which is expressed as variability in the asset value.

This work quantifies the uncertainty present in the valuation model. To achieve this, a procedure was developed consisting of two stages: the first stage involves identifying and characterizing the sources of uncertainty present in the variables and parameters of the valuation model; the second stage involves quantifying the uncertainty.

The variables of the valuation model that present uncertainty are service life, replacement cost, and condition rating, while the parameters that exhibit uncertainty are relative weights and condition thresholds. The uncertainty present in the variables and parameters was characterized. Probability distributions such as triangular, PERT and uniform were assigned.

A total of 45 bridges from the national road network were selected and analyzed, categorized according to criteria such as bridge length, condition rating, and age. The uncertainty quantification was carried out through variability analysis and variability reduction analysis using Monte Carlo simulations. It was concluded that the resulting variability increases as the bridge condition rating decreases, while the length and age of the bridge have a lesser influence on the resulting variability. It was also concluded that reducing the variability in service life leads to an average reduction of up to 40% in resulting variability for bridges over 50 years old; reducing variability in replacement costs decreases average resulting variability by up to 47% for bridges in high condition; reducing the variability in the condition rating generates minor changes of less than 5% in the resulting variability.

ÍNDICE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivo general	1
1.3 Objetivos específicos.....	2
1.4 Metodología	2
1.5 Principales resultados	2
1.6 Organización del documento.....	3
CAPÍTULO 2: VALORIZACIÓN E INCERTIDUMBRE EN PUENTES.....	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Características generales de puentes	5
2.3 Valorización de activos viales.....	9
2.4 Métodos de valorización.....	10
2.5 Modelo de valorización EDMC modificado	13
2.6 Incertidumbre y variabilidad en activos viales	17
2.7 Conclusiones.....	21
CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE INCERTIDUMBRE	22
3.1 Introducción.....	22
3.2 Caracterización y cuantificación de incertidumbre en valorización de puentes.....	22
3.3 Identificación de fuentes de incertidumbre y variabilidad	23
3.4 Variabilidad en el costo de reemplazo.....	24
3.5 Variabilidad en la calificación condición	25
3.6 Variabilidad en la vida útil	27

3.7 Variabilidad en los parámetros del modelo de valorización EDMC modificado.....	28
3.8 Resumen de distribuciones de probabilidad asignadas	29
3.9 Análisis de variabilidad	30
3.10 Análisis de reducción de variabilidad.....	31
3.11 Criterios para la selección de puentes	32
3.12 Conclusiones.....	33
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS DE VARIABILIDAD EN VALORIZACIÓN DE PUENTES	35
4.1 Introducción.....	35
4.2 Selección de puentes y matriz de casos de análisis	35
4.3 Variables y parámetros de puentes seleccionados.....	37
4.4 Resultados de análisis de variabilidad para puentes seleccionados.....	42
4.5 Análisis de efecto de reducción de variabilidad	49
4.6 Conclusiones.....	52
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	53
REFERENCIAS	55
ANEXOS.....	58
ANEXO 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	58
ANEXO 2.1 Definición del modelo de flujo “Elemental Decomposition and Multi-Criteria”	59
ANEXO 3.1 Método de calificación de condición I3MOP.....	62
ANEXO 3.2 Incorporación de variabilidad a la calificación de condición	70
ANEXO 3.3 Determinación de ICA’	74
ANEXO 4.1 Estructuras ingresadas a la matriz de casos de análisis	75
ANEXO 4.2 Información general de puentes seleccionados en matriz de análisis.....	76
ANEXO 4.3 Resultados de análisis de variabilidad.....	77

ANEXO 4.4 Resultados de análisis de reducción de variabilidad	78
REFERENCIAS DE ANEXOS	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Activos que componen la red vial nacional.	4
Tabla 2.2 Componentes y elementos de los puentes.	5
Tabla 2.3 Modelos de valorización según valor constante, depreciación y flujo de valor.....	9
Tabla 2.4 Distribución de costo de reemplazo por componente	14
Tabla 2.5 Recopilación de vidas útiles.....	14
Tabla 3.4 Rangos de valores de umbrales de condición para cada componente de un puente o paso superior.....	27
Tabla 3.5 Distribuciones de probabilidad de variables y parámetros del modelo.....	28
Tabla 4.1 Matriz factorial de casos de análisis.....	34
Tabla 4.2 Estadísticos representativos de los análisis de variabilidad	45
Tabla 4.3 Variación porcentual de desviación estándar en escenarios de reducción de variabilidad con respecto a escenario base.....	47
Tabla A.3.1.1 Variables que inciden en la estimación de la condición del puente	58
Tabla A.3.1.2 Rangos de calificación de condición global del puente)	59
Tabla A.3.1.3 Tablas de pesos de ponderación por “Extensión” y “Gravedad”	60
Tabla A.3.1.7 Tablas de peso de ponderación por Deterioro	64
Tabla A.3.2.1 Cd de deterioro tipo según extensión y gravedad	67
Tabla A.3.2.2 Cd de deterioro tipo según extensión y gravedad con $Pc = 0,99$	68
Tabla A.3.2.3 Cd de deterioro tipo según extensión y gravedad con $Pc = 0,85$	68
Tabla A.4.1.1 Estructuras ingresadas a la matriz de casos de análisis	71
Tabla A.4.2.1 Información general de puentes seleccionados en matriz de análisis	72
Tabla A.4.3.1 Resultados de análisis de variabilidad de puentes seleccionados	73
Tabla A.4.3.1 Variación en desviación estándar en escenarios de análisis de reducción de variabilidad de puentes seleccionados.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Componentes valorizables de puentes	6
Figura 2.2 Flujo de valor de un activo vial	10
Figura 2.3 Caracterización de una distribución de probabilidad.....	17
Figura 2.4 Proceso de una iteración de Monte Carlo	19
Figura 3.1 Procedimiento para caracterizar y cuantificar la incertidumbre en valorización de puentes	22
Figura 3.2 Representación esquemática del método de calificación de condición de puentes utilizado en Chile	25
Figura 4.1 Variables de puentes con largo: 10-40m; edad: <25años; ICA': 80-100.....	35
Figura 4.2 Variables de puentes con largo: 10-40m; edad: 25-50 años; ICA': 80-100.....	36
Figura 4.3 Variables de puentes con largo: 10-40m; edad: >50 años; ICA': 80-100.....	36
Figura 4.4 Variables de puentes con largo: 10-40m; edad: >50 años; ICA': 60-79.....	36
Figura 4.5 Variables de puentes con largo: 40-200m; edad: <25años; ICA': 80-100.....	37
Figura 4.6 Variables de puentes con largo: 40-200m; edad: 25-50 años; ICA': 80-100.....	37
Figura 4.7 Variables de puentes con largo: 40-200m; edad: 25-50 años; ICA': 60-79.....	37
Figura 4.8 Variables de puentes con largo: 40-200m; edad: >50 años; ICA': 60-79.....	38
Figura 4.9 Variables de puentes con largo: >200m; edad: <25años; ICA': 80-100.....	38
Figura 4.10 Variable de vida útil para puentes seleccionados	39
Figura 4.13 Valorización de puentes con largo: 10-40m; edad: 25-50 años; ICA': 80-100.....	41
Figura 4.14 Valorización de puentes con largo: 10-40m; edad: >50 años; ICA': 80-100.....	41
Figura 4.15 Valorización de puentes con largo: 10-40m; edad: >50 años; ICA': 60-79.....	42
Figura 4.16 Valorización de puentes con largo: 40-200m; edad: <25años; ICA': 80-100.....	42
Figura 4.17 Valorización de puentes con largo: 40-200m; edad: 25-50 años; ICA': 80-100.....	43
Figura 4.18 Valorización de puentes con largo: 40-200m; edad: 25-50 años; ICA': 60-79.....	43

Figura 4.19 Valorización de puentes con largo: 40-200m; edad: >50 años; ICA': 60-79.....	44
Figura 4.20 Valorización de puentes con largo: >200m; edad: <25años; ICA': 80-100.....	44
Figura A.3.1.1 Representación esquemática del método de calificación propuesto	59

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Los activos viales son todos aquellos elementos que conforman la infraestructura vial y permiten la entrega de un servicio adecuado y de calidad a los usuarios. Dentro de los activos viales se encuentran los puentes, estructuras consideradas como críticas dentro de la red vial, ya que su colapso o imposibilidad de entregar servicio podría dejar a los usuarios sin conectividad al resto de la red.

La valorización de activos viales consiste en la determinación de su valor económico mediante modelos acordes a las exigencias y objetivos de la agencia responsable de la gestión de los activos. Estos modelos usualmente consideran las características del activo como lo son el costo, la vida útil y la condición.

Para el desarrollo de esta investigación se utiliza un modelo de valorización para puentes basado en el modelo Elemental Decomposition and Multi-Criteria o EDMC (Dojutrek *et al.*, 2014). Este método valoriza el activo vial componente a componente considerando la perspectiva tanto del usuario como de la agencia vial.

Generalmente, la valorización de activos viales se realiza de manera determinística, siendo que en la realidad las variables y parámetros utilizados en los modelos de valorización presentan incertidumbre. Esta incertidumbre se propaga al valor del activo produciendo variabilidad. Para abordar esto, es necesario verificar la influencia de la incertidumbre presente en las variables y parámetros del modelo en el valor del activo, como también la magnitud de esta en el valor calculado.

El Anexo 1.1 muestra la contribución de la Memoria de Título a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

1.2 Objetivo general

Cuantificar la incertidumbre presente en el modelo EDMC de valorización de puentes.

1.3 Objetivos específicos

- a) Identificar las fuentes de incertidumbre presente en las variables y parámetros del modelo de valorización.
- b) Caracterizar numérica y estadísticamente las fuentes de incertidumbre identificadas.
- c) Estimar la magnitud e incidencia de la incertidumbre en la valorización de puentes.

1.4 Metodología

Se definió una metodología con los siguientes pasos: revisión del estado del arte, caracterización de la incertidumbre y cuantificación de la incertidumbre. Primero, se abordó el marco teórico relacionado a los puentes, la valorización de activos viales, los tipos de modelos de valorización, la existencia de incertidumbre y variabilidad en la valorización de activos y, además, se planteó el modelo de valorización de puentes propuesto para el desarrollo de los resultados. Luego, se identificaron y caracterizaron las variables y parámetros sujetos a incertidumbre dentro del modelo de valorización, y se plantearon los pasos para cuantificar la incertidumbre en la valorización de los activos. Posteriormente, se seleccionaron 45 puentes categorizándolos de acuerdo con los criterios de longitud, edad y calificación de condición. Finalmente, con la ayuda de simulaciones de Monte Carlo se realizaron los análisis de variabilidad y reducción de variabilidad obteniendo el comportamiento de la variabilidad resultante.

1.5 Principales resultados

La incertidumbre existente en la valorización de puentes está presente en las variables de vida útil, costo de reemplazo y calificación de condición. Las fuentes de incertidumbre de dichas variables corresponden a: el comportamiento de la estructura, la adecuación de modelos utilizados, las inspecciones visuales y la recolección de datos. De igual manera, existe incertidumbre en el

comportamiento del modelo de valorización si a este se le asignan distintas combinaciones de valores a sus parámetros. La incertidumbre presente en el modelo genera variabilidad en el valor de los puentes.

De la totalidad de estructuras valorizadas, se concluyó que: la variabilidad resultante aumenta a medida que disminuye la calificación de condición del puente, mientras que la longitud y edad tienen una influencia menor en la variabilidad resultante. También se concluyó que reducir la variabilidad en la vida útil genera una disminución de la variabilidad resultante promedio en hasta un 40% en puentes sobre los 50 años, reducir la variabilidad en los costos de reemplazo disminuye la variabilidad resultante promedio en hasta un 47% en puentes con condición alta, y reducir la variabilidad en la calificación de condición genera cambios menores al 5% en la variabilidad resultante.

1.6 Organización del documento

Este trabajo se subdivide en cinco capítulos más una sección de anexos. En el primer capítulo se definen la motivación, objetivos, metodología del trabajo y principales resultados. En el segundo capítulo se define el objeto de estudio, se aborda la valorización de activos, se indican los tipos de modelos de valorización y se presenta el modelo de valorización propuesto para puentes. Además, se define la incertidumbre y variabilidad, y como representar y cuantificarla.

En el tercer capítulo se identifican y caracterizan las variables y parámetros que presentan incertidumbre, se entregan los pasos para cuantificar dicha incertidumbre y se establecen los criterios para la selección de puentes. En el cuarto capítulo se seleccionan los puentes a analizar, se incorpora variabilidad a las variables y parámetros, se ejecutan los análisis de variabilidad y los análisis de reducción de variabilidad a los puentes seleccionados.

En el quinto capítulo, se presentan las conclusiones generales que se obtuvieron de cada capítulo, en particular el tercero y cuarto capítulo correspondientes al procedimiento para la caracterización y cuantificación de incertidumbre, y a los resultados obtenidos.

Finalmente, en los anexos se define el modelo de valorización de activos EDMC, se describe el método de calificación de condición y el método para incorporarle variabilidad, la determinación del ICA' y las tablas con la información general de los puentes y los cálculos realizados.

CAPÍTULO 2: VALORIZACIÓN E INCERTIDUMBRE EN PUENTES

2.1 Introducción

En el presente capítulo se detalla el concepto de activo vial y las características de los puentes. Luego, se aborda la valorización de activos viales, los tipos de modelos de valorización y el modelo de valorización propuesto para el desarrollo de esta investigación. Finalmente, se plantea la presencia de incertidumbre y variabilidad en los activos viales y como esta se aborda en la valorización de activos.

2.2 Características generales de puentes

2.2.1 Activos Viales

La norma ISO 55000 (ISO, 2014) define a un activo como *“algo que posee valor potencial o real para una organización”*. Dentro de los activos viales, ese “algo” que posee valor corresponde a todos aquellos elementos de la infraestructura vial que le permiten prestar un servicio adecuado a sus usuarios cumpliendo con un nivel de calidad.

Dentro de los activos viales se encuentran, por un lado, la infraestructura u obras viales tales como las carreteras, puentes, túneles, etc. y por otro, a los equipamientos, procesos tecnológicos, personal y sistemas de información asociados. En su conjunto, todos estos activos forman parte de la red vial nacional y se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Activos que componen la red vial nacional. (Adaptado de MOP, 2021b)

Categoría	Activo
Infraestructura vial	Camino
	Vías de Servicio (Caleteras)
	Puente
	Viaducto
	Paso Superior
	Túnel
	Trinchera
	Cobertizo
	Enlace
Otros activos	Máquinas y equipos de ingeniería
	Stock de material
	Personal
	Licencias, softwares, bases de datos, etc

2.2.2 Definición de Puente

Son obras viales destinadas a permitir la continuidad de un camino de uso público sobre un obstáculo. Específicamente, son aquellos que sobrepasan obstáculos naturales, tales como ríos, mar, esteros, lagos, etc. (MOP, 2021b). En este tipo de activos, se deben distinguir claramente una superestructura y una infraestructura.

2.2.3 Componentes y elementos

De manera general se pueden distinguir cuatro partes que constituyen a estas obras; superestructura, infraestructura, accesos y obras de defensa. Cada uno de estos componentes incluye los diferentes elementos que se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Componentes y elementos de los puentes. (MOP, 2021b)

Componente	Elemento
Infraestructura	Estribo
	Cepa
	Pilote
	Dado de fundación
Superestructura	Piso
	Tablero
	Viga
	Losa
	Pasillo
	Baranda
Accesos	Losa acceso
	Terraplén
Obras de defensa y seguridad	Gaviones
	Enrocados
	Barrera

Por otro lado, se consideran como componentes valorizables aquellos que son de difícil reemplazo, es decir: estribos, cepas, tablero y accesos incluyendo a todos sus elementos constitutivos. Los componentes anteriormente mencionados se presentan en la Figura 2.1, y se definen de la siguiente manera:

- a) Estribos: estructuras que conforman los apoyos extremos del puente y enlazan el camino a éste. Están constituidos por una elevación conformada por un muro frontal, una mesa de apoyo, un muro espaldar y las alas, además de la fundación encargada de traspasar la carga al terreno.
- b) Cepas: son los apoyos intermedios de los puentes, y al igual que los estribos, están constituidos por la elevación y la fundación.
- c) Tablero: es la parte del puente que permite la continuidad del camino. Está constituido por un sistema estructural el cual permite la transmisión de las cargas hacia la infraestructura.
- d) Accesos: permiten el ingreso al puente enlazando al camino. Están constituidos generalmente por terraplenes de acceso, estructura de pavimento, bases, bermas y losas de acceso.

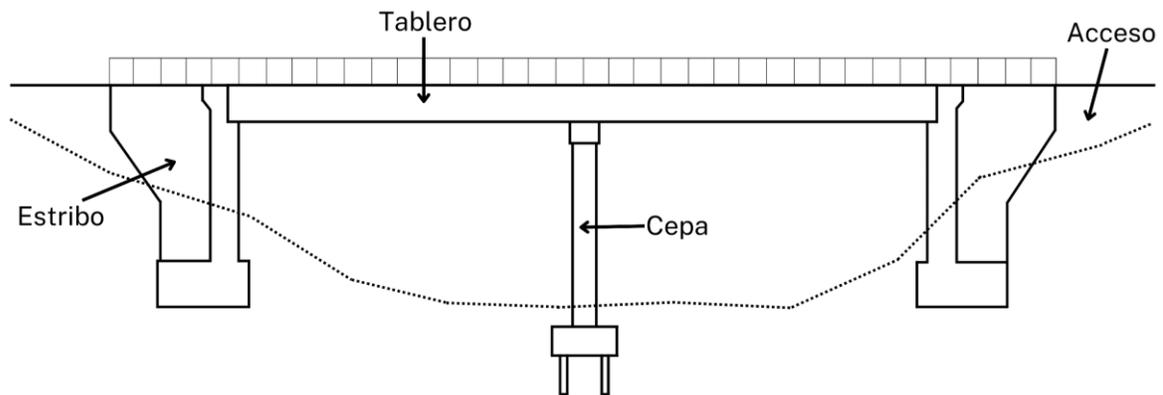


Figura 2.1 Componentes valorizables de puentes. (Adaptado de MOP, 2021a)

2.2.4 Clasificación de puentes

Según la Dirección de Vialidad a través del Manual de Carreteras (MOP, 2021a) se pueden establecer diferentes criterios de clasificación de las estructuras.

El Manual de Carreteras (MOP, 2021a) clasifica a los puentes en base a su longitud total (L):

- Alcantarillas y Puentes Losas: $0.5 \text{ m} < L < 10.0 \text{ m}$
- Puentes Menores: $10 \text{ m} < L < 40 \text{ m}$
- Puentes Medianos: $40 \text{ m} < L < 200 \text{ m}$
- Puentes Mayores $200 \text{ m} < L$

De igual manera, el Manual de Carreteras (MOP, 2021a) clasifica a los puentes según su diseño o estructuración:

- Puentes de tramos simplemente apoyados, continuos o de vigas voladizas (Gerber)
- Puentes en arco
- Puentes apuntalados
- Puentes aporticados
- Puentes colgantes
- Puentes atirantados

Finalmente, el Manual de Carreteras (MOP, 2021a) clasifica los puentes según la materialidad de los distintos componentes:

- De madera
- De acero
- De hormigón armado
- De hormigón pretensado
- De acero estructural de corrugación profunda
- De mampostería y sillería
- Puentes mixtos

2.3 Valorización de activos viales

La valorización de activos es una herramienta que forma parte de la gestión de activos viales. Esta consiste en la determinación de valor económico de un activo a través de modelos establecidos por la agencia o administradores encargados de su gestión. Estos modelos deben contemplar por un lado las características propias del activo que se desea valorizar, y por otro cumplir con los requisitos y objetivos que estime necesarios su administrador.

El valor es una medida subjetiva que debe ser acompañada de un contexto de tiempo, lugar, potenciales dueños y usuarios (Alyami, 2017; Dewan & Smith, 2005) . El enfoque o perspectiva con la cual se calcule el valor debe reflejar el propósito de este valor, ya que diferentes enfoques pueden estimar valores significativamente diferentes para un mismo activo en un mismo tiempo de análisis. Las agencias de transporte valorizan sus activos basados en su construcción, mantención y rehabilitación; los usuarios basan su valorización en las operaciones del tráfico, demoras, accidentes, emisiones y comodidad; y la sociedad valoriza la vialidad en base al impacto socioeconómico asociado (Hoang *et al.*, 2020).

Los beneficios de valorizar la infraestructura e incluirla en un sistema de gestión de activos son ampliamente discutidos en la literatura: ser utilizada para justificar y respaldar las decisiones en la

gestión de activos; ser un indicador que puede ayudar a transparentar y rendir cuentas del trabajo de las agencias gestoras a los dueños de estos activos; ser usada como justificación para la petición de financiamiento y demostración del uso correcto de presupuestos gubernamentales (Alyami, 2017; Alyami & Tighe, 2016; Dewan & Smith, 2005; Dojutrek *et al.*, 2012).

2.4 Métodos de valorización

Existen diversas clasificaciones para los métodos de valorización de activos viales. En la literatura, generalmente son clasificados de acuerdo con el periodo de tiempo para el cual se valoriza el activo (Amekudzi *et al.*, 2002) o según el enfoque o perspectiva la cual se aborda la valorización (Dojutrek *et al.*, 2012).

Otra forma de clasificación consiste en diferenciar los métodos según el tipo de modelo de valorización, siendo estos: modelos de valor constante, los cuales igualan el valor del activo a un costo particular, como el de reemplazo o histórico de construcción; modelos de depreciación o pérdida de valor, los cuales distribuyen un monto depreciable a lo largo del tiempo de análisis de acuerdo a una tasa de depreciación; y los modelos de flujo de valor, los cuales permiten modificar el valor del activo de acuerdo a las acciones de mantenimiento o rehabilitación realizadas. En la Tabla 2.3 se recopilan modelos de valorización de acuerdo con los tipos de modelos planteados.

