

Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería en Computación
Programa de Maestría en Computación



Diseño de un Modelo Computacional para Apoyar el Cálculo de un Índice de Salud Estructural de Puentes para Costa Rica

Tesis para optar al grado de Magister Scientiae en Ciencias de la Computación

Jeison Sánchez Araya

Cartago, 29 de Agosto, 2024

ACTA DE APROBACION DE TESIS

Diseño de un Modelo Computacional para Apoyar el Cálculo de un Índice de Salud Estructural de Puentes para Costa Rica

Por: SANCHEZ ARAYA JEISON ANTONIO

TRIBUNAL EXAMINADOR

Firmado digitalmente por CESAR
ORLANDO GARITA RODRIGUEZ
(FIRMA)
Fecha: 2024.10.01 18:32:15 -06'00'

Dr. Cesar Garita Rodríguez
Profesor Asesor

GIANNINA
ORTIZ
QUESADA
(FIRMA)

Firmado
digitalmente por
GIANNINA ORTIZ
QUESADA (FIRMA)
Fecha: 2024.10.07
12:11:42 -06'00'

MSc. Giannina Ortiz Quesada
Profesor Lector

ANIBAL
IGNACIO RUIZ
BARQUERO
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por ANIBAL IGNACIO
RUIZ BARQUERO
(FIRMA)
Fecha: 2024.10.02
13:43:22 -06'00'

MSc. Anibal Ruíz Barquero
Lector Externo



LILIANA SANCHO CHAVARRIA (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-03-0257-0983
Fecha declarada: 07/10/2024 03:29:42 PM
Esta es una representación gráfica únicamente,
verifique la validez de la firma.

Dra.-Ing. Lilliana Sancho Chavarría
Presidente, Tribunal Evaluador Tesis
Programa Maestría en Computación



ACTA DE APROBACION DE TESIS

Con fundamento en lo que establecen los Artículos 22-24-25 del "Manual de Normas y Procedimientos para optar por el título de "Maestría en Computación con énfasis en Ciencias de la Computación - Académica", el Tribunal Examinador de Tesis (TET), nombrado con el propósito de evaluar la tesis de grado.

Diseño de un Modelo Computacional para Apoyar el Cálculo de un Índice de Salud Estructural de Puentes para Costa Rica

Habiendo analizado el resultado del trabajo presentado por el(los) estudiante(s):

Primer Apellido	Segundo Apellido	Nombre	No. de carné
SÁNCHEZ	ARAYA	JEISON ANTONIO	200770111

Emite el siguiente dictamen:

<p style="text-align: center;"><input checked="" type="radio"/> APROBADO</p> <p>Considerando que el trabajo realizado por el estudiante es SOBRESALIENTE, el tribunal le otorga la siguiente MENCION HONORIFICA:</p> <p style="text-align: center;"> <input type="radio"/> CUM LAUDE <input checked="" type="radio"/> MAGNA CUM LAUDE <input type="radio"/> SUMMA CUM LAUDE </p>	<p style="text-align: center;"><input type="radio"/> REPROBADO</p> <p style="text-align: center;"> <input type="radio"/> SE RECOMIENDA <input type="radio"/> NO SE RECOMIENDA </p> <p>Brindarle una nueva oportunidad para la DEFENSA PÚBLICA de su proyecto final. Nueva fecha: _____</p>
---	--

Dando fe de lo aquí expuesto firmamos (IDEM: HOJAS DE APROBACION DE TESIS)