Tabla 2.3 Modelos de valorización según valor constante, depreciación y flujo de valor

Tipo de modelo	Modelo de valorización
Modelo de valor constante	Costo de reemplazo
	Costo histórico
	Costo de reemplazo ajustado
Modelo de depreciación	Depreciación lineal
	Depreciación sigmoideal
	Suma de dígitos anuales
	Suma reversa de dígitos anuales
	Balance de declinación
	Doble balance de declinación
Modelo de flujo de valor	Valor fijo con respecto a la condición límite
	Valor ajustado con respecto a la condición limite
	Costo de reemplazo escrito
	Elemental Decomposition and multi-criteria
	Valor neto de rescate

2.4.1 Modelos de depreciación

Los modelos de depreciación consisten en una forma de depreciación a la cual se somete el activo. AUSTRROADS (2018) define depreciación como la distribución sistemática del monto depreciable de un activo a lo largo de su vida útil. Este monto depreciable considerado como pérdida de valor es producto de la degradación física o funcional del activo, siendo representado a través de un patrón o forma la cual expresa matemáticamente esta degradación.

Para la mayoría de los activos viales la depreciación es más lenta al inicio, más rápida en los años intermedios y finalmente lenta otra vez al final de la vida útil (CPA Australia, 2016; Dewan & Smith, 2005; Falls *et al.*, 2005). De acuerdo con los modelos planteados en la Tabla 2.3, los que mejor representan la depreciación de los activos viales son la suma reversa de dígitos anuales (SDAI) (Gyamfi-Yeboah & Ayitey, 2009) y la depreciación sigmoideal (Amekudzi-Kennedy *et al.*, 2019; Dojutrek *et al.*, 2012; Falls, 2004).

2.4.2 Modelos de flujo de valor

Los modelos de flujo de valor representan el valor del activo año a año a lo largo de un cierto periodo de análisis. Permiten reflejar todos los cambios en el valor debido a cambios en la condición de los componentes como consecuencia de las mantenciones, la pérdida de valor debido al paso del tiempo y al aumento de valor debido a las expansiones y rehabilitaciones. En la Figura 2.4 se representa esquemáticamente el flujo de valor de un activo vial a lo largo del tiempo.

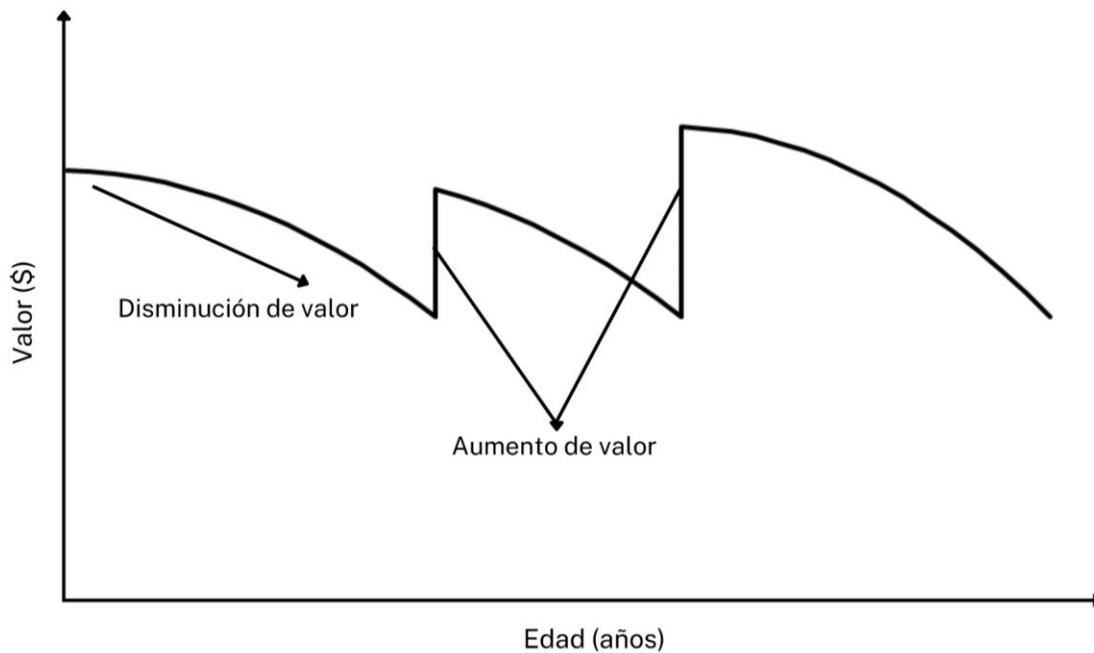


Figura 2.2 Flujo de valor de un activo vial

En la Figura 2.4 se observa que el punto inicial corresponde al valor inicial del activo. Este disminuye debido al paso del tiempo y a la pérdida de condición. Luego, se generan dos aumentos de valor de acuerdo con las mantenciones, rehabilitaciones y/o expansiones realizadas respectivamente. Finalmente, el valor vuelve a disminuir de acuerdo con el envejecimiento y pérdida de condición.

2.4.3 Modelo de valorización “Elemental Decomposition and Multi-Criteria”

Dojutrek *et al.* (2012) identificaron las limitaciones asociadas a los modelos de valorización de activos viales. La primera limitación es considerar al activo como una estructura monolítica asumiendo implícitamente una forma de deterioro única a lo largo de todos los diferentes elementos constitutivos del activo. En la realidad, los puentes son estructuras complejas que comprenden diferentes elementos con sus propias materialidades y diseños, teniendo diferentes estados de deterioro o condición en cada uno de sus diferentes elementos.

La segunda limitación identificada es que las expresiones matemáticas de los modelos solo consideran la condición del activo (la cual refleja la perspectiva del usuario) o la vida útil del activo (la cual refleja la perspectiva de la agencia). Sin embargo, tanto los usuarios como la agencia vial son partes interesadas clave en el desempeño del activo, por lo que es prudente incorporar ambas perspectivas en el modelo de valorización.

De esta manera Dojutrek *et al.* (2014) proponen el modelo de flujo de valor llamado “Elemental Decomposition and Multi-Criteria” (EDMC), el cual por una parte descompone al activo en distintos elementos valorizables, y por otra considera las perspectivas de valorización del usuario y de la agencia vial. El desarrollo matemático del modelo EDMC se detalla en el Anexo 2.1.

2.5 Modelo de valorización EDMC modificado

El modelo de valorización EDMC modificado es un modelo de flujo de valor adaptado a los puentes de la red vial nacional. El modelo se basa en el EDMC original incorporando las siguientes consideraciones:

- Debido al comportamiento de los activos viales, se reemplaza la depreciación lineal establecida por una forma de depreciación del tipo suma reversa de dígitos anuales.
- Los elementos valorizables que componen al activo serán llamados componentes, siendo estos: estribos, cepas, tablero y accesos.

- El costo que se utilizará será los de reemplazo de cada componente.
- La vida útil del puente será considerada como la vida útil de cada uno de los componentes.
- El valor numérico de los parámetros del modelo de valorización son calibrados por la agencia gestora.

La Ecuación 2.1 muestra el modelo de valorización EDMC modificado, donde se expresan los cambios en la formulación matemática respecto a la formulación del EDMC original planteado en el Anexo 2.1.

$$V_t = \sum_i V_i = w_u \left(CR_i \left(\frac{P_{t,i} - P_{peor,i}}{P_{mejor,i} - P_{peor,i}} \right) \right) + w_a \left(CR_i - \left(CR_i \frac{t(t+1)}{T(T+1)} \right) \right) \quad (2.1)$$

Donde:

V_t : Valor del activo en el año t (\$).

w_u : Peso relativo de la importancia de la pérdida de valor por condición.

w_a : Peso relativo de la importancia de la pérdida de valor por edad.

CR_i : Costo de reemplazo del componente i (\$).

$P_{t,i}$: Condición del componente i en el tiempo t .

$P_{mejor,i}$: Mejor condición posible del componente i .

$P_{peor,i}$: Peor condición posible del componente i .

t : Año de análisis (años).

T : Vida útil (años).

El valor del activo resulta de la sumatoria de valor de cada componente i en un cierto año de análisis t . La expresión consta de dos términos principales: uno que expresa la perspectiva del usuario, y otro que expresa la perspectiva de la agencia. Cada término toma el costo de reemplazo del componente i (CR_i) y le aplica una forma de depreciación acorde a la perspectiva.

El primer término permite incorporar cambios en el valor debido a cambios en la condición, a través de una razón establecida por la condición del componente i en el tiempo t ($P_{t,i}$) y los parámetros de

umbrales de condición ($P_{mejor,i}$) y ($P_{peor,i}$). El segundo término deprecia al activo según la forma de depreciación SDAI considerando la vida útil del puente (T) y el año de análisis t . Finalmente, a cada perspectiva se le asigna un peso relativo (w_u) y (w_a), el cual indica la relevancia de cada perspectiva en el valor final del puente.

2.5.1 Costo de reemplazo

El costo de reemplazo de un puente corresponde al costo que tomaría reemplazar la estructura en su totalidad por una exactamente igual, pero con los valores monetarios actualizados al tiempo presente.

En el caso local, la determinación de costo de reemplazo de cada componente de la estructura viene dada por la Ecuación 2.2, la cual corresponde a un modelo de costo por metro lineal que considera la longitud de la estructura en metros. Posteriormente, de acuerdo con la categoría según longitud establecida en la Sección 2.2.4 y a la presencia o no de cepas, el costo de reemplazo total se distribuye porcentualmente en los diferentes componentes valorizables mostrado en la Tabla 2.4.

$$CR_{Total} = 1155 \cdot L \quad (2.2)$$

Donde:

CR_{Total} : Costo de reemplazo total de la estructura (UF).

L : Longitud total de la estructura (m).

Tabla 2.4 Distribución de costo de reemplazo por componente

Presencia de cepas	Categoría	% de costo por componente			
		Estribo	Cepas	Tablero	Accesos
No	-	46	-	43	11
Si	Menor	41	10	39	10
	Mediano	38	18	35	9
	Mayor	32	31	30	8

2.5.2 Calificación de condición

La condición del activo y de sus componentes viene dada por calificaciones de condición obtenidas a través inspecciones visuales realizadas en terreno. Estas inspecciones se traducen en una nota o calificación mediante un algoritmo matemático. En el sistema de gestión de puentes de la red vial nacional, esta calificación es entregada por el algoritmo del sistema de gestión de puentes I3MOP. En el Anexo 3.1 se detalla en profundidad el algoritmo del método de calificación de condición.

2.5.3 Vida útil

El termino vida útil en el contexto de la valorización de activos viales se define como el período de tiempo transcurrido desde la puesta en servicio hasta que el activo debe retirarse, reemplazarse o clausurarse, y que, para propósitos de esta investigación, no hace distinción con otros términos similares como lo son la vida de servicio o vida de diseño que generalmente también son usados dentro de las obras viales.

En la Tabla 2.5 se recopilan distintos valores de vida útil propuestos en la literatura y/o utilizados por agencias para estructuras genéricas o para estructuraciones de hormigón, y de hormigón con acero en su complejo de vigas.

Tabla 2.5 Recopilación de vidas útiles

Referencia	Vida Útil (años)
MOP (2016)	65
Dojutrek <i>et al.</i> (2012)	70
AASHTO (2010)	75
AUSTROADS (2018)	100
EUROCODES (2010)	100
VDOT (2007)	100
British Standards Institution (1978)	120

2.6 Incertidumbre y variabilidad en activos viales

Se entiende por variabilidad a la variedad o amplitud cuantitativa existente en los datos y valores de las variables, parámetros y resultados en un determinado modelo. Por otra parte, la incertidumbre corresponde a la falta o inexactitud de conocimiento, el cual puede ser de carácter cualitativo o cuantitativo y presentarse en un escenario presente o futuro. Ambos conceptos pueden relacionarse al establecer que la variabilidad existente es producto de la presencia de incertidumbre.

Las variables y parámetros que recurren los métodos de valorización traen consigo incertidumbre en sus cálculos y estimaciones, ya que las obras civiles, en particular los puentes, poseen un comportamiento el cual es muy complejo de predecir y/o estimar con total certeza. Esto se debe a factores externos como el clima y las cargas solicitadas, al comportamiento de los materiales involucrados, a las diferentes configuraciones de diseño y todo el conjunto de acciones relacionadas a la gestión de estos activos (Atadero *et al.*, 2019). De igual manera, las tareas que requieren realizar toma de datos pueden llevar consigo mediciones imprecisas, mediciones fuera de fecha o incompletas, y falta de datos (inexistencia de mediciones), las cuales son fuentes comunes de incertidumbre (Huijbregts, 1998).

Adicionalmente, existe una vasta literatura en la cual se aborda la presencia de incertidumbre y variabilidad en diferentes aspectos de la obtención de información, en la determinación de parámetros, en la predicción de comportamiento y en la gestión de diversas obras civiles como puentes y pavimentos.

Falls *et al.* (2004) abordan la existencia de la variabilidad inherente en los datos usados en la valorización de activos, los cuales provienen de: errores en los métodos para recolectar datos, en los modelos usados para determinar el desempeño de las estructuras, en las intervenciones y en los errores no controlables de factores externos. Dojutrek *et al.* (2012) identifican la limitación de los modelos de valorización indicando que generalmente se usan métodos determinísticos siendo que factores que influyen la valorización como el costo de reemplazo, la condición, la vida de servicio y la tasa de deterioro son estocásticos.

Yianni *et al.* (2019) abordan la gestión de puentes bajo variabilidad y cuantifican su impacto. Se enfocan principalmente en que la variabilidad es inducida por factores humanos, como las inspecciones visuales y el cálculo de costos. Mikolaj *et al.* (2022) establecen que los sistemas de gestión de activos, incluyendo su valorización, deben sustentarse en valores robustos con un cierto valor de certeza. Si esto no es así, la misma gestión de activos se vuelve inexacta para su uso; las agencias viales se verán incapaces de crear argumentos válidos para la petición de fondos estatales si sus sistemas entregan valores ambiguos o si se utilizan sistemas que sobre simplifican aspectos técnicos.

2.6.1 Representación y cuantificación de incertidumbre

La incertidumbre existente en las variables y parámetros se conceptualiza a través de distribuciones de probabilidad. La Figura 2.5 muestra la caracterización de una distribución de probabilidad definida por una función de distribución ajustada a un conjunto de datos compuesto por un rango de valores definido por un mínimo y un máximo en el eje x , y la frecuencia de ocurrencia de cada uno de los valores dentro del rango en el eje y . La forma de la distribución varía de acuerdo con la frecuencia de ocurrencia de los valores de la variable o parámetro.

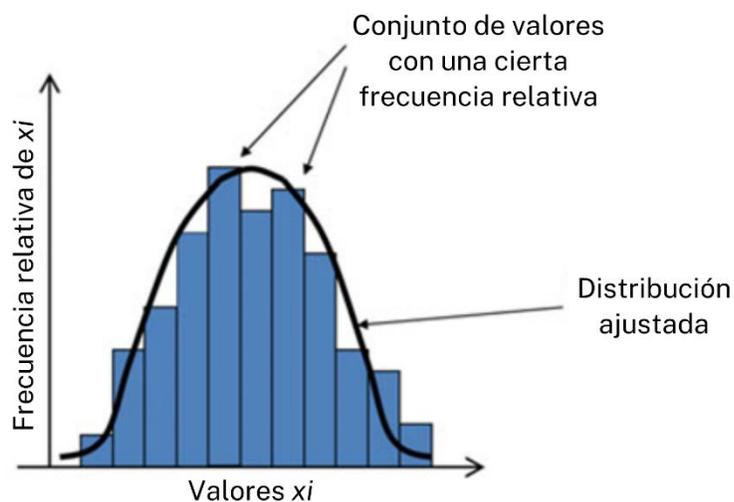


Figura 2.3 Caracterización de una distribución de probabilidad.

Las medidas o estadísticos importantes para describir la incertidumbre de una entrada o salida del modelo son: una medida de dispersión como la desviación estándar, la cual representa la dispersión de los datos del conjunto de valores de la distribución donde un valor bajo indica menor dispersión y un valor alto mayor dispersión; y una medida de tendencia central como la mediana, la cual representa al valor central de los datos numéricos ordenados de mayor a menor de una distribución de probabilidad.

El conocimiento combinado de la mediana y la desviación estándar proporciona una descripción útil del comportamiento de la variable o parámetro (Rosenbaum *et al.*, 2017). Además, al realizar un análisis de los datos de las distribuciones, no siempre se utiliza el rango de valores completo, sino un subconjunto de valores más representativo descartando los extremos de menor ocurrencia. Para esto se ocupa, por ejemplo, los percentiles 5 y 95 los cuales contienen el 90% de los valores de la distribución.

Por otro lado, la cuantificación de incertidumbre se refiere a la tarea de establecer una medida cuantitativa de la incertidumbre proveniente de las distintas fuentes en las entradas y salidas del modelo. Entre los métodos para la cuantificar incertidumbre y su propagación, se encuentran los Conjuntos Difusos, Caos Polinomial, Remuestreo (Bootstrap), Simulaciones Probabilísticas, Inferencia Bayesiana (Cárdenas-Monsalve *et al.*, 2018).

2.6.2 Simulación de Monte Carlo

El método de Monte Carlo es un método estadístico no determinístico, el cual tiene como principio básico la repetición reiterada del cálculo del modelo (iteraciones) usando muestreos aleatorios de los valores de las distribuciones de probabilidad de cada una de las entradas del modelo (Heijungs & Huijbregts, 2004). Una ventaja en relación con los otros métodos mencionados es que, dependiendo de la información disponible, se pueden utilizar en el modelo varias distribuciones de probabilidad como lo son las distribuciones uniforme, triangular, normal o log normal entre otras (Huijbregts, 1998). Además, el método es de fácil acceso al poder ser aplicado a través de diversos softwares.

Una simulación de Monte Carlo se desarrolla en tres pasos:

- i. Se generan muestras de valores aleatorios para todas las entradas según su distribución de probabilidad.
- ii. Se aplica el modelo en los valores generados para calcular la salida del modelo.
- iii. Se genera una representación estadística de la salida del modelo mediante una distribución de probabilidad.

Una vez realizadas las simulaciones, la salida del modelo es representada por una distribución de probabilidad en vez de un valor único mostrando la variabilidad resultante debido a las diferentes fuentes aportantes de incertidumbre. La Figura 2.6 muestra el proceso de una iteración de una simulación de Monte Carlo.

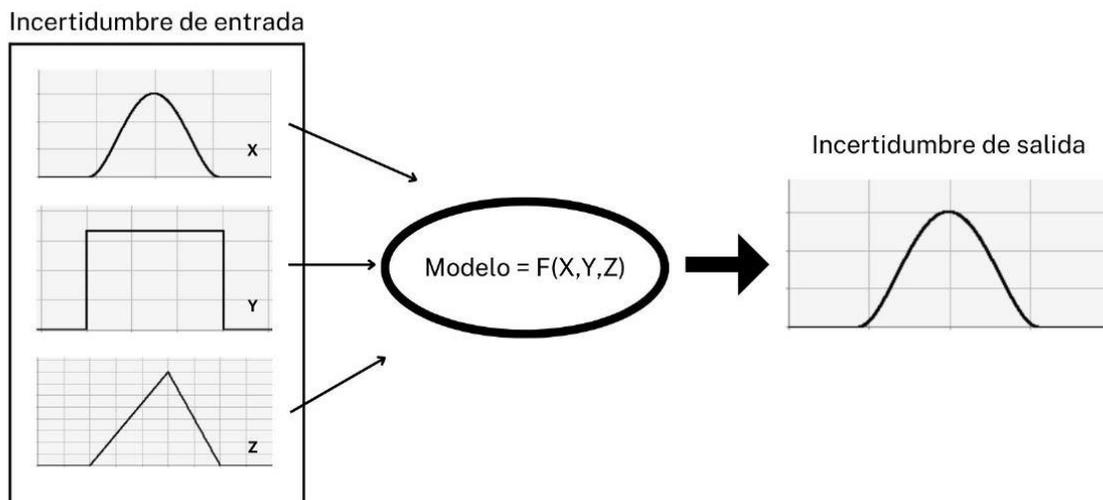


Figura 2.4 Proceso de una iteración de Monte Carlo

2.7 Conclusiones

La valorización de activos es una herramienta de gran utilidad dentro de la gestión de activos viales. Esta permite respaldar las decisiones tomadas por los administradores o agencias gestoras ante entes gubernamentales. Mediante una presentación periódica del valor es posible verificar como se está llevando a cabo la gestión de activos.

El modelo de valorización EDMC modificado es un modelo de flujo de valor. Refleja cambios de valor de acuerdo con variaciones en la condición como consecuencia de mantenciones, pérdida de valor debido al paso del tiempo y aumento de valor debido a las expansiones y rehabilitaciones. El modelo valoriza al activo descomponiéndolo en sus distintos componentes valorizables, considerando la perspectiva de la agencia vial y de los usuarios.

Las obras civiles están sujetas a incertidumbre. Factores como las cargas solicitadas, el comportamiento de materiales, las configuraciones de diseño y las acciones de mantenimiento contribuyen a esta incertidumbre. Por otra parte, la toma de datos está ligada a mediciones imprecisas, mediciones incompletas, mediciones fuera de fecha o inexistentes. En particular, las variables que poseen variabilidad en la valorización de activos viales corresponden al costo de reemplazo, a la condición, a la vida de servicio y la tasa de deterioro.

Para asignar un valor numérico a la variabilidad e incertidumbre se deben emplear métodos estadísticos que permitan cuantificarla, en particular el método de Monte Carlo cumple con este objetivo.

CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE INCERTIDUMBRE

3.1 Introducción

En este capítulo se plantea el procedimiento para caracterizar y cuantificar la incertidumbre presente en la valorización de puentes. Se identifican las variables y parámetros del modelo que poseen incertidumbre, se aborda la variabilidad asociada a cada una de las fuentes de incertidumbre, se asignan las distribuciones de probabilidad correspondiente a cada entrada del modelo y se detallan los análisis de variabilidad y reducción de variabilidad. Finalmente, se entregan los criterios para la selección de puentes.

3.2 Caracterización y cuantificación de incertidumbre en valorización de puentes

Se confecciona un procedimiento para caracterizar y cuantificar la incertidumbre en la valorización de puentes. Este consta de las dos etapas que se muestran en la Figura 3.1. La primera etapa corresponde a la caracterización de la incertidumbre, en la cual se identifican las variables y parámetros del modelo de valorización que presentan incertidumbre, se describen las fuentes de dicha incertidumbre, se traduce en variabilidad numérica y se asignan distribuciones de probabilidad a cada variable y parámetro identificado.

La segunda etapa corresponde a la cuantificación de la incertidumbre, donde se establece cada uno de los pasos necesarios para llevar a cabo los cálculos que permiten cuantificar la incertidumbre presente en la valorización de puentes. Los pasos incluyen: recopilar la información de inventario necesaria del puente, obtener el costo de reemplazo y calificación de condición por componente, establecer la variabilidad de manera numérica y asignar las distribuciones de probabilidad correspondientes a cada variable y parámetro. Luego, para comprobar la variabilidad existente en el valor de los puentes y la influencia de la variabilidad de los variables y parámetros en el modelo de valorización, se realizan respectivamente un análisis de variabilidad y un análisis de reducción de variabilidad.

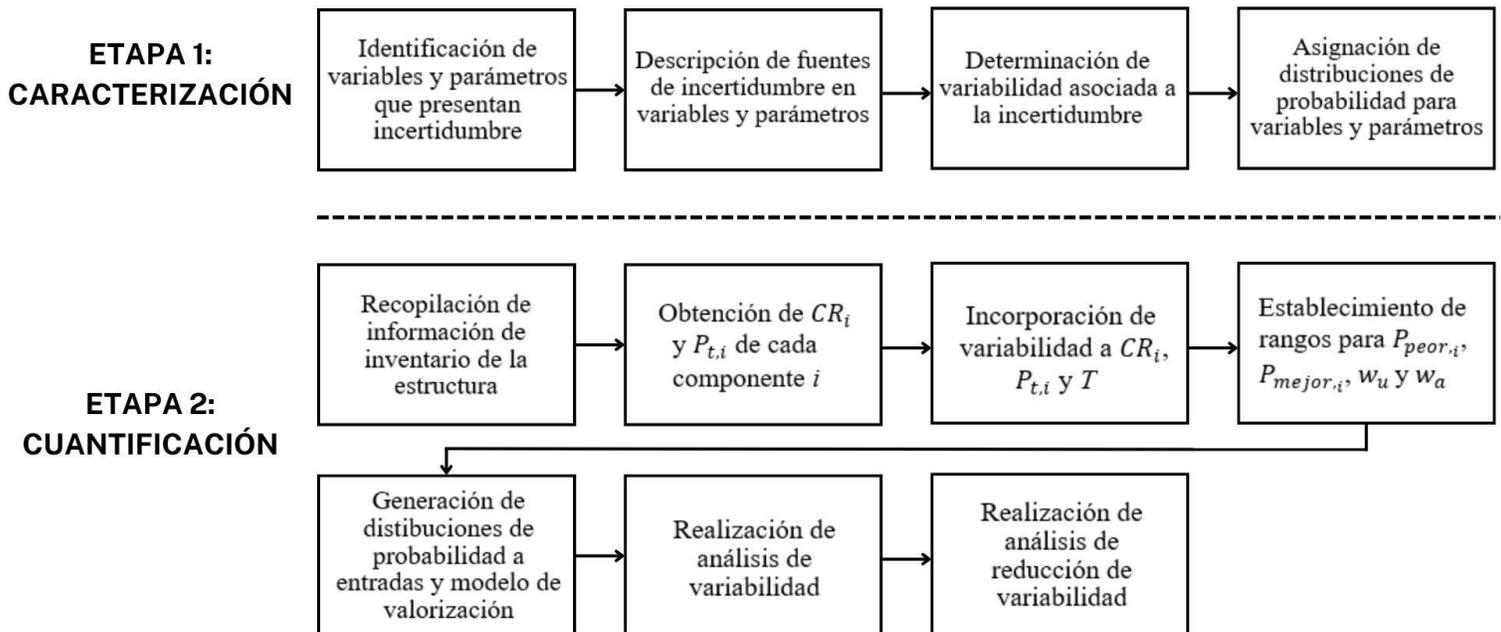


Figura 3.1 Procedimiento para caracterizar y cuantificar la incertidumbre en valorización de puentes

Para esta investigación se utiliza el modelo de flujo de valor EDMC modificado planteado en la Sección 2.5.

3.3 Identificación de fuentes de incertidumbre y variabilidad

Para determinar la variabilidad existente en el cálculo de valor del puente, es necesario identificar que variables y parámetros poseen incertidumbre y de qué manera se expresa esta incertidumbre. Como se mencionó en la Sección 2.6, Falls *et al.* (2004) y Dojutrek *et al.* (2012) identificaron las variables que poseen variabilidad en la valorización de activos viales, correspondientes a: costo de reemplazo, condición, vida de servicio y tasa de deterioro. Por otra parte, las fuentes de incertidumbre asociadas corresponden a: recolección de datos, modelos matemáticos empleados, intervenciones realizadas y errores no controlables de factores externos.

Si esto se lleva al modelo de valorización EDMC modificado, indicado en la Ecuación 3.1, se tiene que la calificación de condición ($P_{t,i}$), el costo de reemplazo (CR_i) y la vida útil (T) son las variables a las que se debe caracterizar su incertidumbre y traducir en variabilidad.

$$V_t = \sum_i V_i = w_u \left(CR_i \left(\frac{P_{t,i} - P_{peor,i}}{P_{mejor,i} - P_{peor,i}} \right) \right) + w_a \left(CR_i - \left(CR_i \frac{t(t+1)}{T(T+1)} \right) \right) \quad (3.1)$$

Por otra parte, el sistema de pesos relativos ($w_u ; w_a$) y los umbrales de condición ($P_{peor,i}; P_{mejor,i}$) son parámetros cuyo valor es calibrado por los administradores de la agencia. Al no tener valores preestablecidos para dichos parámetros, es posible entregar diferentes combinaciones de valores para comprobar la incertidumbre que esto genera en el comportamiento del modelo.

3.4 Variabilidad en el costo de reemplazo

Para estimar el costo de reemplazo de una estructura se pueden utilizar dos métodos: a través de una estimación de costos tradicional, la cual consiste en la cuantificación total de la cantidad de material de la estructura y de las actividades relacionadas a su construcción; o a través de modelos de costos, los cuales utilizan datos históricos que involucran costos agregados y características físicas de la estructura que permiten obtener el valor de costo de reemplazo (Hawk, 2002). Ambos métodos buscan asignar un valor de costo de reemplazo lo más cercano al costo “verdadero” de la estructura.

Si se tiene la información completa del puente (planos y proyecto de ingeniería) es posible calcular el costo de reemplazo con un análisis de precios unitario y obtener un costo cercano, si no preciso del costo “verdadero”. Por otra parte, al utilizar un modelo de costos, el qué tan cerca se encuentre el costo calculado con el costo “verdadero” dependerá de qué tan bien se adecue el modelo utilizado al puente calculado.

El modelo descrito en la Sección 2.5.1 entrega el costo de reemplazo del puente a través una expresión que depende de la longitud de la estructura, además de una distribución porcentual de este costo para cada uno de sus componentes. Al tratarse de estructuras diversas en diseño y materialidad, el modelo

de costos simplifica las características de la estructura al considerar solo su longitud para estimar el costo de reemplazo. Esto genera incertidumbre respecto a que tanto se acerca el costo de reemplazo calculado al costo “verdadero” de cada puente o paso superior de la red vial nacional.

Para incorporar una aproximación a la incertidumbre presente en el costo de reemplazo, se genera una distribución de probabilidad alrededor del costo calculado con la ayuda de un mínimo y máximo. Para determinar estos mínimo y máximo se establece un % de variación del $\pm 20\%$ con respecto al costo estimado por el modelo de costos.

3.5 Variabilidad en la calificación condición

Las inspecciones visuales son el método más usado para la determinación de condición de puentes. Estas son realizadas por personal humano el cual posee cierto grado de preparación y conocimiento, se realizan de manera estandarizada y se cuenta con el apoyo de insumos y herramientas que facilitan la tarea.

Moore *et al.* (2001); Neves & Frangopol (2010); Yianni *et al.* (2019) abordan qué tanto difieren las inspecciones visuales del estado real de activo inspeccionado. Moore *et al.* (2001) concluyó que, a pesar de que las inspecciones son realizadas por personas con un cierto grado técnico y de manera estandarizada, tienden a existir discrepancias entre los diferentes inspectores al establecer la condición de un mismo elemento del activo, además de entregar calificaciones que difieren relativamente con la condición real del puente.

Moore *et al.* (2001) establecen que la variabilidad existe como consecuencia de la subjetividad, el grado de conocimiento y la experiencia de los inspectores que influyen al describir un cierto deterioro. De igual manera, se considera la imposibilidad de acceso a todos los sectores necesarios al realizar la inspección o a la no notificación de ciertos deterioros. Esto implicaría que no son considerados todos los deterioros que efectivamente están presentes en el activo al momento de determinar su condición.

Ya presentes las fuentes de incertidumbre y variabilidad en las inspecciones, es necesario reflejar su influencia en la calificación de condición obtenida con el algoritmo del sistema de gestión de puentes I3MOP. Para esto, se deben detectar los parámetros obtenidos en la inspección visual que son parte del algoritmo que los traduce en las calificaciones de condición. Una explicación detallada del algoritmo se entrega en el Anexo 3.1. En la Figura 3.2 se resume esquemáticamente los diferentes niveles de estructura que considera el algoritmo para determinar la calificación de condición a través de las inspecciones. Se debe destacar que este algoritmo funciona de manera pesimista, considerando el peor deterioro nivel a nivel de la estructura.

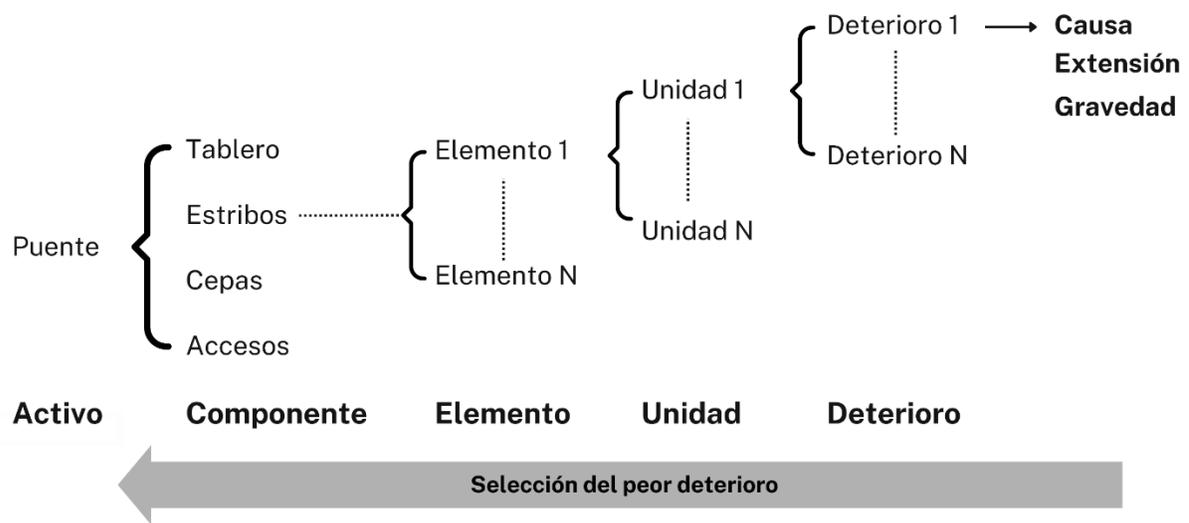


Figura 3.2 Representación esquemática del método de calificación de condición de puentes utilizado en Chile

A cada deterioro detectado se le asocia una cierta causa, gravedad y extensión. Estos parámetros son determinados en las inspecciones visuales, por lo que están sujetos a incertidumbre. Como la calificación de condición que entrega el algoritmo depende de estos parámetros, es posible decir que la calificación entregada podría estar subestimando o sobreestimando la condición real del puente debido a una mala determinación de estos parámetros. Esto significa que la calificación de condición del puente y sus componentes podría variar entre dos escenarios: uno donde la calificación real es menor (peor escenario posible) y otro donde la calificación real es mayor (mejor escenario posible).

1. Si se está sobreestimando la calificación, es decir, la condición real es peor a la entregada por la inspección, se genera el “peor escenario posible”. Para este escenario, la extensión y gravedad de los deterioros serían mayores a los determinados en la inspección, la causa atribuida a ciertos deterioros estaría equivocada, y es posible que no se habrían detectado ciertos deterioros en los componentes.
2. Si se está subestimando la calificación, es decir, la condición real es mejor a la entregada por la inspección, se genera el “mejor escenario posible”. Para este escenario, la extensión y gravedad de los deterioros serían menores a los determinados en la inspección y la causa atribuida a ciertos deterioros estaría equivocada. En este caso se asume que no habría deterioros detectados en las inspecciones sin que existiesen en la realidad, por lo que no se eliminarían deterioros.

Para ambos escenarios se modifican los deterioros que resulten ser los más influyentes en el algoritmo al establecer la calificación, de esta forma se obtendría una calificación máxima y una calificación mínima entre las cuales se encontraría la condición real. El detalle de cómo se genera el cambio de condición se encuentra en el Anexo 3.2.

3.6 Variabilidad en la vida útil

La vida útil de los puentes depende de diferentes factores: la materialidad de los distintos componentes; las cargas y sollicitaciones experimentadas; las condiciones ambientales; y lo relacionado con su gestión como son las mantenciones y rehabilitaciones (Ford *et al.*, 2012). También se debe considerar el diseño propio de cada una de las diferentes estructuras, por ejemplo: un puente mayor ($> 200\text{m}$) será diseñado de manera más robusta que un puente menor ($< 40\text{m}$) lo que implicaría vidas útiles diferentes para cada caso. Todos estos factores incorporan incertidumbre en la estimación de vida útil.

Para representar la incertidumbre presente se establece un rango de valores para la totalidad de puentes usando las referencias de vida útil expuestas en la Sección 2.5.3. Se asume un valor mínimo que

representa al caso más desfavorable (70 años), un caso más probable (100 años) y un valor máximo que representa al caso más favorable (120 años).

3.7 Variabilidad en los parámetros del modelo de valorización EDMC modificado

El modelo de valorización indicado en la Ecuación 3.1 posee los parámetros correspondientes al sistema de pesos relativos ($w_u ; w_a$) y a los umbrales de condición ($P_{peor,i}; P_{mejor,i}$). Estos parámetros se obtienen a través de calibraciones realizadas por la agencia administradora encargada del modelo de valorización.

El valor numérico que toman estos parámetros incide en el valor resultante entregado por el modelo de valorización, por lo que diferentes combinaciones de valores en los parámetros produce distintos valores en el resultado. Para verificar el efecto en el valor resultante de los distintos valores que pueden tomar los parámetros, se les incorpora variabilidad a través rangos de valores de acuerdo con:

- a) Umbrales de condición: se toma como referencia la categoría por calificación de condición dada por I3MOP (ver Tabla A.3.1.2) y valores determinados mediante un análisis de los diferentes deterioros posibles explicado en el Anexo 3.2. La Tabla 3.4 resume los rangos establecidos para los umbrales de condición.
 - i. Para el $P_{mejor,i}$ se utiliza como valor máximo la calificación máxima posible de 100 y como valor mínimo a la mayor calificación de condición posible con un solo deterioro, el cual varía entre componentes, 93 para Accesos y 94 para Estribos, Cepas y Tablero.
 - ii. Para el $P_{peor,i}$ se utiliza como valor máximo la calificación estimada correspondiente a donde el valor (económico) del componente se vuelve 0, siendo este el valor de 45. Como valor mínimo se utiliza el rango inferior de la categoría de condición 40-59, o sea el valor de 40.

- b) Pesos relativos: debido a que una de las características principales del modelo de valorización es considerar tanto la condición como la edad del puente, se asigna un valor de 0,2 como mínimo posible para w_u y w_a , permitiendo a ambas perspectivas tener relevancia en la valorización en cualquier caso posible. Como $w_u + w_a = 1$, el valor máximo que podrían tomar sería de 0,8.

Tabla 3.4 Rangos de valores de umbrales de condición para cada componente de un puente

Componente	$P_{mejor,i}$		$P_{peor,i}$	
	máximo	mínimo	máximo	mínimo
Estribos	100	94	45	40
Cepas	100	94	45	40
Tablero	100	94	45	40
Accesos	100	93	45	40

3.8 Resumen de distribuciones de probabilidad asignadas

En la Tabla 3.5 se resumen las distribuciones de probabilidad asignadas a las variables y parámetros del modelo de valorización de la Ecuación 3.1.

Tabla 3.5 Distribuciones de probabilidad de variables y parámetros del modelo

Variable/Parámetro	Mínimo	Más probable	Máximo	Distribución de probabilidad
T (años)	70	100	120	Triangular
CR_i (UF)	-20%	Valor calculado	+20%	PERT
$P_{t,i}$	Peor caso posible	Valor medido	Mejor caso posible	PERT
$w_{u,i}; w_{a,i}$	0,2	-	0,8	Uniforme
$P_{mejor,i}$	93 / 94	-	100	Uniforme
$P_{peor,i}$	40	-	45	Uniforme

La distribución PERT genera una distribución de valores la cual da mayor probabilidad de ocurrencia a los valores cercanos al valor “más probable”. Los valores más probables de CR_i y $P_{t,i}$ son calculados a través de modelos establecidos por la Dirección de Vialidad, por lo que es prudente darles mayor

relevancia o mayor ocurrencia con respecto a los valores cercanos al mínimo y máximo establecidos para dichas distribuciones. La distribución triangular entrega mayor probabilidad de ocurrencia a los valores intermedios entre el mínimo y más probable, y el más probable y máximo. Como la variable T se estableció a través de referencias, se le asigna la distribución triangular. Para $P_{peor,i}$, $P_{mejor,i}$, w_u y w_a se asigna una distribución uniforme, ya que esta considera un valor mínimo, un valor máximo e igual frecuencia de ocurrencia a los valores intermedios.

3.9 Análisis de variabilidad

La incertidumbre presente en las variables y parámetros de entrada del modelo de valorización de la Ecuación 3.1 se propaga hacia el valor resultante de salida. Para propagar la incertidumbre de entrada y verificar la incertidumbre resultante, se establece un sistema en el cual se incorpora la incertidumbre caracterizada de las variables y parámetros de entrada propagándola mediante simulaciones hacia el valor resultante de salida.

Primero, con ayuda del método de Monte Carlo se representan las variables y parámetros del modelo de valorización de acuerdo con las distribuciones de probabilidad indicadas en la Sección 3.8. Luego, se genera el modelo de valorización de la Ecuación 3.1 en función de las variables y parámetros establecidas anteriormente. Finalmente, se propaga la incertidumbre de entrada con ayuda de las simulaciones de Monte Carlo, donde se realizan las simulaciones necesarias para que el valor resultante converja en una distribución de probabilidad representando la incertidumbre de salida.

La distribución de probabilidad obtenida permite observar a través de sus estadísticos característicos, como lo es la desviación estándar (s), el coeficiente de variación y el rango de variabilidad, la variabilidad resultante en el valor del puente valorizado.

3.10 Análisis de reducción de variabilidad

Una vez realizado el análisis de variabilidad descrito en la Sección 3.9, es de interés verificar la influencia de la variabilidad de las variables y parámetros del modelo de valorización en la variabilidad del valor resultante. El análisis de reducción de variabilidad tiene por objetivo ver el cambio en la variabilidad resultante al reducir la variabilidad en las variables y parámetros de entrada del modelo de valorización.

Para llevar a cabo este análisis, ciertas variables aleatorias que poseen incertidumbre se asumen como ciertas, pasando de ser representadas por una distribución de probabilidad a ser expresadas como un valor fijo o determinístico. Para esto se proponen seis escenarios de reducción de variabilidad.

Los primeros tres escenarios propuestos corresponden a reducir la variabilidad de las variables de costo de reemplazo (CR_i), de calificación de condición ($P_{t,i}$) y de vida útil (T). Para esto, se establece como valor determinístico al valor “más probable” de las distribuciones de probabilidad mencionadas en la Tabla 3.6. Estos tres escenarios vienen dados por:

- a) CR_i toma el valor “más probable” de su distribución. Resto de variables y parámetros se mantienen aleatorios.
- b) T toma el valor “más probable” de su distribución. Resto de variables y parámetros se mantienen aleatorios.
- c) $P_{t,i}$ toma el valor “más probable” de su distribución. Resto de variables y parámetros se mantienen aleatorios.

Los siguientes tres escenarios propuestos corresponden a reducir la variabilidad en los valores asignados al sistema de pesos relativos ($w_u ; w_a$), lo cual se logra al fijar tres combinaciones distintas de valores de w_u y w_a . Estos tres escenarios vienen dados por:

- d) w_u toma el valor de 0,8 y w_a toma el valor de 0,2. Resto de variables y parámetros se mantienen aleatorios.

- e) w_u toma el valor de 0,5 y w_a toma el valor de 0,5. Resto de variables y parámetros se mantienen aleatorios.
- f) w_u toma el valor de 0,2 y w_a toma el valor de 0,8. Resto de variables y parámetros se mantienen aleatorios.

Cada escenario de reducción de variabilidad propuesto entrega una distribución de probabilidad resultante distinta a la obtenida en el análisis de variabilidad descrito en la Sección 3.9. Para verificar la influencia de la reducción de variabilidad en los seis escenarios propuestos, se compara la desviación estándar resultante de cada escenario de reducción de variabilidad con la desviación estándar obtenida en el análisis de variabilidad respectivo de cada puente.

3.11 Criterios para la selección de puentes

Para el desarrollo de esta investigación son de interés los puentes que cumplen con las siguientes características:

- Longitud: puentes cuya longitud supere los 10m, es decir, se consideran a los puentes menores, puentes medianos y puentes mayores.
- Diseño: se consideran aquellas estructuras convencionales tipo viga.
- Materialidad: de acuerdo con la estructuración infraestructura-vigas-tablero y a los materiales hormigón (H) y acero (A), se consideran aquellos que cumplan con la estructuración H-H-H y H-A-H.

Luego, para seleccionar los puentes se establecen los siguientes criterios basados en características propias de cada estructura y que tienen relación con las variables utilizadas en el modelo de valorización:

- Categorías según longitud (m) entregada por el Manual de Carreteras.
- Categorías de calificación de condición entregadas por el sistema I3MOP correspondientes al Índice de Calificación Automática (ICA'). Se detalla en Anexo 3.3.
- Edad del activo dada por el año de construcción y el año de inspección del puente.

A partir de los criterios planteados, se realiza un arreglo matricial donde se establecen los distintos casos de análisis. Estos casos permiten observar el comportamiento de las variables a través de las distintas combinaciones de longitud, edad y condición, lo cual contribuye a obtener conclusiones mejor fundamentadas para cada variable.