<p>GIANNINA ORTIZ QUESADA (FIRMA)</p> <p style="font-size: small;">Firmado digitalmente por GIANNINA ORTIZ QUESADA (FIRMA) Fecha: 2024.09.30 07:48:32 -06'00'</p> <p>MSc. Giannina Ortiz Quesada Profesor Le-----</p>	<p style="text-align: center;">Firmado digitalmente por CESAR ORLANDO GARITA RODRIGUEZ (FIRMA) Fecha: 2024.09.27 14:45:09 -06'00'</p> <p style="text-align: center;">Dr. Cesar Garita Rodríguez Profesor Asesor</p> <p style="text-align: center;">ANIBAL IGNACIO RUIZ BARQUERO (FIRMA)</p> <p style="font-size: small; text-align: center;">Firmado digitalmente por ANIBAL IGNACIO RUIZ BARQUERO (FIRMA) Fecha: 2024.09.30 12:20:53 -06'00'</p> <p style="text-align: center;">MSc. Anibal Ruíz Barquero Lector Externo</p>	<p style="text-align: center;">LILIANA SANCHO CHAVARRIA (FIRMA) PERSONA FISICA, CPF-03-0257-0983 Fecha declarada: 30/09/2024 03:03:30 PM</p> <p style="text-align: center;">Dra.-Ing. Lilliana Sancho Chavarría Presidente, Tribunal Evaluador Tesis Programa Maestría en Computación</p>
---	---	---



23 de setiembre, 2024

FT-B1-MC

Resumen

En la infraestructura vial de Costa Rica así como en la de muchos países latinoamericanos, la condición general de los puentes de vías nacionales es una debilidad significativa que tiene un impacto negativo en el desarrollo socioeconómico del país. Por tanto, la necesidad de contar con un modelo que permita evaluar y monitorear la condición de los puentes a lo largo del tiempo es cada día más evidente. En este contexto, la presente investigación propone un diseño preliminar de un método computacional para apoyar el cálculo de un índice de salud estructural, para determinar cuantitativamente el estado de salud de los puentes en el país. Los productos principales de este trabajo en curso son: un modelo de inteligencia de negocios que permite almacenar los datos de las inspecciones de puentes y ejecutar los cálculos del índice; y un prototipo funcional realizado en Power BI que muestra las visualizaciones más relevantes. La utilización de técnicas de inteligencia de negocios y de visualización de información jerárquica como apoyo al cálculo del índice de salud estructural de los puentes son algunos de los aspectos novedosos de este trabajo. Además, el modelo propuesto permitiría apoyar la toma de decisiones de instituciones nacionales con respecto a prioridades de inversión en obras de infraestructura de una manera más eficiente y objetiva.

Palabras clave: Inteligencia de Negocios, Índice de Salud Estructural, Monitoreo de Salud Estructural, Puentes.

Abstract

In the road infrastructure of Costa Rica as well as that of many Latin American countries, the general condition of national road bridges is a significant weakness that has a negative impact on the socioeconomic development of the country. Therefore, the need to have a model that allows evaluating and monitoring the condition of bridges over time is becoming more evident every day. In this context, this research proposes a preliminary design of a computational method to support the calculation of a structural health index, to quantitatively determine the health status of bridges in the country. The main products of this work in progress are: a business intelligence model that allows storing bridge inspection data and running index calculations; and a functional prototype made in Power BI that shows the most relevant visualizations. The use of business intelligence techniques and hierarchical information visualization to support the calculation of the structural health index of bridges are some of the novel aspects of this work. In addition, the proposed model would allow supporting the decision-making of national institutions regarding investment priorities in infrastructure works in a more efficient and objective manner.

Keywords: Business Intelligence, Structural Health Index, Structural Health Monitoring, Bridges.

Dedico mi trabajo a mi hermano, quien en 1994 me regaló un juguete cuando obtuve mi primer 100 en la escuela.

Agradecimientos

Principalmente, quiero dar las gracias a mi asesor, el Prof. Dr. -Ing. César Garita, quien me brindó la oportunidad de realizar el trabajo de tesis con relación a las investigaciones del grupo e-Bridge. Además, me impulsó a incursionar en la publicación de artículos sobre el tema.

También quiero expresar mi agradecimiento al grupo de investigación e-Bridge, quienes, de una u otra forma, han hecho posible la elaboración de este tema de investigación.

Un profundo agradecimiento a todos los profesores de la maestría, quienes me han permitido aprender de diversas áreas de estudio a lo largo del programa.