3.12 Conclusiones

Las variables y parámetros del modelo de valorización EDMC modificado sujetas a incertidumbre son el costo de reemplazo (CR_i), la calificación de condición ($P_{t,i}$), la vida útil (T), el sistema de pesos relativos ($w_u ; w_a$) y los umbrales de condición ($P_{peor,i}; P_{mejor,i}$).

La incertidumbre existente en el CR_i se origina a partir de la adecuación del modelo de costos empleado. El modelo de costos utiliza sólo la longitud (m) de la estructura para determinar el costo de reemplazo. Esto simplifica las características particulares de diseño de los puentes de la red vial nacional.

La incertidumbre existente en $P_{t,i}$ se origina en la recolección de datos realizada en las inspecciones visuales. Estas inspecciones son realizadas por personal humano el cual, debido a la subjetividad y el grado de conocimiento, tiende a subestimar o sobrestimar los distintos parámetros que permiten determinar las calificaciones. Existe también la posibilidad de no contabilizar ciertos deterioros debido a la imposibilidad física de acceso o a la incapacidad del inspector.

La incertidumbre existente en T se origina en el comportamiento de la estructura, y a su vez a la inexistencia de un modelo que permita realizar tal tarea. La incertidumbre en los parámetros w_u , w_a , $P_{peor,i}$ y $P_{mejor,i}$ es la generada en el comportamiento del modelo de valorización si a este se le asignan diferentes combinaciones de valores.

La incertidumbre presente en las variables y parámetros del modelo se representó a través de distribuciones probabilidad como la triangular, la PERT y la uniforme. Estas distribuciones utilizan los valores mínimo, máximo y más probable de las variables y parámetros.

Los puentes seleccionados cumplen con los criterios de longitud, diseño y materialidad. Además, se confeccionó una matriz bajo los criterios de longitud, condición y edad, lo cual contribuye a observar el comportamiento de las variables a través de las distintas combinaciones de criterios.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS DE VARIABILIDAD EN VALORIZACIÓN DE PUENTES

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados del procedimiento de cuantificación de incertidumbre aplicada a los puentes de la red vial nacional. Se muestra la matriz factorial propuesta y el proceso de selección de puentes. Luego, se obtienen las variables de cada puente seleccionado y sus respectivas distribuciones de probabilidad. Finalmente, se ejecutan los análisis de variabilidad y los escenarios de reducción de variabilidad a las variables y parámetros del modelo de valorización.

4.2 Selección de puentes y matriz de casos de análisis

Se confeccionó una matriz factorial acorde a los criterios establecidos en la Sección 3.11 correspondientes a longitud, edad y condición del puente. Para ingresar puentes a la matriz se utilizó el conjunto de puentes de la red nacional bajo la tuición de la Dirección de Vialidad. La información necesaria se obtuvo a partir de las bases de datos de puentes a nivel nacional, de las fichas de inventario y las fichas de inspección asociadas a cada puente.

De las bases de datos de puentes se filtraron todas las estructuras que cumplieran con el objeto de estudio descrito en el Sección 3.11, es decir: estructuras sobre los 10m de longitud, diseño convencional de vigas y tipología de estructura infraestructura-superestructura-tablero H-H-H y H-A-H. Con ayuda de las fichas de inventario se obtuvo la información general de cada puente: nombre, longitud total, año de construcción, año de inspección, costo de reemplazo total y por componente de la estructura. A través de las fichas de inspección, se obtuvieron las calificaciones de condición asociadas a los componentes valorizables y el ICA' de cada puente.

Para asegurar representatividad, se consideró que cada casilla de la matriz requería un total de 5 puentes para ser considerada completa. En caso de que un puente cumpliera con los criterios de una

casilla ya completa, este era descartado de la matriz. A su vez, si una casilla no llegaba a los cinco puentes, se le consideraba incompleta y no era parte de los análisis posteriores. Bajo estos criterios, se logró completar nueve casillas dando un total de 45 puentes seleccionados. La totalidad de puentes ingresados a la matriz se muestra en el Anexo 4.1 y la información general de los puentes seleccionados se muestra en el Anexo 4.2. La matriz factorial propuesta se muestra en la Tabla 4.1 donde en cada celda se indica el número de puentes incorporados y las casillas completas se destacan con un color rojo.

Tabla 4.1 Matriz factorial de casos de análisis

Categoría	Edad (años)	Calificación de condición (ICA')		
		80-100	60-79	40-59
Puentes Menores (10m-40m)	0-25	5	3	1
	26-50	5	3	0
	+50	5	5	0
Puentes Medianos (40m-200m)	0-25	5	4	0
	26-50	5	5	1
	+50	1	5	0
Puentes Mayores (+200m)	0-25	5	1	1
	26-50	1	2	0
	+50	1	2	0

En la selección de puentes se tendió a una sobrepoblación de puentes menores y medianos en contraste a una menor cantidad de puentes mayores. Con respecto a la edad, en los tres rangos estipulados se encontraron puentes, existiendo una tendencia a una menor cantidad de puentes sobre los 50 años si a su vez tenían un ICA' sobre 80 y/o eran puentes medianos y mayores. En relación con la calificación de condición, la mayoría de los puentes se encontraron con un ICA' de 80-100 y 60-79, siendo escasas las estructuras con un ICA' bajo 60. La combinación de edad bajo 25 años e ICA' bajo 60 es de baja ocurrencia, esto se debió a que generalmente los puentes de menor edad se asocian a una condición más alta.

4.3 Variables y parámetros de puentes seleccionados

Se calcularon las variables de costo de reemplazo total (CR), calificación de condición ponderada o ICA' (P_t), y edad (t) para cada uno de los puentes seleccionados. Las variables de costo de reemplazo total y calificación de condición se consideraron como variables aleatorias, ya que son representadas mediante distribuciones de probabilidad. La variable de edad del puente se consideró como una variable determinística debido a que es un valor único por puente.

Los valores resultantes para estas variables se muestran para los cinco puentes pertenecientes a cada categorización según su combinación de largo, edad y condición. Para esto se utilizaron gráficos de caja y bigotes, donde las cajas muestran el rango de valores determinísticos de los cinco puentes y los bigotes muestran la variabilidad incorporada a las variables aleatorias. Estos se presentan de la Figura 4.1 a la 4.9.



Figura 4.1 Variables de puentes con largo: 10-40m; edad: <25años; ICA': 80-100

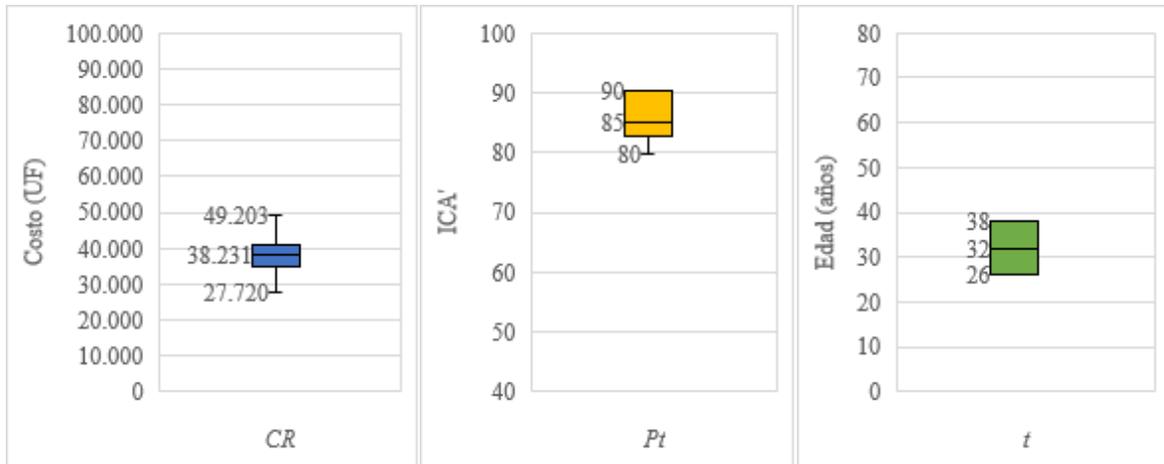


Figura 4.2 Variables de puentes con largo: 10-40m; edad: 25-50 años; ICA': 80-100

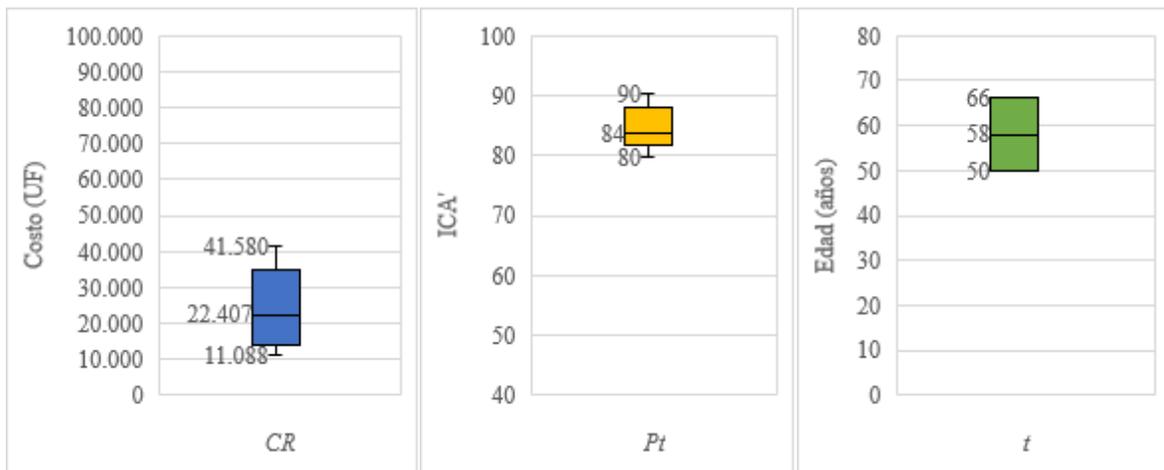


Figura 4.3 Variables de puentes con largo: 10-40m; edad: >50 años; ICA': 80-100



Figura 4.4 Variables de puentes con largo: 10-40m; edad: >50 años; ICA': 60-79

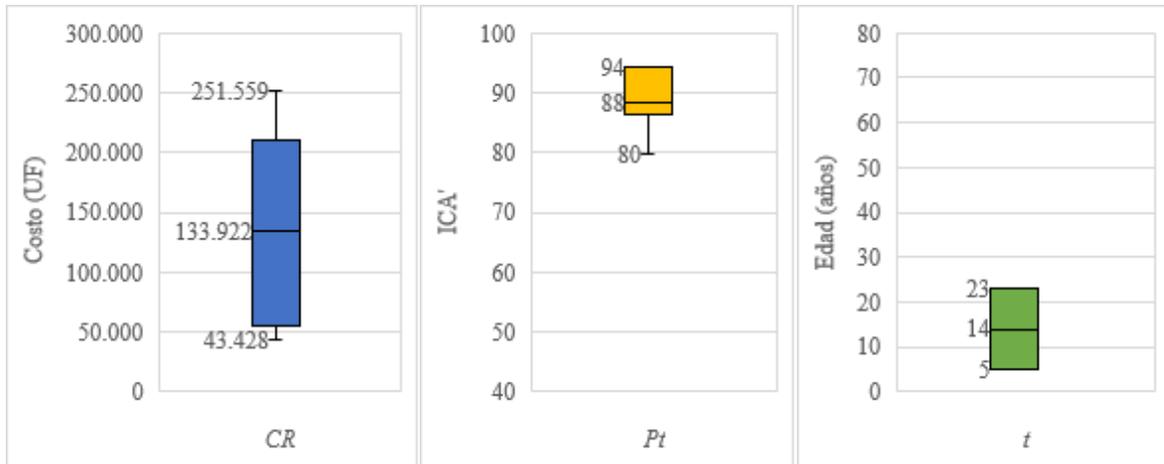


Figura 4.5 Variables de puentes con largo: 40-200m; edad: <25años; ICA': 80-100

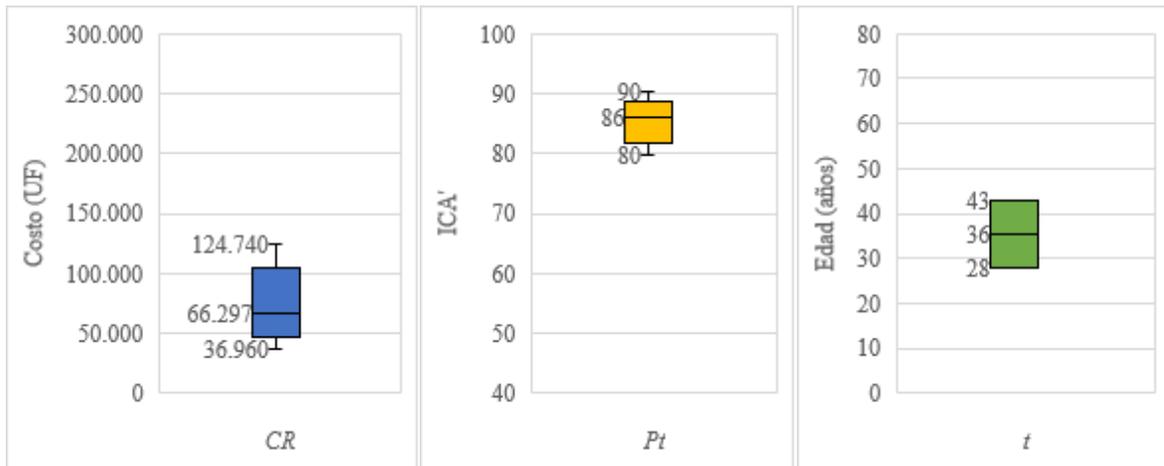


Figura 4.6 Variables de puentes con largo: 40-200m; edad: 25-50 años; ICA': 80-100

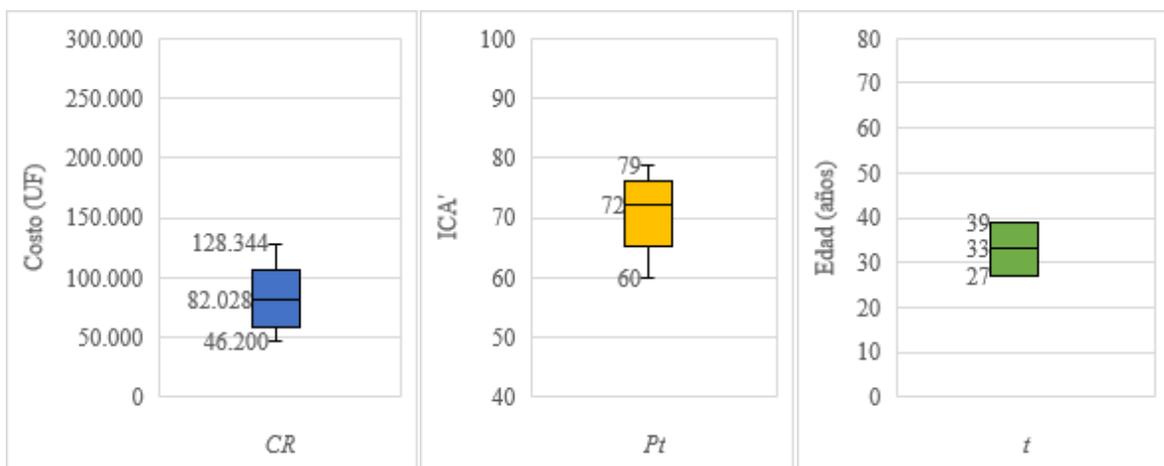


Figura 4.7 Variables de puentes con largo: 40-200m; edad: 25-50 años; ICA': 60-79

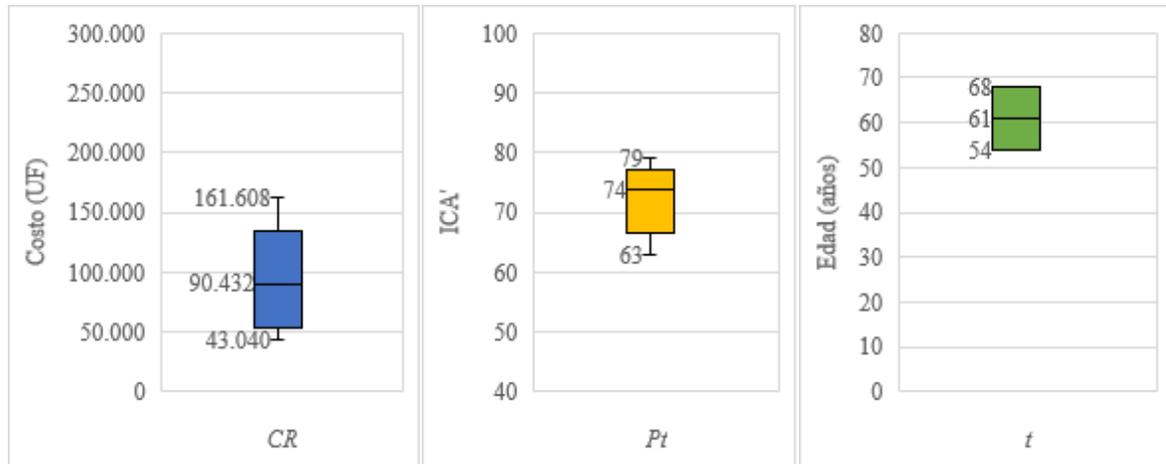


Figura 4.8 Variables de puentes con largo: 40-200m; edad: >50 años; ICA': 60-79

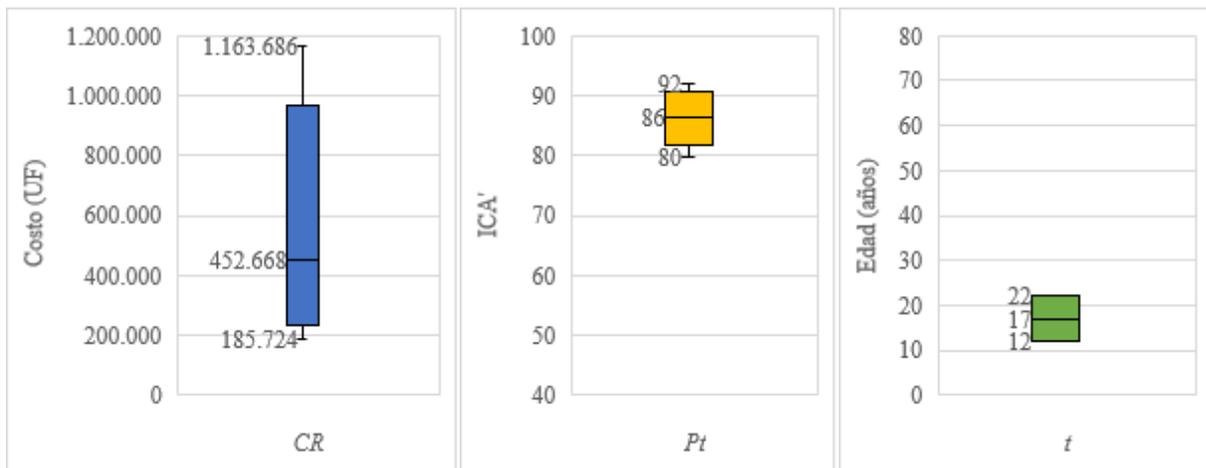


Figura 4.9 Variables de puentes con largo: >200m; edad: <25 años; ICA': 80-100

En los gráficos las variables de costo de reemplazo total (CR) y calificación de condición ponderada (P_t) se muestra el rango de variabilidad expresado por el mínimo absoluto, media y máximo absoluto del conjunto de distribuciones de probabilidad de los puentes categorizados por el largo, edad y condición. Para la variable de edad (t) se muestran el mínimo, media y máximo del conjunto de edades de los puentes categorizados por el largo, edad y condición, donde la inexistencia de bigotes se debió a que esta variable es determinística, es decir no posee incertidumbre.

La variable aleatoria de vida útil (T) se indica en la Figura 4.10. Esta variable se utilizó para la totalidad de puentes seleccionados, donde su rango de variabilidad viene dado por distribución de probabilidad

la cual se compone por un mínimo (70), más probable (100) y máximo (120) indicados en el gráfico de bigotes.

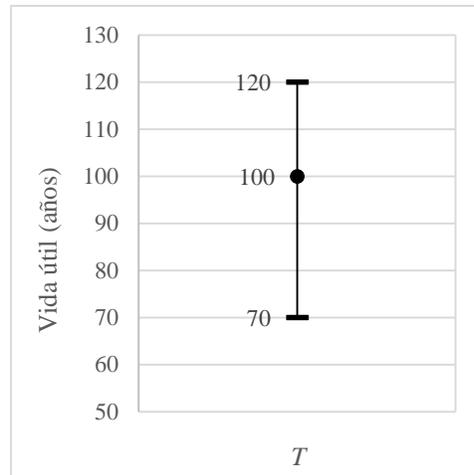


Figura 4.10 Variable de vida útil para puentes seleccionados

Los parámetros de sistema de pesos relativos ($w_u ; w_a$) y umbrales de condición ($P_{peor,i}; P_{mejor,i}$) se consideraron como variables aleatorias, ya que vienen dadas por distribuciones de probabilidad compuestas por un mínimo y máximo. En la Figura 4.11 se presentan los diagramas de bigotes los cuales indican el rango de variabilidad dado por los respectivos mínimos y máximos de sus distribuciones de probabilidad.

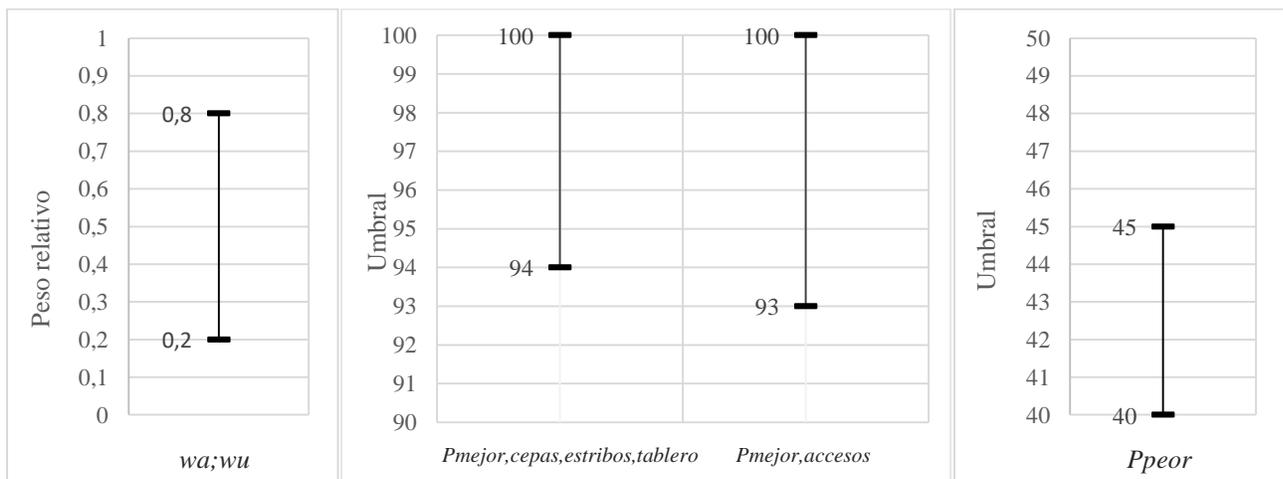


Figura 4.11 Parámetros del modelo de valorización

4.4 Resultados de análisis de variabilidad para puentes seleccionados

Se propagó la incertidumbre de las variables y parámetros de entrada hacia el valor resultante de salida. Esto se realizó mediante valorizaciones probabilísticas de los 45 puentes seleccionados. Se representaron las variables y parámetros con las distribuciones de probabilidad respectivas y se estableció la expresión matemática del modelo de valorización EDMC modificado. Para esto se utilizó el método de Monte Carlo a través del software complementario de Excel @RISK V8.2. Se realizaron simulaciones en las que se ejecutaron 50.000 iteraciones por cada puente seleccionado donde el valor resultante convergió en una distribución de probabilidad.

Los resultados obtenidos se exponen de la Figura 4.12 a la 4.20. A modo de ejemplo, la Figura 4.12 muestra el valor económico resultante de los cinco puentes seleccionados con un largo entre 10 y 40 metros, edad menor a 25 años y calificación de condición (ICA') entre 80-100. En particular, la distribución de probabilidad del valor resultante para el Puente 10 se centra en el eje x en su valor central acompañado de su respectiva dispersión o variabilidad. En el eje y se tiene la frecuencia de ocurrencia de cada uno de los valores que pertenecen a la distribución de probabilidad. Si se compara la dispersión en el Puente 10 con el Puente 7, se observa que la dispersión del Puente 7 es mayor a la dispersión en el Puente 10, ya que el ancho o amplitud de la distribución de probabilidad es mayor.

En el Anexo 4.3 se indican los estadísticos representativos de los resultados para cada puente analizado, correspondientes a la mediana, desviación estándar (s), rango de variabilidad y coeficiente de variación, los cuales entregan el valor central de la distribución y la dispersión (o variabilidad) de los datos.

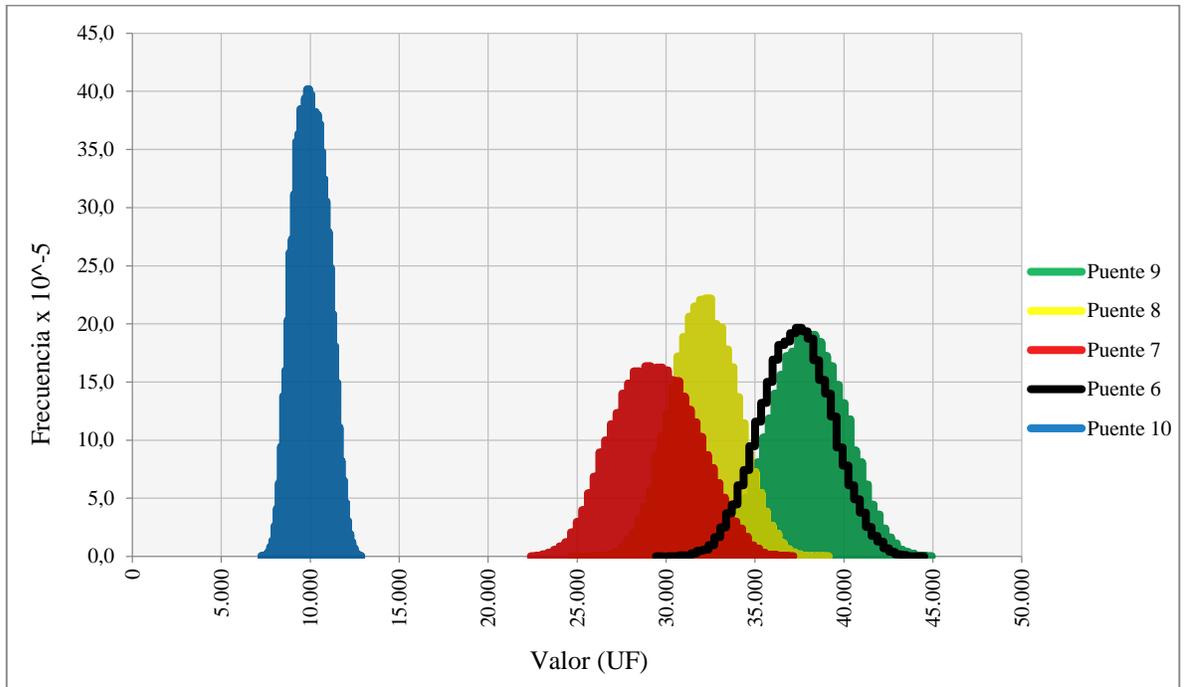


Figura 4.12 Valorización de puentes con largo: 10-40m; edad: <25años; ICA': 80-100

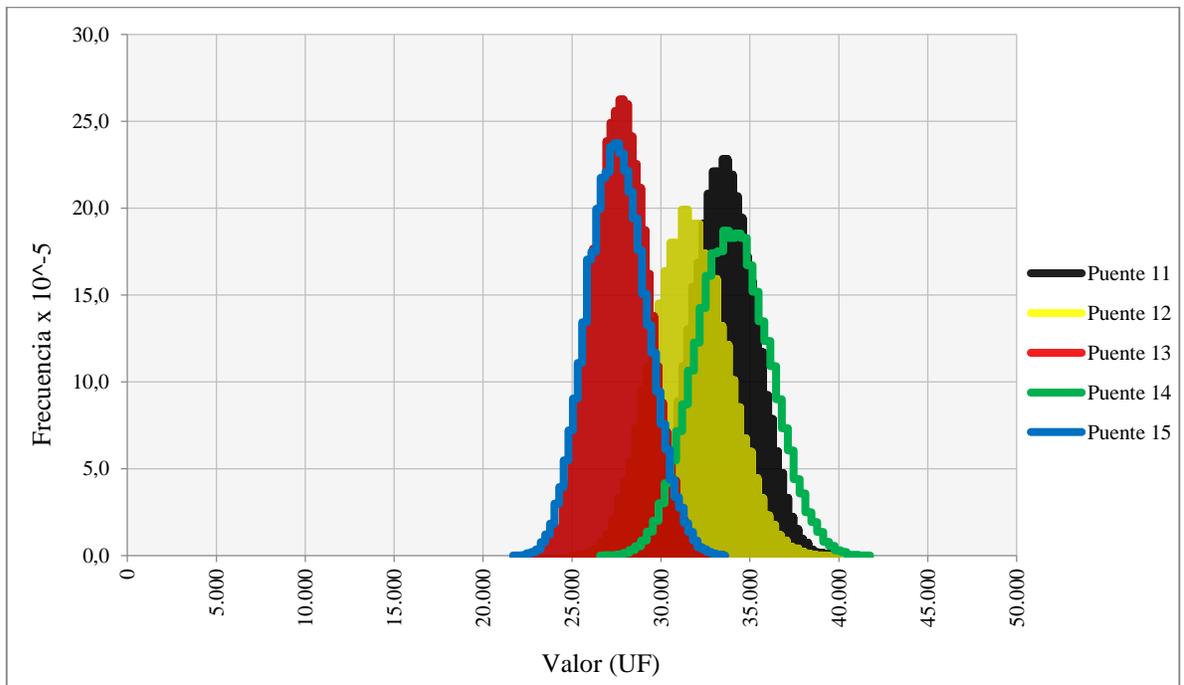


Figura 4.13 Valorización de puentes con largo: 10-40m; edad: 25-50 años; ICA': 80-100

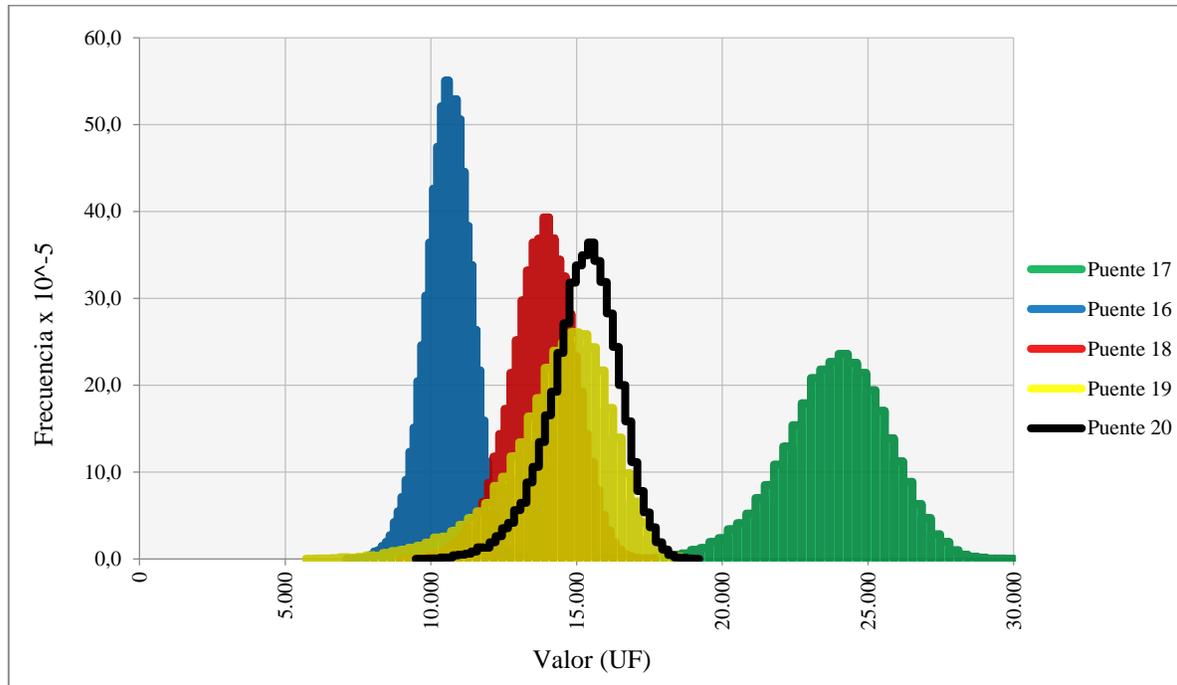


Figura 4.14 Valorización de puentes con largo: 10-40m; edad: >50 años; ICA': 80-100

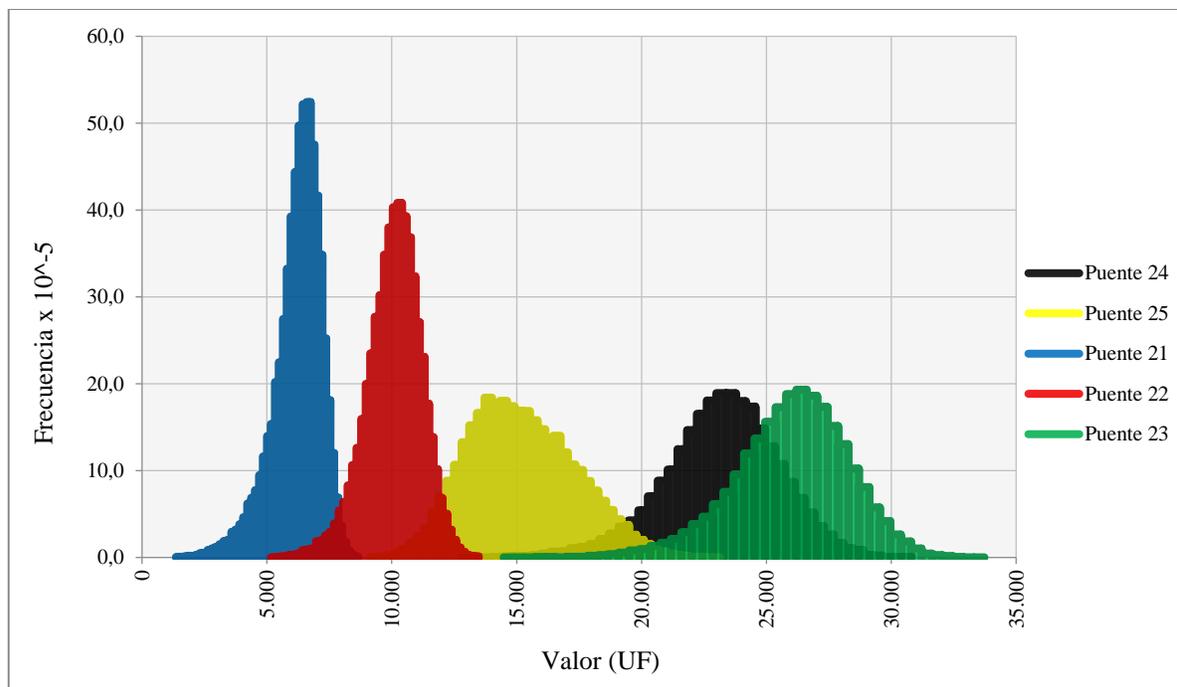


Figura 4.15 Valorización de puentes con largo: 10-40m; edad: >50 años; ICA': 60-79

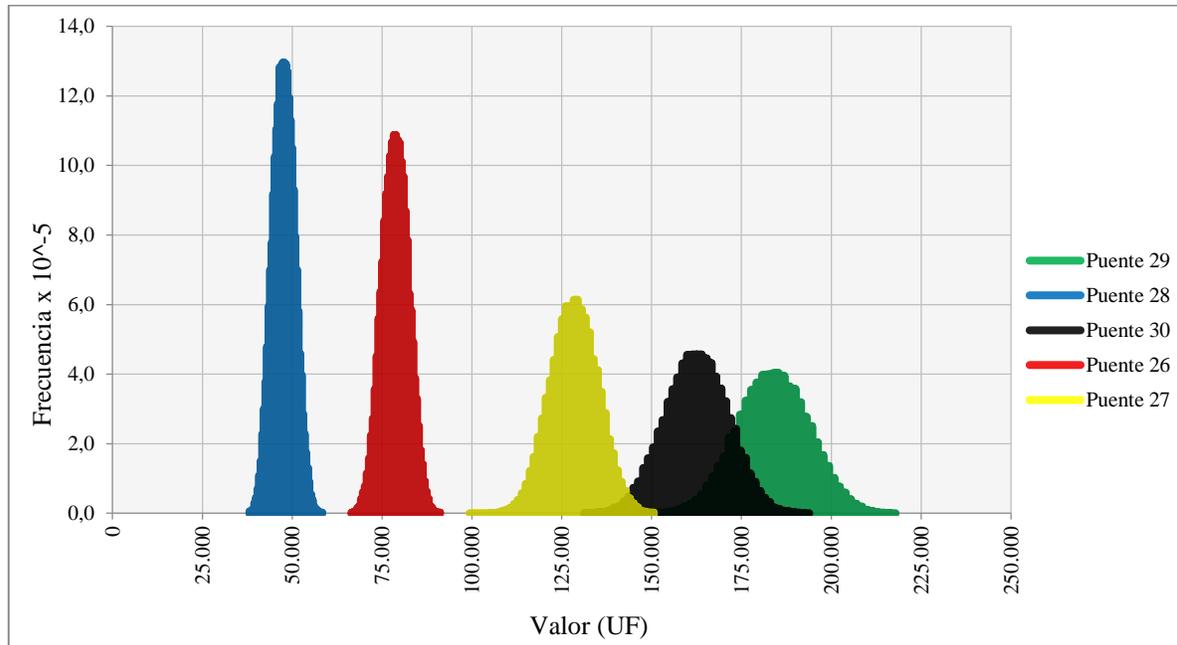


Figura 4.16 Valorización de puentes con largo: 40-200m; edad: <25años; ICA': 80-100

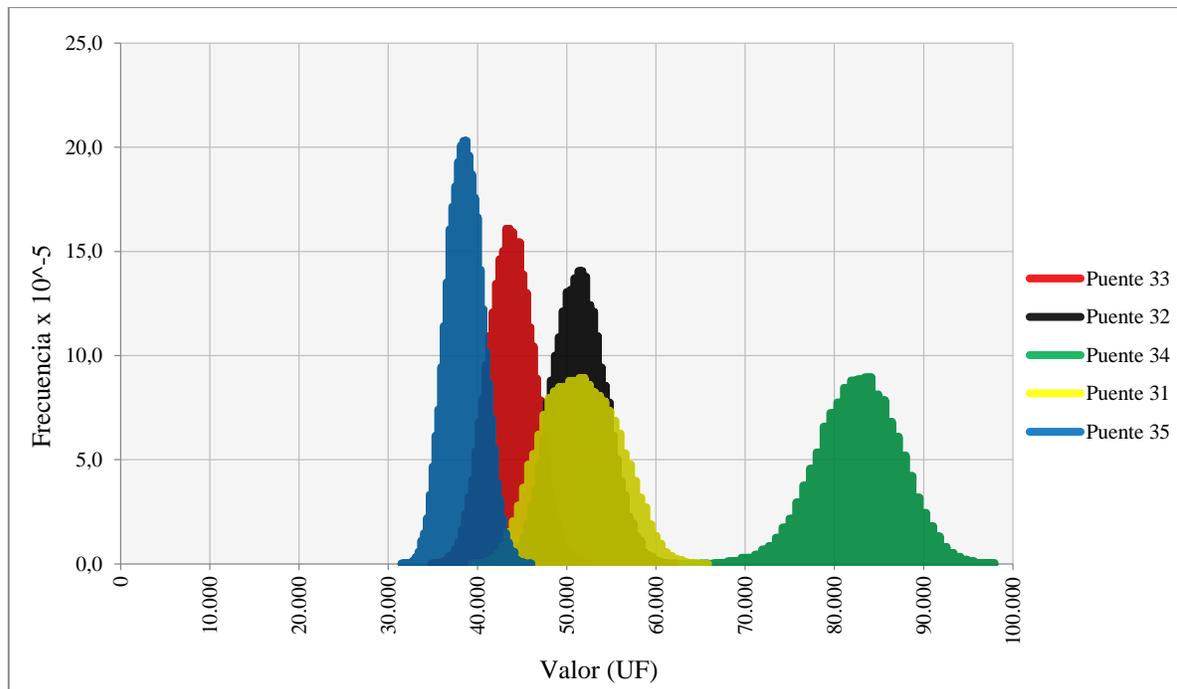


Figura 4.17 Valorización de puentes con largo: 40-200m; edad: 25-50 años; ICA': 80-100

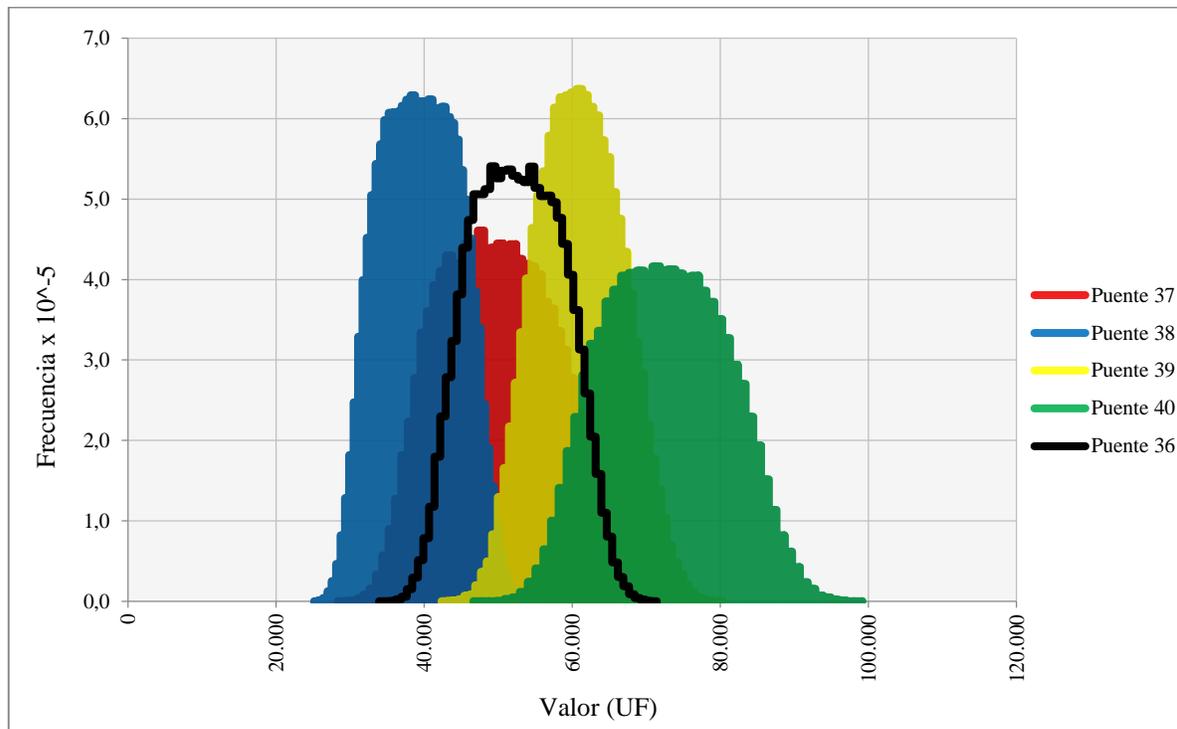


Figura 4.18 Valorización de puentes con largo: 40-200m; edad: 25-50 años; ICA': 60-79

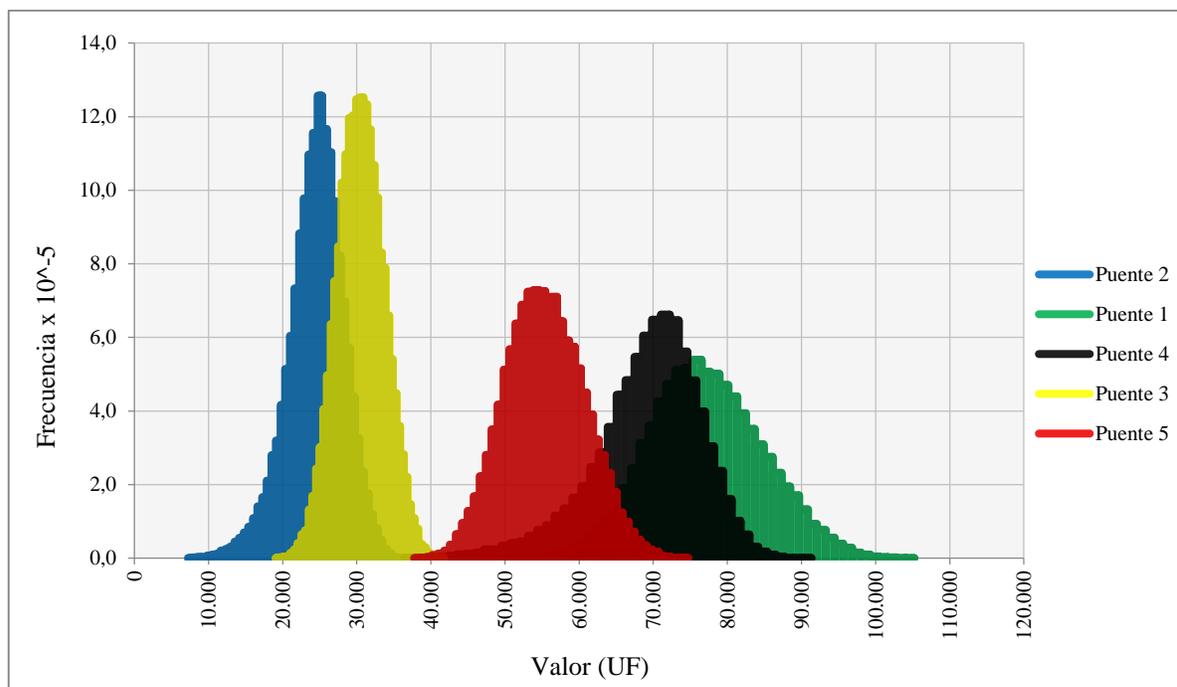


Figura 4.19 Valorización de puentes con largo: 40-200m; edad: >50 años; ICA': 60-79

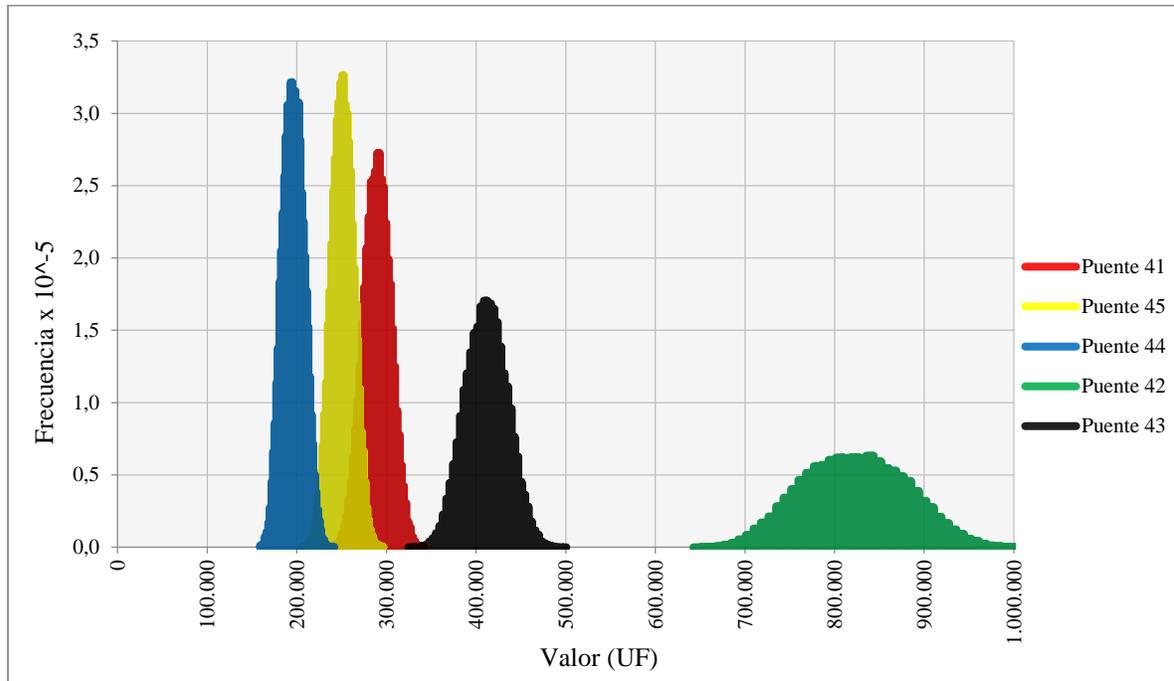


Figura 4.20 Valorización de puentes con largo: >200m; edad: <25 años; ICA': 80-100

Para realizar el análisis de los resultados, primero se verificó la pérdida de valor de cada puente analizando la diferencia entre el costo de reemplazo total (CR) del puente con la mediana del valor económico resultante. Luego, se verificó la variabilidad resultante a través del coeficiente de variación, el cual corresponde a la desviación estándar expresada como porcentaje de la mediana de la distribución de probabilidad. El coeficiente de variación permitió analizar la variabilidad resultante entre puentes de distinto costo de reemplazo total (CR). Finalmente, se utilizó el rango de variabilidad correspondiente a la distancia entre el valor mínimo y máximo de la distribución resultante, representados por el percentil 5 y 95 respectivamente. El rango de variabilidad entrega la magnitud del rango monetario en el que podría estar variando el valor económico resultante. Esto se entrega en la Tabla 4.2 en la cual se muestran los promedios de cada categoría según combinación de edad, condición y largo de puente.

Tabla 4.2 Estadísticos representativos de los análisis de variabilidad

Criterios	Pérdida de valor económico (%)	Coefficiente de variación promedio (%)	Rango de variabilidad promedio (UF)
Largo: 10-40m; edad: <25años; ICA': 80-100	11	7	5.820
Largo: 10-40m; edad: 25-50 años; ICA': 80-100	19	6	5.937
Largo: 10-40m; edad: >50 años; ICA': 80-100	29	8	4.335
Largo: 10-40m; edad: >50 años; ICA': 60-79	44	12	5.697
Largo: 40-200m; edad: <25años; ICA': 80-100	10	5	20.502
Largo: 40-200m; edad: 25-50 años; ICA': 80-100	19	6	10.328
Largo: 40-200m; edad: 25-50 años; ICA': 60-79	33	12	20.738
Largo: 40-200m; edad: >50 años; ICA': 60-79	44	11	17.538
Largo: >200m; edad: <25años; ICA': 80-100	12	6	77.951

Se observó que la pérdida de valor económico es mayor en los puentes cuya edad es sobre los 50 años y al mismo tiempo la condición o ICA' del puente se encuentra en el rango de 60-79. Esto resulta coherente con el modelo de valorización EDMC modificado el cual entrega el valor del puente de acuerdo con la pérdida de valor por edad y la pérdida de valor por condición, por lo que a mayor edad y menor condición del puente, mayor será la pérdida de valor.

El coeficiente de variación nos indica el grado de variabilidad relativo existente en las distribuciones de probabilidad independiente de la magnitud monetaria del valor económico resultante. Se observó que los valores más altos de coeficiente de variación se da en aquellos puentes donde la calificación de condición o ICA' está en el rango 60-79. Con respecto a los cambios de edad y longitud del puente, no se presentan variaciones significativas en el coeficiente de variación.

El rango de variabilidad expresado en UF permitió observar la magnitud monetaria de la variabilidad asociada a cada situación. Por ejemplo, si bien el coeficiente de variación es similar en los casos de puentes de longitud entre 10 y 40 metros y puentes de longitud sobre 200 metros con igual rango de condición y edad, el rango de variabilidad llegó a ser en promedio entre 13 a 14 veces mayor en los puentes de mayor longitud. Esto significa que en los puentes mayores el rango monetario en el que podría estar variando el valor económico resultante es en promedio 13 a 14 veces mayor que en un puente menor.

Si se compara particularmente al Puente 7 cuya longitud es de 30 metros y rango de variabilidad de 7.338 UF, y al Puente 42 cuya longitud es de 839,6 metros y rango de variabilidad de 187.661 UF, se observó que el rango de variabilidad monetario de este último es 25,6 veces mayor.

4.5 Análisis de efecto de reducción de variabilidad

Se realizaron los escenarios de análisis de reducción de variabilidad descritos en la Sección 3.10. Este análisis tuvo por objetivo ver el cambio en la variabilidad resultante al reducir la variabilidad en las variables y parámetros de entrada del modelo de valorización. Para esto, se consideró que ciertas variables aleatorias pasaron de ser representadas por una distribución de probabilidad a ser expresadas por un valor fijo o determinístico.

Al igual que para el análisis de variabilidad de la Sección 4.4, se generaron simulaciones de Monte Carlo con un total 50.000 iteraciones por cada escenario para cada puente seleccionado. En total fueron seis escenarios de reducción de variabilidad aplicados a cada uno de los 45 puentes seleccionados.

Para analizar los resultados de este análisis se realizó una comparación con un “escenario base”. Este escenario base correspondió a los resultados obtenidos en el análisis de variabilidad de cada puente expuestos en el Sección 4.4, es decir, la valorización donde todas las variables y parámetros aleatorios son aleatorios.

En la Tabla 4.3 se presenta el promedio porcentual de variación de la desviación estándar de cada escenario de reducción de variabilidad con respecto al escenario base, categorizado según los criterios de longitud, edad y condición de cada puente. La variación de desviación estándar de los escenarios de reducción de variabilidad para cada puente se encuentra en Anexo 4.4.

4.3 Variación porcentual de desviación estándar en escenarios de reducción de variabilidad con respecto a escenario base

Criterios	Variación promedio de s según escenario de reducción de variabilidad (%)					
	CR _i determinístico	T determinístico	P _t determinístico	w _u =0,2; w _a =0,8	w _u =0,5; w _a =0,5	w _u =0,8; w _a =0,2
Largo: 10-40m; edad: <25años; ICA': 80-100	-42	0	-3	-17	-19	-18
Largo: 10-40m; edad: 25-50 años; ICA': 80-100	-41	-5	-1	1	-10	-16
Largo: 10-40m; edad: >50 años; ICA': 80-100	-20	-31	-1	21	-8	-24
Largo: 10-40m; edad: >50 años; ICA': 60-79	-10	-40	-1	32	-10	-40
Largo: 40-200m; edad: <25años; ICA': 80-100	-47	0	-3	-11	-12	-9
Largo: 40-200m; edad: 25-50 años; ICA': 80-100	-36	-5	-1	-4	-15	-19
Largo: 40-200m; edad: 25-50 años; ICA': 60-79	-7	1	-4	-48	-55	-55
Largo: 40-200m; edad: >50 años; ICA': 60-79	-9	-35	-3	28	-12	-39
Largo: >200m; edad: <25años; ICA': 80-100	-34	0	-3	-21	-23	-22

CR_i = costo de reemplazo del componente i; T = vida útil; P_{t,i} = calificación de condición del componente i; w_u = peso relativo de pérdida de valor por condición, w_a = peso relativo de pérdida de valor por edad.

De los escenarios de reducción de variabilidad se observó que:

- La reducción de variabilidad en el costo de reemplazo (CR_i) contribuyó en toda situación a una disminución en la variabilidad del valor económico resultante. La disminución promedio de la desviación estándar fue hasta un 47% en puentes con ICA' sobre 80.
- La reducción de variabilidad en la vida útil (T) generó una variación promedio menor al 5% en los puentes con una edad menor a 50 años. Contrariamente en puentes sobre los 50 años la disminución promedio de la desviación estándar llega al 40%.
- La reducción de variabilidad en la calificación de condición ($P_{t,i}$) generó variaciones promedio menores al 4% de la desviación estándar en todas las situaciones analizadas.
- Asignar un valor a w_u de 0,2 y a w_a de 0,8 generó efectos diversos. En puentes de edad sobre los 50 años generó un aumento promedio de la desviación estándar en hasta un 32%. En puentes de edad bajo los 25 años generó una disminución promedio de la desviación estándar en hasta un 21%. En puentes con edad entre 25 y 50 años e ICA' entre 60 y 79, generó una disminución promedio de la desviación estándar hasta un 48%.
- Asignar a w_u y w_a un valor de 0,5 contribuyó en toda situación a una disminución de la variabilidad en el valor económico resultante. En particular, en puentes con edad entre 25 y 50 años e ICA' entre 60 y 79, generó una disminución promedio de la desviación estándar hasta un 55%.
- Asignar un valor a w_u de 0,8 y a w_a de 0,2 contribuyó en toda situación a una disminución de la variabilidad en el valor económico resultante. En puentes con ICA' entre 60 y 79 esta disminución fue mayor, donde se generó una disminución promedio de la desviación estándar hasta un 55%.

4.6 Conclusiones

La selección de puentes tendió a una mayor aparición de estructuras de longitud entre los 10 y 200 metros, a una mayor aparición a los con calificación de condición ICA' sobre 60 y en similares proporciones en los distintos rangos de edad. La combinación de edad bajo 25 años e ICA' bajo 60 es de baja ocurrencia dada la naturaleza del activo.

La variabilidad presente en el valor resultante aumenta a medida que la condición o ICA' del puente disminuye. Tanto la longitud como la edad del puente no tienen una influencia menor en la variabilidad resultante.

El rango de variabilidad en términos monetarios varía de acuerdo con el costo de reemplazo de cada puente. A mayor costo de reemplazo, mayor será la magnitud monetaria de la variabilidad tomando en consideración las respectivas variaciones producto de la variación de condición.

La reducción de variabilidad en el costo de reemplazo generó una disminución de variabilidad en el valor en todas las combinaciones de longitud, condición y edad, siendo esta hasta un 47% en puentes con ICA' sobre 80. La reducción de variabilidad en la vida útil generó una disminución de la variabilidad promedio del 40% en puentes sobre los 50 años. La reducción de variabilidad en la calificación de condición no generó variaciones importantes (<5%) en la variabilidad del valor resultante.

Dar mayor relevancia a w_a por sobre w_u aumentó la variabilidad en el valor resultante en hasta un 32% en aquellos puentes con edad sobre los 50 años. Dar igual relevancia a w_a y w_u generó una disminución en la variabilidad en todas las combinaciones de longitud, condición y edad, siendo esta hasta en 55% en puentes con edad entre 25 y 50 años e ICA' entre 60 y 79. Finalmente, Dar mayor relevancia a w_u por sobre w_a al igual que la situación anterior, generó una disminución en la variabilidad en todas las combinaciones, siendo esta hasta en 55% en puentes con ICA' entre 60 y 79.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Este trabajo tuvo por objetivo cuantificar la incertidumbre presente en el modelo de valorización EDMC modificado para puentes de la red vial chilena. Para ello se caracterizó la incertidumbre en las variables y parámetros de entrada del modelo para luego cuantificar la incertidumbre resultante. Se seleccionaron 45 puentes tipo viga categorizados en base a los criterios de longitud, condición y edad. Se realizaron análisis de variabilidad y análisis de reducción de variabilidad, los cuales entregaron una aproximación a la valorización de puentes probabilística en contraste a la valorización de puentes determinística generalmente utilizada en la gestión de activos viales.

El modelo de valorización utilizado fue el modelo EDMC modificado. Este modelo refleja el cambio de valor del puente debido a variaciones en la condición como consecuencia de mantenciones, pérdida de valor debido al paso del tiempo y aumento de valor debido a las expansiones y rehabilitaciones. El modelo permite descomponer al puente en sus distintos componentes valorizables y considera la perspectiva de la agencia vial y de los usuarios en el valor resultante.

Las obras civiles están sujetas a incertidumbre debido a factores como las cargas solicitadas, el comportamiento de materiales, las configuraciones de diseño y las acciones de mantenimiento. Por otra parte, la incertidumbre en la toma de datos está ligada a mediciones imprecisas, mediciones incompletas, mediciones fuera de fecha o inexistentes. En particular, de acuerdo con la literatura, las variables que poseen variabilidad en la valorización de activos viales corresponden al costo de reemplazo, a la condición, a la vida de servicio y la tasa de deterioro.

Las variables y parámetros del modelo EDMC modificado sujetas a incertidumbre son el costo de reemplazo (CR_i), la calificación de condición ($P_{t,i}$), la vida útil (T), el sistema de pesos relativos (w_u ; w_a) y los umbrales de condición ($P_{peor,i}$; $P_{mejor,i}$). La incertidumbre existente en el CR_i se origina a partir de la adecuación del modelo de costos empleado. La incertidumbre existente en $P_{t,i}$ se origina de la recolección de datos realizada en las inspecciones visuales. La incertidumbre existente en T se origina del comportamiento de la estructura. En los parámetros w_u , w_a , $P_{peor,i}$ y $P_{mejor,i}$ existe

incertidumbre en el comportamiento del modelo al asignarse diferentes combinaciones de valores a cada parámetro.

La variabilidad en el valor resultante aumenta a medida que la condición o ICA' del puente disminuye, mientras que tanto la longitud como la edad del puente tienen una influencia menor en la variabilidad resultante. En términos monetarios, el rango de variabilidad de la distribución de probabilidad del valor del puente varía de acuerdo con el costo de reemplazo. A mayor costo de reemplazo, mayor será la magnitud monetaria de la variabilidad resultante.

En relación con las variables del modelo de valorización, reducir la variabilidad en el costo de reemplazo genera una disminución de variabilidad en el valor para todas las combinaciones de longitud, condición y edad de puentes analizado, particularmente llega al 47% en puentes con ICA' sobre 80. Reducir la variabilidad en la vida útil genera una disminución de la variabilidad promedio del 40% en puentes sobre los 50 años. Reducir la variabilidad en la calificación de condición genera variaciones menores al 5% en la variabilidad del valor resultante.

A partir del presente trabajo se sugiere desarrollar las siguientes líneas de investigación:

- i. Ampliar el espacio muestral de puentes seleccionados. Para esto se deben incorporar los más de 6000 puentes y pasos superiores de la red vial nacional. De este modo, se podrá analizar combinaciones de longitud, condición y edad que no fueron analizadas, además de ampliar la muestra representativa de cada una de las combinaciones de criterios.
- ii. Ampliar el tipo de estructura analizada a otros tipos de puentes y a pasos superiores. De este modo, se podrá verificar la influencia de la variabilidad en la valorización de otras estructuras y como cambia respecto a los puentes tipo viga.
- iii. Obtener las distribuciones de probabilidad empírica a base de datos. Para esto se necesita recopilar datos para cada variable de entrada del modelo de valorización y ajustar una distribución acorde.

REFERENCIAS

- Alyami, Z. (2017). *Asset Valuation: A Performance Measure for Comprehensive Infrastructure Asset Management* [University of Waterloo]. <http://hdl.handle.net/10012/12727>
- Alyami, Z., & Tighe, S. L. (2016). A methodology for integrating asset valuation in transportation asset management. *Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering*, 4.
- Amekudzi, A., Herabat, P., Wang, S., & Lancaster, C. (2002). Multipurpose asset valuation for civil infrastructure: Aligning valuation approaches with asset management objectives and stakeholder interests. *Transportation Research Record*, 1812. <https://doi.org/10.3141/1812-26>
- Amekudzi-Kennedy, A., Labi, S., & Singh, P. (2019). Transportation Asset Valuation: Pre-, Peri- and Post-Fourth Industrial Revolution. In *Transportation Research Record* (Vol. 2673, Issue 12). <https://doi.org/10.1177/0361198119846470>
- Atadero, R. A., Jia, G., Abdallah, A., & Ozbek, M. E. (2019). An integrated uncertainty-based bridge inspection decision framework with application to concrete bridge decks. *Infrastructures*, 4(3). <https://doi.org/10.3390/infrastructures4030050>
- Board, T. R., of Sciences Engineering, & Medicine. (2012). *Estimating Life Expectancies of Highway Assets, Volume 2: Final Report* (K. M. Ford, M. H. R. Arman, S. Labi, K. C. Sinha, P. D. Thompson, A. M. Shirole, & Z. Li, Eds.). The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/22783>
- Cárdenas-Monsalve, J. J., Ramírez-Barrera, A. F., & Delgado-Trejos, E. (2018). Evaluación y aplicación de la incertidumbre de medición en la determinación de las emisiones de fuentes fijas: una revisión. *TecnoLógicas*, 21(42). <https://doi.org/10.22430/22565337.790>
- Dewan, S. A., & Smith, R. E. (2005). Valuing Pavement Network Assets and Use of Values as Decision Supports. *Journal of Infrastructure Systems*, 11(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1076-0342\(2005\)11:4\(202\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1076-0342(2005)11:4(202))
- Dojutrek, M., Makwana, P., & Labi, S. (2012). *A Methodology for Highway Asset Valuation in Indiana*. <https://doi.org/10.5703/1288284315035>
- Dojutrek M. S., P. A. Makwana, & S. Labi. (2012). A Methodology for Highway Asset Valuation in Indiana. *Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana*. <https://doi.org/10.5703/1288284315035>
- Dojutrek, M., Volovski, M., & Labi, S. (2014). Elemental decomposition and multicriteria method for valuing transportation infrastructure. *Transportation Research Record*, 2460(1). <https://doi.org/10.3141/2460-15>
- Edgerton, D. (2016). *Guide to Valuation and Depreciation*.

- Falls, L. (2004). *Analysis of Asset Valuation Methods for Civil Infrastructure*. University of Waterloo.
- Falls, L. C., Haas, R., & Tighe, S. (2004). A comparison of asset valuation methods for civil infrastructure. *TAC/ATC 2004 - 2004 Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada: Transportation Innovation - Accelerating the Pace*.
- Falls, L. C., Haas, R., & Tighe, S. (2005). A framework for selection of asset valuation methods for civil infrastructure. *TAC/ATC 2005 - 2005 Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada: Transportation - Investing in Our Future*.
- Gyamfi-Yeboah, F., & Ayitey, J. (2009). Assessing Depreciation For Valuation Purposes – A Decompositional Approach. *Journal of Science and Technology (Ghana)*, 29(2).
<https://doi.org/10.4314/just.v29i2.46223>
- Hawk, H. (2002). Bridge life-cycle cost Analysis, NCHRP Report 483. In (No. 483) *Transportation Research Board*.
- Heijungs, R., & Huijbregts, M. a J. (2004). A review of approaches to treat uncertainty in LCA. *IEMSS 2004 International Congress*.
- Hoang, T., Han, Z., & Zhang, Z. (2020). Integrating economic and utility concepts for a comprehensive bridge valuation model. *Transportation Research Record*, 2674(9).
<https://doi.org/10.1177/0361198120926509>
- Huijbregts, M. A. J. (1998). Application of uncertainty and variability in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 3(5). <https://doi.org/10.1007/bf02979835>
- International Organization of Standardisation. (2014). ISO 55000 - Asset management. *International Organisation of Standardisation, 2014*.
- Mikolaj, J., Remek, L., & Kozel, M. (2022). Road Asset Value Calculation Based on Asset Performance, Community Benefits and Technical Condition. *Sustainability*, 14(7).
<https://doi.org/10.3390/su14074375>
- Moore, M., Phares, B., Graybeal, B., Rolander, D., & Washer, G. (2001). Reliability of Visual Inspection for Highway Bridges. *Journal of Engineering Mechanics*, II(FHWA-RD-01-020).
- MOP. (2018). Manual de Carreteras, Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño. *Mop*, 3(1).
- Naude, C., & Martin, T. (2018). Guide to asset management - technical information part 8: Financial Management. In *Austrroads Ltd*.
- Neves, L. C., & Frangopol, D. M. (2010). Optimization of bridge maintenance actions considering combination of sources of information: Inspections and expert judgment. *Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization - Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*.

- Rosenbaum, R. K., Georgiadis, S., & Fantke, P. (2017). Uncertainty management and sensitivity analysis. In *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_11
- Yianni, P. C., Neves, L. C., Rama, D., Andrews, J. D., Tedstone, N., & Dean, R. (2019). Quantifying the impact of variability in railway bridge asset management. *Life-Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision - Proceedings of the 6th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, IALCCE 2018*.

ANEXOS

ANEXO 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo.

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ODS-13 : Acción por el clima.
- ODS-14 : Vida Submarina.
- ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación
<p>Identificar las fuentes que contribuyen a la incertidumbre presente en el cálculo de valor económico de un puente, permite asignar los esfuerzos necesarios para controlar y reducir la incertidumbre en aquellas variables del modelo de valorización que más contribuyen al valor económico calculado.</p> <p>Controlar y reducir la incertidumbre contribuirá a conocer con mayor certeza el valor económico o rango de valor económico de los puentes de la red vial nacional.</p>

Una gestión de activos sustentada en valores económicos más precisos, contribuye a una óptima petición de financiamiento a los entes estatales para la gestión de estos activos. De esta forma de contribuye al uso correcto de recursos en infraestructura y su mantención para el correcto uso de sus usuarios.

ANEXO 2.1 Definición del modelo de flujo “Elemental Decomposition and Multi-Criteria”

- a) **Razón de atributos:** Establecen una comparación entre funciones que cuantifican el nivel actual y el nivel deseado del activo de cualquier atributo físico o basado en el rendimiento que cambie con el tiempo. El atributo de la condición del activo se puede definir para un cierto tiempo t como la razón entre la diferencia absoluta de la condición actual P_t y la peor condición posible P_{worst} , y la diferencia absoluta de la mejor condición posible P_{best} y la peor condición posible P_{worst} . P_{best} y P_{worst} son establecidos por la agencia gestora. Se define por la Ecuación A.2.1.1.

$$CR_t = \frac{P_t - P_{worst}}{P_{best} - P_{worst}} \quad (A.2.1.1)$$

Donde:

CR_t : Razón de condición en el tiempo t .

P_t : Condición actual del activo en el tiempo t .

P_{best} : Mejor condición posible del activo.

P_{worst} : Peor condición posible del activo.

De manera similar, en la Ecuación A.2.1.2 la razón de la vida de útil restante (RSLR) puede definirse como la proporción de vida útil que le queda al activo comparada con su vida útil total.

$$RSLR_t = \frac{RSL_t}{SL} \quad (A.2.1.2)$$

Donde:

$RSLR_t$: Razón de vida útil restante en el tiempo t.

RSL_t : Vida útil restante del activo en el tiempo t.

SL : Vida útil del activo.

- b) Ecuación unificada:** A los atributos descritos se incorporan dos aspectos importantes para la determinación de valor; un sistema de pesos $w_{a,u}$ que establece la importancia relativa entre las perspectivas del usuario y la agencia y que entre ellos suman 1, y los costos $Cost$ correspondientes al activo. De esta manera la expresión unificada para la razón de atributos de ambas perspectivas se muestra en la Ecuación A.2.1.3. y de manera ampliada en la Ecuación A.2.1.4.

$$V_t = [w_u \cdot (Cost \cdot (CR_t)) + w_a \cdot (Cost \cdot (RSL_t))] \quad (A.2.1.3)$$

$$V_t = \left[w_u \cdot \left(Cost \cdot \left(\frac{P_t - P_{worst}}{P_{best} - P_{worst}} \right) \right) + w_a \cdot \left(Cost \cdot \left(\frac{RSL_t}{SL} \right) \right) \right] \quad (A.2.1.4)$$

Donde:

V_t : Valor del activo en el año t.

w_u : Importancia relativa de la condición.

w_a : Importancia relativa de la vida útil restante.

$Cost$: Costo original, histórico o costo de reemplazo del activo, ajustado por la inflación.

P_t : Condición actual del activo en el tiempo t.

P_{best} : Mejor condición posible del activo.

P_{worst} : Peor condición posible del activo.

RSL_t : Vida de servicio restante del activo en el tiempo t.

SL : Vida de servicio del activo.

- c) **Formulación del método:** Para incorporar la descomposición elemental del activo a la formulación matemática del modelo, se deben establecer n cantidad de elementos que conforman al activo. Cada elemento i vendrá acompañado de las variables $Cost_i$, $P_{t,i}$, $P_{worst,i}$, $P_{best,i}$, $w_{u,i}$, $w_{a,i}$, $RSL_{t,i}$ y SL_i , lo que permite realizar la valorización elemento a elemento. Finalmente, la expresión general vendría dada por la suma del valor cada elemento V_i , mostrada en la Ecuación A.2.1.5.

$$V_t = \sum_{i=1}^n V_i = w_{u,i} \cdot \left(Cost_i \cdot \left(\frac{P_{t,i} - P_{worst,i}}{P_{best,i} - P_{worst,i}} \right) \right) + w_{a,i} \cdot \left(Cost_i \cdot \left(\frac{RSL_{t,i}}{SL_i} \right) \right) \quad (A.2.1.5)$$

Donde:

V_t : Valor del activo en el año t .

$w_{u,i}$: Peso relativo de la importancia de la pérdida de valor por condición del elemento i .

$w_{a,i}$: Peso relativo de la importancia de la pérdida de valor por edad del elemento i .

$Cost_i$: Costo del elemento i .

$P_{t,i}$: Condición del elemento i en el tiempo t .

$P_{best,i}$: Mejor condición posible del elemento i .

$P_{worst,i}$: Peor condición posible del elemento i .

$RSL_{t,i}$: Vida útil restante del elemento i en el tiempo t .

SL_i : Vida útil del elemento i .

ANEXO 3.1 Método de calificación de condición I3MOP

I3MOP es un sistema de información para puentes que permite generar una base de datos actualizable con datos de catastro, inspección y condición de deterioro de los puentes de la red vial nacional.

Los índices o calificaciones de condición expresan numéricamente la condición o estado de un puente desde el punto de vista estructural y funcional. Se obtienen mediante una suma ponderada de la magnitud y severidad de los deterioros presentes en cada componente/elemento de un puente, usando como ponderador la importancia relativa de cada uno de los componentes/elementos para la integridad estructural y funcional del puente.

El método de calificación de condición califica de manera progresiva el deterioro desde la parte más elemental del puente (la unidad) hasta el puente completo. Para ello, utiliza como datos de entrada iniciales los datos de inventario de cada puente, sobre los cuales se asignan los deterioros observados en terreno. La calificación en cada nivel de estructura posee valores entre 0 y 100, donde 0 es la peor condición y 100 la mejor. La Tabla A.3.1.1 detalla las variables explicativas de cada función de cálculo según nivel de agregación y la Tabla A.3.1.2 los rangos de calificación y su significado de acuerdo I3MOP.

Tabla A.3.1.1 Variables que inciden en la estimación de la condición del puente. (Adaptado de MOP, 2020)

Niveles de agregación	Variables explicativas del índice en cada nivel de agregación
Deterioro	Extensión del deterioro, gravedad del deterioro, ponderador por deterioro, ponderador por unidad, ponderador por causa del deterioro
Unidad	Cantidad de deterioros de la unidad, menor calificación entre los deterioros
Elemento	Cantidad de deterioros del elemento, menor calificación entre los deterioros de las unidades
Subcomponente	Número de elementos del subcomponente, ponderador del subcomponente, cantidad de deterioros del subcomponente, menor calificación entre los deterioros de los elementos
Componente	Número de subcomponentes del componente, cantidad de deterioros del componente, menor calificación entre los deterioros de los subcomponentes
Puente	Número de componentes del puente, cantidad de deterioros del puente, menor calificación entre los deterioros de los componentes, tráfico, porcentaje de vehículos pesados

Tabla A.3.1.2 Rangos de calificación de condición global del puente. (Adaptado de MOP, 2020)

Rango	Calificación de condición
80-100	Puente con deterioros de carácter durable o funcional leve
60-80	Puente con deterioros de carácter durable o funcional medios
40-60	Puente con deterioros de carácter resistente leves o de carácter durable o funcional extendidos
20-40	Puente con deterioros de carácter resistente medios. Deterioros durables o funcionales graves
0-20	Puente colapsado o con deterioros de carácter resistente muy graves

La Figura A.3.1.1 muestra de manera esquemática el método de calificación, el cual califica los deterioros desde la parte más elemental del puente (unidad), y escala los deterioros, seleccionando y ponderando la peor calificación en cada nivel.

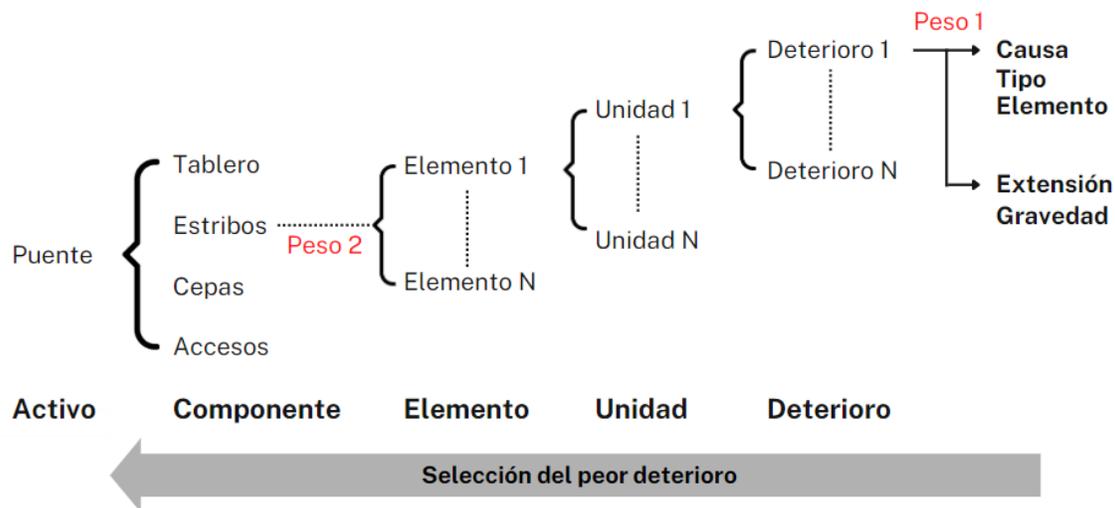


Figura A.3.1.1 Representación esquemática del método de calificación propuesto

La obtención de la calificación de deterioros comienza con la identificación del deterioro, la causa de este y la unidad, perteneciente a un elemento, afectado por el deterioro, como se muestra en las Ecuaciones A.3.1.1 y A.3.1.2.

$$C_d = C_o \cdot P_d \cdot P_u \cdot P_c \quad (\text{A.3.1.1})$$

$$C_o = [100 - ((V_{\text{extensión}} + V_{\text{gravedad}}) \cdot 4)] / 100 \quad (\text{A.3.1.2})$$

Donde:

- $V_{gravedad}$ y $V_{extensión}$ se definen para cada deterioro asignándole un coeficiente de acuerdo con la Tabla A.3.1.3.

Tabla A.3.1.3 Tablas de pesos de ponderación por “Extensión” y “Gravedad” (Adaptado de MOP, 2020)

Extensión	$V_{gravedad}$	Gravedad	$V_{extensión}$
Pequeña (<25%)	0,15	Mínima	0,1
Media (25%<Ext<50%)	0,5	Media	3
Elevada (50%<Ext<75%)	2	Alta	8
Muy elevada (>75%)	3,5	Muy alta	13

- P_d se refiere al peso de cada deterioro, el cual se muestra en la Tabla A.3.1.4. Los pesos cercanos a 100 indican deterioros menores.

Tabla A.3.1.4 Tabla de pesos de ponderación por “Deterioro” (Adaptado de MOP, 2020)

Deterioro	P_d
Alteración superficial	97
Armadura vista	96
Baches, ahuellamiento	97
Cárcavas	96
Coqueras, nidos de grava	99
Corrosión	92
Deformación	89
Socavación local	80
Desprendimientos de hormigón con armadura vista	92
Desprendimientos de hormigón sin armadura vista	99
Desplazamiento	93
Eflorescencias	98
Fisuras	88
Fisuras en mapa	93
Grietas (>5 mm)	87
Humedades, filtraciones	99
Hundimiento	92
Lajación	92
Madrigueras	98

Pátina, mancha de óxido	99
Pérdida de pieza	91
Pérdida de tratamiento protector	98
Piezas sueltas	92
Rotura	85

- P_u corresponde a la ponderación de importancia de la unidad de un elemento afectada por el deterioro. Los valores cercanos a 1,00 demuestran menor importancia del elemento. La Tabla A.3.1.5 muestra los valores y el componente al que pertenecen.

Tabla A.3.1.5 Tabla de pesos de ponderación por Unidad (Adaptado de MOP, 2020)

Subcomponente	Unidades	
Superestructura convencional (de vigas)	Vigas	0,91
	Losa	0,94
	Voladizo	0,94
	Encofrado perdido	0,98
	Prelosas colaborantes	0,96
	Imposta	0,98
	Atiesador	0,94
	Puntales	0,94
	Revestimiento	0,98
	Otros	0,96
	Ábaco	0,97
	Travesaño	0,96
	Arriostramiento vertical	0,96
	Arriostramiento horizontal	0,96
Cepa	Viga Cabezal	0,96
	Capitel	0,94
	Tapas	0,96
	Pedestal	0,96
	Verticalidad (longitudinal)	0,94
	Tajamar	0,96
	Travesaño	0,96
	Puntal	0,94
	Barras sísmicas	0,98
	Topes sísmicos transversales	0,98
	Abrazaderas	0,98
	Revestimiento	0,98

	Fundación	0,94
	Otros I	0,96
	Otros II	0,96
Estribo	Dintel	0,94
	Muro frontal portante	0,94
	Muro de contención de tierras	0,96
	Pila, machones	0,94
	Pantalla	0,96
	Muro espaldar	0,96
	Tajamar	0,96
	Tapas	0,98
	Anclajes	0,96
	Barras sísmicas	0,98
	Topes sísmicos	0,98
	Revestimiento	0,98
	Fundación	0,94
	Otros I	0,96
	Otros II	0,96
	Refuerzo	0,98
	Tornapunta	0,98
Fundación	0,94	
Plataforma	Pavimento	0,96
Otros	Terraplenes	0,98
	Enrocados	0,98

- P_c es el peso de la causa, donde a mayor importancia de la causa definida en la inspección, menor es el valor del coeficiente. La Tabla A.3.1.6 muestra el valor correspondiente a cada causa.

Tabla A.3.1.6 Tabla de pesos de ponderación de Causa (Adaptado de MOP, 2020)

Causa	P_c
Abrasión por tránsito	0,98
Acción climática	0,98
Acción de la fauna	0,98
Asiento diferencial	0,85
Ataque químico	0,9
Ausencia o deficiente dispositivo de junta	0,97
Ausencia o deficiente losa de transición	0,97

Cabeceo del muro lateral y existencia de un punto fijo	0,95
Cama de nivelación en mal estado o mal ejecutada	0,94
Capilaridad	0,99
Causa desconocida	0,9
Ciclos hielo-deshielo	0,97
Corrosión	0,93
Corrosión de las armaduras	0,92
Deficiente compactación del relleno	0,93
Deficiente ejecución	0,97
Deformación natural del propio aparato de apoyo	0,99
Desgaste o abrasión por tránsito	0,99
Diseño deficiente	0,92
Envejecimiento	0,99
Escasez de recubrimiento	0,96
Escorrentía superficial	0,98
Esfuerzos	0,8
Esfuerzos (compresión)	0,83
Esfuerzos (cortante)	0,75
Esfuerzos (flexión)	0,75
Esfuerzos (torsión)	0,8
Esfuerzos (tracción)	0,83
Exceso de compresión	0,95
Falta de compresión	0,95
Falta de cuña en el neopreno	0,98
Falta de barbacana	0,97
Falta de limpieza de encofrado	1
Falta de protección	0,98
Falta de protección de anclajes	1
Falta de protección frente a avenidas	0,91
Calidad deficiente de la pieza/elemento	0,96
Giro	0,88
Giro del estribo	0,85
Giro del muro lateral	0,9
Golpe o impacto	0,95
Impermeabilización defectuosa	0,98
Infradimensionamiento de apoyos	0,95
Infradimensionamiento del elemento	0,9
Mal funcionamiento del sistema de drenaje	0,97
Movimiento excesivo del tablero	0,96
Perdida de tratamiento protector	0,98

Presión excesiva de un elemento sobre otro	0,97
Retracción	0,99
Rotura de la solera por acción del tránsito	0,98
Rotura de conducción	0,99
Sedimentación orgánica	1
Sedimentación por escorrentía superficial	0,99
Subestimación de empujes	0,85
Tensión excesiva en zonas de anclajes	0,9
Vandalismo	0,99

Con las ecuaciones A.3.1.1 y A.3.1.2 y los coeficientes de las Tablas A.3.1.1 a A.3.1.6, se calcula la calificación de cada deterioro. Cada unidad puede tener una serie de deterioros, por lo que la calificación de la unidad será la menor de las calificaciones de los deterioros que tiene asociados. Además, el número total de deterioros por unidad “ N_u ” debe ponderarse en función de la calificación asignada a cada deterioro mediante el factor de ponderación λ que se le asigna a cada uno de los deterioros de acuerdo con la Tabla A.3.1.7.

Tabla A.3.1.7 Tablas de peso de ponderación por Deterioro (Adaptado de MOP, 2020)

Calificación del deterioro (C_d)	λ
0 – 19	10
20 – 39	5
40 – 59	3
60 – 79	2
80 – 100	1

De esta manera, se obtiene el número ponderado de deterioros N_u^* asociados a cada unidad de acuerdo con la ecuación A.3.1.3.

$$N_u^* = \sum \lambda_i \cdot N_{u,i} \quad (\text{A.3.1.3})$$

Donde:

N_u^* : Número total de deterioros asociados a la unidad.

λ_i : Peso de la ponderación del deterioro i .

$N_{u,i}$: Número de deterioros i asociados a la unidad.

En resumen, para cada unidad se obtienen los siguientes valores:

- i. Menor C_d de los deterioros asociados a la unidad
- ii. Número total ponderado de deterioros asociados a la unidad (N_u^*)

Luego, se asigna la calificación de deterioro a cada elemento como el menor C_d de todas las unidades pertenecientes al elemento y se calcula el número total de deterioros asociados al elemento (N_E), como se muestra en la ecuación A.3.1.4.

$$N_E = \sum (N_{u,i}^*) \quad (\text{A.3.1.4})$$

Posteriormente, se le asigna el menor C_d de los elementos incluidos dentro de un componente y se le denomina C_c (calificación provisional del componente). Se calcula además el número total de deterioros asociados a ese componente (N_C), ponderando el número de elementos del componente mediante la ecuación A.3.1.5.

$$N_C = \sum (N_E) / n_i \quad (\text{A.3.1.5})$$

Siendo n_i el número de elementos asociados a cada componente.

Finalmente, la calificación definitiva del componente C_c^* se calcula por medio de la ecuación A.3.1.6.

$$C_c^* = C_c \cdot \alpha \cdot \beta \quad (\text{A.3.1.6})$$

Donde α se estima a partir de las ecuaciones A.3.1.7 y A.3.1.8.

$$\alpha = \left(\frac{-0,1 \cdot N_C}{25} \right), \text{ para } N_C [0,25] \quad (\text{A.3.1.7})$$

$$\alpha = 0,9, \text{ para } N_C [25, \infty] \quad (\text{A.3.1.8})$$

El coeficiente β , por su parte, corresponde a los pesos de ponderación por componente los cuales se muestran en la Tabla A.3.1.8.

Tabla A.3.1.8 Pesos de ponderación por componente. (Adaptado de MOP, 2020)

Componente	β
Tablero	0,97
Estribo	0,98
Cepa	0,98
Acceso	1

ANEXO 3.2 Incorporación de variabilidad a la calificación de condición

La incertidumbre existente en las inspecciones visuales genera variabilidad en la calificación de condición obtenida a través del método de calificación de condición por componente. La calificación entregada podría estar subestimando o sobrestimando la calificación de condición real del componente y, por tanto, del puente. Para abordar esto se plantea la existencia de un “peor escenario posible” el cual representa el caso de que la condición real del componente sea menor a la entregada por la inspección, y un “mejor escenario posible” el cual representa el caso de que la condición real del componente sea mayor a la entregada por la inspección.

Para crear estos escenarios, se debe generar una variación numérica de $P_{t,i}$ de acuerdo con los parámetros obtenidos en las inspecciones visuales que determinan la calificación de condición por componente, es decir: causa (P_c), gravedad ($V_{gravedad}$) y extensión ($V_{extensión}$) del deterioro detectado. Además, para el “peor escenario posible” existe la posibilidad de no haberse detectado algún deterioro existente en la estructura, por lo que se incorpora un nuevo deterioro al componente.

A.3.2.1 Incorporación de deterioro tipo

Para el “peor escenario posible” se crea un deterioro tipo resultante del promedio de todos los posibles valores que podrían tomar P_d , P_u y P_c de cada componente. Este deterioro tipo tiene como finalidad

simplificar todos los posibles deterioros no detectados en cada componente, asumiendo que los deterioros no detectados son solo aquellos con una $V_{extensión}$ “pequeña” y un $V_{gravedad}$ “mínima”.

Por ejemplo, para el componente tablero se tiene:

- $P_d = 93$
- $P_u = 0,96$
- $P_c = 0,94$
- $C_o = [100 - ((0,15+0,1) \cdot 4)]/100 = 0,99$

Al utilizar la Ecuación A.3.1.1 se obtiene un $C_d = 83$. Luego, replicando el procedimiento para el resto de los componentes, se obtiene para cepas y estribos un $C_d = 83$, y para los accesos un $C_d = 84$.

A.3.2.2 Modificación de deterioros

La calificación de condición del componente viene dada por el deterioro con menor C_d dentro de la totalidad de deterioros. Para generar una variación en la calificación del componente se debe modificar en dicho deterioro los valores de $V_{extensión}$, $V_{gravedad}$ y P_c .

El cambio numérico en C_d será distinto de acuerdo con el tipo de deterioro y según la modificación que se le dé en $V_{extensión}$, $V_{gravedad}$ y P_c . Para generar tales cambios y contemplar todas las múltiples combinaciones de extensión, gravedad y causa de cada deterioro posible, se utilizan los deterioros tipo mencionados anteriormente para cada componente, mostrando los posibles cambios de C_d al variar independiente o conjuntamente la extensión, la gravedad y la causa en los deterioros.

Este método tiene como objetivo entregar el máximo valor que podría variar el deterioro que se desea modificar, generando cambios numéricamente realistas en el C_d y simplificando todos los casos particulares de modificaciones a uno general para cada componente de las estructuras analizadas. La Tabla A.3.2.1 corresponde al deterioro tipo para el componente tablero y los cambios en C_d al variar la extensión y/o la gravedad.

Tabla A.3.2.1 C_d de deterioro tipo según extensión y gravedad

Extensión Gravedad	Pequeña	Media	Elevada	Muy Elevada
Mínima	83	81	76	71
Media	73	72	67	62
Alta	56	55	50	45
Muy Alta	40	38	33	28

Para el deterioro tipo del componente tablero, se puede apreciar que un cambio de extensión “pequeña” a “media” genera un cambio en C_d de 83 a 81, mientras que un cambio de gravedad “mínima” a “media” genera un cambio en C_d de 83 a 73. Si se hace un cambio simultaneo de gravedad y extensión el C_d disminuye de 83 a 72. Misma lógica se utiliza al generar disminuciones en la extensión y/o gravedad.

La Tabla A.3.2.2 y la Tabla A.3.2.3 tabla corresponden al deterioro tipo para el componente tablero considerando para la causa el mayor y menor valor de P_c posible (0,99 y 0,85 respectivamente), además de los cambios en el C_d al variar la extensión y/o la gravedad en conjunto al cambio de causa.

Tabla A.3.2.2 C_d de deterioro tipo según extensión y gravedad con $P_c = 0,99$

Extensión Gravedad	Pequeña	Media	Elevada	Muy Elevada
Mínima	88	86	81	76
Media	77	76	71	65
Alta	60	58	53	48
Muy Alta	42	41	35	30

Tabla A.3.2.3 C_d de deterioro tipo según extensión y gravedad con $P_c = 0,85$

Extensión Gravedad	Pequeña	Media	Elevada	Muy Elevada
Mínima	75	74	70	65
Media	66	65	61	56
Alta	51	50	46	41
Muy Alta	36	35	30	26

Al cambiar la causa a la con P_c más alto (0,99), se puede ver que el C_d del deterioro tipo pasa de 83 a 88; mientras que al cambiar la causa a la con P_c más bajo (0,85), se puede ver que el C_d del deterioro tipo pasa de 83 a 75.

Si se replica el procedimiento para cada combinación posible de deterioro, causa, extensión y gravedad, además de condicionar el cambio en la extensión y gravedad a solo “un nivel” es decir, de “pequeña” a “media”, y no de “pequeña” a “elevada”, o de “mínima” a “media”, y no de “mínima” a “alta”, se obtiene que las variaciones posibles de C_d son:

- Cambiar la causa del deterioro genera aumentos en hasta 5 unidades, o disminuciones de hasta 8 unidades en C_d .
- Cambiar simultáneamente la extensión y la gravedad del deterioro genera un cambio (aumento o disminución) entre 1 a 22 unidades en C_d .

Si se juntan ambas modificaciones, lo máximo que podría aumentar el C_d de un deterioro sería hasta 27 unidades para el “mejor escenario posible”; mientras que lo máximo que podría disminuir el C_d de un deterioro sería hasta 30 unidades para el “peor escenario posible”. Esto es válido para tablero, cepas, estribos y accesos.

Teniendo los máximos posibles de modificación de C_d , las variaciones se concentrarán en los valores intermedios entre 0 y el valor máximo que podría aumentar o disminuir el C_d del peor deterioro del componente.

Además, las modificaciones al peor deterioro del componente realizadas en el “mejor escenario posible” no pueden entregar un valor de C_d mayor al deterioro que posee mayor C_d de cada componente, los cuales corresponden a:

- Para cepas, estribos y tablero el deterioro “Eflorescencias” con unidad “Revestimiento” y causa “Capilaridad”. El C_d resultante es de 94.
- Para accesos al deterioro “Madrigueras” con unidad “Terraplenes” y causa “Acción de la fauna”. El C_d resultante es de 93.

De esta manera no se estaría aumentado el C_d a valores imposibles de obtener.

Finalmente, las variaciones de $P_{t,i}$ debido a la modificación e incorporación de un deterioro solo ocurren dentro de rango de ICA' que se encuentra inicialmente la estructura según la Tabla A.3.2.1. Es decir, si el ICA' de la estructura es 81, solo se puede modificar para llegar a 80 en caso de disminuirla, esto debido a los criterios estipulados en la matriz de casos de análisis.

ANEXO 3.3 Determinación de ICA'

Corresponde a la ponderación de las calificaciones de condición obtenidas para cada componente. Entrega una calificación de condición única para la estructura. La Ecuación A.3.3.1 corresponde a las estructuras con presencia de cepas y la Ecuación A.3.3.2 corresponde a las estructuras sin presencia de cepas.

$$ICA' = \frac{(0,98 \cdot C_{Estribos}^* + 0,98 \cdot C_{Cepas}^* + 0,97 \cdot C_{Tablero}^* + C_{Accesos}^*)}{(0,98 + 0,98 + 0,97 + 1)} \quad (A.3.3.1)$$

$$ICA' = \frac{(0,98 \cdot C_{Estribos}^* + 0,97 \cdot C_{Tablero}^* + C_{Accesos}^*)}{(0,98 + 0,97 + 1)} \quad (A.3.3.2)$$

ANEXO 4.1 Estructuras ingresadas a la matriz de casos de análisis

Tabla A.4.1.1 Estructuras ingresadas a la matriz de casos de análisis

Categoría	Edad (años)	Calificación de condición (ICA)		
		80-100	60-79	40-59
Puentes Menores (10m-40m)	0-25	Puente 6	Puente 46	Puente 52
		Puente 7	Puente 47	
		Puente 8	Puente 48	
		Puente 9		
		Puente 10		
	25-50	Puente 11	Puente 49	
		Puente 12	Puente 50	
		Puente 13	Puente 51	
		Puente 14		
		Puente 15		
	+50	Puente 16	Puente 21	
		Puente 17	Puente 22	
		Puente 18	Puente 23	
		Puente 19	Puente 24	
		Puente 20	Puente 25	
Puentes Medianos (40m-200m)	0-25	Puente 26	Puente 53	
		Puente 27	Puente 54	
		Puente 28	Puente 55	
		Puente 29	Puente 56	
		Puente 30		
	25-50	Puente 31	Puente 36	Puente 58
		Puente 32	Puente 37	
		Puente 33	Puente 38	
		Puente 34	Puente 39	
		Puente 35	Puente 40	
	+50	Puente 57	Puente 5	
			Puente 4	
			Puente 1	
			Puente 2	
			Puente 3	
Puentes Mayores (+200m)	0-25	Puente 41	Puente 59	Puente 60
		Puente 42		
		Puente 43		
		Puente 44		
		Puente 45		
	25-50	Puente 62	Puente 63	
			Puente 64	
	+50	Puente 65	Puente 66	
			Puente 67	

ANEXO 4.2 Información general de puentes seleccionados en matriz de análisis

Tabla A.4.2.1 Información general de puentes seleccionados en matriz de análisis

Datos de inventario						t (años)	Costos de reemplazo (UF)					Calificación de condición				
Nombre	Longitud (m)	Categoría	Cepas	Año de construcción	Año inspección	Edad	Estribos	Cepas	Tablero	Accesos	Costo Total	Estribos	Cepas	Tablero	Accesos	ICA'
Puente 10	10,96	menor	NO	2002	2021	19	5.810	-	5.481	1.367	12.659	71	-	78	100	83
Puente 7	30	menor	NO	2008	2017	9	15.904	-	15.003	3.742	34.650	89	-	71	90	83
Puente 8	30,2	menor	NO	2008	2021	13	16.010	-	15.103	3.767	34.881	79	-	100	100	93
Puente 6	34	menor	NO	2008	2017	9	18.025	-	17.004	4.241	39.270	87	-	100	100	96
Puente 9	35	menor	NO	2003	2017	14	18.555	-	17.504	4.366	40.425	88	-	100	90	93
Puente 13	30	menor	SI	1979	2017	38	14.345	3.430	13.514	3.361	34.650	85	89	83	88	86
Puente 15	30	menor	NO	1985	2021	36	15.904	-	15.003	3.742	34.650	83	-	84	82	83
Puente 12	35	menor	NO	1986	2021	35	18.555	-	17.504	4.366	40.425	82	-	78	89	83
Puente 14	35	menor	NO	1991	2017	26	18.555	-	17.504	4.366	40.425	86	-	85	78	83
Puente 11	35,5	menor	SI	1980	2018	38	16.975	4.059	15.991	3.977	41.003	87	100	84	90	90
Puente 16	12	menor	NO	1971	2021	50	6.362	-	6.001	1.497	13.860	76	-	100	76	84
Puente 18	16	menor	NO	1969	2022	53	8.482	-	8.002	1.996	18.480	100	-	75	72	82
Puente 20	19	menor	NO	1967	2022	55	10.073	-	9.502	2.370	21.945	80	-	84	83	82
Puente 19	20	menor	NO	1956	2022	66	10.603	-	10.002	2.495	23.100	100	-	60	85	82
Puente 17	30	menor	SI	1968	2021	53	14.345	3.430	13.514	3.361	34.650	100	100	51	100	88
Puente 21	10,9	menor	NO	1950	2021	71	5.779	-	5.451	1.360	12.590	62	-	83	78	74
Puente 22	15,53	menor	NO	1959	2021	62	8.233	-	7.767	1.937	17.937	71	-	72	81	75
Puente 25	27	menor	NO	1963	2022	59	14.314	-	13.503	3.368	31.185	54	-	61	100	72
Puente 24	35	menor	SI	1962	2022	60	16.736	4.002	15.766	3.921	40.425	82	68	65	70	71
Puente 23	35	menor	NO	1960	2017	57	18.555	-	17.504	4.366	40.425	74	-	84	79	79
Puente 28	47	mediano	NO	2001	2018	17	24.917	-	23.505	5.863	54.285	100	-	68	90	86
Puente 26	70,45	mediano	SI	2012	2017	5	30.614	14.673	28.880	7.203	81.370	100	100	87	90	94
Puente 27	120,8	mediano	SI	2008	2021	13	52.493	25.160	49.520	12.351	139.524	87	88	100	78	88
Puente 30	160	mediano	SI	2000	2022	22	69.527	33.325	65.589	16.359	184.800	87	61	100	100	87
Puente 29	181,5	mediano	SI	1998	2021	23	78.870	37.803	74.402	18.558	209.633	100	75	82	90	87
Puente 35	40	mediano	SI	1984	2017	33	17.382	8.331	16.397	4.090	46.200	87	89	87	75	84
Puente 33	45	mediano	NO	1987	2022	35	23.857	-	22.505	5.613	51.975	78	-	100	85	87
Puente 32	54	mediano	SI	1991	2021	30	23.465	11.247	22.136	5.521	62.370	78	89	83	100	88
Puente 31	58	mediano	SI	1993	2021	28	25.204	12.080	23.776	5.930	66.990	78	87	61	100	82
Puente 34	90	mediano	SI	1974	2017	43	39.109	18.745	36.894	9.202	103.950	90	82	83	100	89
Puente 38	50	mediano	SI	1995	2022	27	21.727	10.414	20.497	5.112	57.750	71	71	54	89	72
Puente 36	65,5	mediano	SI	1992	2021	29	28.463	13.642	26.850	6.697	75.653	55	64	83	90	73
Puente 37	72	mediano	SI	1982	2021	39	31.287	14.996	29.515	7.362	83.160	61	70	49	100	70
Puente 39	75	mediano	SI	1981	2017	36	32.591	15.621	30.745	7.668	86.625	83	66	66	79	73
Puente 40	92,6	mediano	SI	1987	2021	34	40.239	19.287	37.960	9.468	106.953	65	84	67	73	72
Puente 3	46,58	mediano	SI	1964	2021	57	20.241	9.702	19.095	4.763	53.800	42	56	100	100	75
Puente 2	47	mediano	SI	1953	2021	68	20.424	9.789	19.267	4.806	54.285	63	77	55	86	70
Puente 5	81	mediano	SI	1967	2021	54	35.198	16.871	33.204	8.282	93.555	82	59	58	100	75
Puente 4	100,3	mediano	SI	1959	2021	62	43.585	20.890	41.116	10.255	115.847	88	59	75	70	73
Puente 1	116,6	mediano	SI	1965	2021	56	50.668	24.285	47.798	11.922	134.673	72	66	61	100	75
Puente 44	201	mayor	SI	1995	2017	22	73.999	70.936	69.808	17.412	232.155	73	90	85	90	85
Puente 45	235	mayor	SI	2010	2022	12	86.517	82.935	81.616	20.357	271.425	87	90	100	80	89
Puente 41	284	mayor	SI	1999	2021	22	104.556	100.228	98.634	24.602	328.020	87	100	75	100	91
Puente 43	400	mayor	SI	2003	2016	13	147.263	141.167	138.921	34.650	462.000	86	100	76	79	85
Puente 42	839,6	mayor	SI	2009	2021	12	309.104	296.309	291.595	72.730	969.738	63	100	80	83	82

ANEXO 4.3 Resultados de análisis de variabilidad

Tabla A.4.3.1 Resultados de análisis de variabilidad de puentes seleccionados

Nombre	Análisis de variabilidad					Rango de variabilidad					
	Mediana (UF)	s (UF)	Coef. de var. (%)	Mediana prom. (UF)	Coef. de var. prom. (%)	Percentil 5 (UF)	Percentil 95 (UF)	Rango variabilidad (UF)	Rango variabilidad relativo (%)	Rango promedio (UF)	Rango promedio (%)
Puente 10	10.005	884	9	29.372	7	8.611	11.484	2.873	29	5.820	21
Puente 6	37.324	1.969	5			34.086	40.572	6.486	17		
Puente 7	29.374	2.237	8			25.820	33.158	7.338	25		
Puente 8	32.153	1.780	6			29.271	35.067	5.795	18		
Puente 9	38.002	2.004	5			34.696	41.302	6.606	17		
Puente 11	33.532	1.752	5	30.890	6	30.677	36.421	5.743	17	5.937	19
Puente 12	31.615	2.025	6			28.409	35.107	6.698	21		
Puente 13	27.749	1.500	5			25.328	30.283	4.956	18		
Puente 14	34.026	2.069	6			30.679	37.509	6.830	20		
Puente 15	27.529	1.660	6			24.878	30.337	5.460	20		
Puente 16	10.617	755	7	15.670	8	9.287	11.774	2.487	23	4.335	28
Puente 17	23.963	1.768	7			20.791	26.622	5.831	24		
Puente 18	13.856	1.092	8			11.877	15.479	3.602	26		
Puente 19	14.603	1.771	12			10.965	16.779	5.814	40		
Puente 20	15.308	1.193	8			13.083	17.025	3.942	26		
Puente 21	6.370	947	15	16.211	12	4.372	7.474	3.102	49	5.697	38
Puente 22	10.154	1.074	11			8.181	11.699	3.518	35		
Puente 23	26.170	2.233	9			22.062	29.434	7.372	28		
Puente 24	23.325	2.277	10			19.235	26.740	7.505	32		
Puente 25	15.035	2.131	14			11.962	18.950	6.988	46		
Puente 26	78.639	3.515	4	120.204	5	72.797	84.506	11.710	15	20.502	17
Puente 27	128.450	6.465	5			117.832	139.026	21.194	16		
Puente 28	47.568	2.949	6			42.759	52.487	9.728	20		
Puente 29	183.829	9.683	5			168.029	199.657	31.628	17		
Puente 30	162.531	8.547	5			148.338	176.587	28.249	17		
Puente 31	51.462	4.019	8	53.566	6	45.182	58.277	13.095	25	10.328	19
Puente 32	51.343	2.815	5			46.886	56.161	9.275	18		
Puente 33	43.716	2.471	6			39.687	47.757	8.070	18		
Puente 34	82.784	4.458	5			75.108	89.933	14.825	18		
Puente 35	38.526	1.933	5			35.393	41.767	6.374	17		
Puente 36	52.488	6.112	12	54.923	12	42.799	62.371	19.572	37	20.738	38
Puente 37	49.480	7.376	15			38.039	61.670	23.630	48		
Puente 38	39.369	5.098	13			31.318	47.585	16.267	41		
Puente 39	60.923	5.572	9			52.064	70.306	18.242	30		
Puente 40	72.357	8.086	11			59.733	85.709	25.975	36		
Puente 1	76.897	7.539	10	51.475	11	65.207	89.955	24.748	32	17.538	36
Puente 2	24.715	3.684	15			17.898	30.072	12.174	49		
Puente 3	30.465	3.105	10			25.414	35.719	10.305	34		
Puente 4	70.090	6.950	10			56.171	79.247	23.075	33		
Puente 5	55.206	5.295	10			46.944	64.331	17.387	31		
Puente 41	289.424	14.636	5	393.779	6	265.214	313.579	48.365	17	77.951	19
Puente 42	821.673	57.273	7			729.983	917.644	187.661	23		
Puente 43	411.148	22.975	6			373.656	449.137	75.481	18		
Puente 44	195.816	11.681	6			177.184	215.346	38.162	19		
Puente 45	250.835	12.183	5			230.777	270.865	40.088	16		

ANEXO 4.4 Resultados de análisis de reducción de variabilidad

Tabla A.4.3.1 Variación en desviación estándar en escenarios de análisis de reducción de variabilidad

Nombre	Escenarios reducción de variabilidad											
	A (%)	A prom. (%)	B (%)	B prom. (%)	C (%)	C prom. (%)	D (%)	D prom. (%)	E (%)	E prom. (%)	F (%)	F prom. (%)
Puente 10	-15	-42	1	0	-3	-3	-37	-17	-43	-19	-47	-18
Puente 6	-58		0		-4		-6		-4			
Puente 7	-23		0		-1		-30		-35		-6	
Puente 8	-51		0		-3		-8		-9		-6	
Puente 9	-60		0		-3		-5		-4		1	
Puente 11	-46	-41	-9	-5	-1	-1	10	1	-3	-10	-8	-16
Puente 12	-34		-2		0		-5		-17		-24	
Puente 13	-42		-8		-2		9		-6		-13	
Puente 14	-40		0		-2		-11		-16		-19	
Puente 15	-41		-4		-1		1		-10		-17	
Puente 16	-28	-20	-23	-31	-2	-1	14	21	-7	-8	-15	-24
Puente 17	-20		-31		-2		27		-4		-18	
Puente 18	-23		-26		-3		14		-9		-19	
Puente 19	-9		-42		-1		20		-16		-42	
Puente 20	-21		-34		-1		28		-5		-26	
Puente 21	-5	-10	-60	-40	-1	-1	39	32	-8	-10	-44	-40
Puente 22	-11		-45		-2		38		-4		-35	
Puente 23	-17		-37		-1		32		-4		-26	
Puente 24	-11		-43		-1		38		-6		-38	
Puente 25	-6		-18		0		11		-26		-55	
Puente 26	-65	-47	0	0	-2	-3	-4	-11	-3	-12	0	-9
Puente 27	-46		0		-6		-12		-11		-7	
Puente 28	-39		0		0		-16		-18		-18	
Puente 29	-42		0		-5		-12		-13		-9	
Puente 30	-42		0		-5		-13		-13		-10	
Puente 31	-15	-36	1	-5	3	-1	-35	-4	-43	-15	-47	-19
Puente 32	-34		-1		-2		-10		-18		-23	
Puente 33	-50		-5		-3		3		-2		0	
Puente 34	-37		-17		0		18		-2		-11	
Puente 35	-46		-4		-1		2		-7		-12	
Puente 36	-7	-7	1	1	-4	-4	-52	-48	-57	-55	-57	-55
Puente 37	-4		0		-2		-50		-60		-61	
Puente 38	-5		1		-2		-57		-61		-60	
Puente 39	-11		0		-6		-33		-42		-42	
Puente 40	-7		1		-5		-46		-53		-55	
Puente 1	-10	-9	-26	-35	-1	-3	23	28	-16	-12	-47	-39
Puente 2	-4		-51		-3		41		-7		-43	
Puente 3	-10		-26		-3		23		-13		-34	
Puente 4	-10		-49		-2		36		-5		-34	
Puente 5	-11		-20		-5		15		-17		-37	
Puente 41	-41	-34	0	0	-7	-3	-13	-21	-13	-23	-10	-22
Puente 42	-20		0		1		-36		-40		-42	
Puente 43	-33		0		-4		-21		-23		-22	
Puente 44	-27		1		-2		-24		-28		-30	
Puente 45	-47		0		-6		-12		-11		-8	

A: CR_i determinístico; B: T determinístico; C: $P_{t,i}$ determinístico; D: $w_u = 0,8, w_a = 0,2$; E: $w_u = 0,5, w_a = 0,5$; F: $w_u = 0,2, w_a = 0,8$.

REFERENCIAS DE ANEXOS

MOP (2020). Manual para la obtención de calificación de puentes. Documento preparado por INES – Ingenieros Consultores (INES_IPP-1). Segunda Edición. Santiago, Chile.