Muchas gracias.

Jeison Sánchez Araya

Cartago, 4 de noviembre de 2024

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	1
1.2.1. Grupo de investigación e-Bridge	2
1.2.2. Proyectos de investigación y extensión	2
1.2.2.1. Proyecto e-Bridge 1.0	2
1.2.2.2. Proyecto e-Bridge 2.0	2
1.2.2.3. Proyecto e-Bridge 3.0	3
1.2.2.4. Proyecto e-Bridge X	3
1.2.2.5. Proyecto e-Bridge BHI	3
1.3. Definición del problema	3
1.4. Justificación del proyecto	4
1.4.1. Impacto	4
1.4.2. Profundidad	5
1.4.3. Innovación	6
1.5. Objetivos e hipótesis	6
1.5.1. General	7
1.5.2. Específicos	7
1.5.3. Hipótesis	7
1.6. Organización del documento	7
2. Marco teórico	9
2.1. Trabajos relacionados	9
2.1.1. Monitoreo de salud estructural SHM	9
2.1.2. Metodologías de cálculo de índices de salud de puentes	10
2.1.3. Enfoques para administración de información en SHM	12
2.1.4. Almacenes de datos e inteligencia de negocios (BI)	13
2.1.4.1. Almacenes de datos	14
2.1.4.2. Inteligencia de negocios	16
2.1.4.3. Herramientas existentes para BI	17
2.1.4.4. Aplicación de BI en SHM	18
2.1.5. Propuesta de investigación en BHI	18
2.2. Publicaciones relevantes	19

3. Análisis del método de cálculo del índice de salud	25
3.1. Conceptualización y análisis de BHI	25
3.1.1. Jerarquía del BHI	26
3.1.2. Categoría 1 - Evaluación de condición estructural (BCI)	27
3.1.2.1. Jerarquía de componentes, elementos y daños	28
3.1.2.1.1. Componentes	29
3.1.2.1.2. Elementos	29
3.1.2.1.3. Daños	29
3.1.2.2. Componente 1 - Evaluación de superestructura	30
3.1.2.3. Componente 2 - Evaluación de subestructura	31
3.1.2.4. Componente 3 - Evaluación de accesorios	34
3.1.3. Categoría 2 - Factores de riesgo o criticidad	35
3.1.3.1. Riesgo hidrometeorológico	35
3.1.3.2. Riesgo sísmico	36
3.1.4. Categoría 3 - Importancia socioeconómica	38
3.2. Procesos de cálculo de índices	38
3.2.1. Diagrama para cálculo del BCI	39
3.2.2. Diagrama para cálculo del BHI	39
3.2.3. Índice de condición estructural (BCI)	40
3.2.3.1. Componentes	40
3.2.3.2. Daños y elementos	41
3.2.4. Índice de condición hidrometeorológico (HCI)	41
3.2.5. Índice de condición sísmica (SCI)	42
3.2.6. Índice de salud estructural de puentes (BHI)	43
4. Diseño del modelo para cálculo del índice de salud	44
4.1. Propuesta para arquitectura de inteligencia de negocios	44
4.1.1. Modelo de inteligencia de negocios	45
4.1.2. Facilidad para visualizaciones	45
4.1.3. Aspecto innovador	46
4.1.4. Cómputo en la nube	46
4.2. Procesamiento de datos	46
4.2.1. Archivo de inspecciones	46
4.2.2. Aplicación para procesamiento de inspecciones	47
4.2.3. Proceso de extracción, limpieza y carga	48
4.3. Modelado de datos	49
4.3.1. Diagrama del modelo dimensional	49
4.3.2. Modelo para el índice de salud estructural (BHI)	50
4.3.2.1. Modelo para el índice de condición estructural (BCI)	50
4.3.2.2. Modelo para el índice sísmico (SCI)	52
4.3.2.3. Modelo para el índice hidrometeorológico (HCI)	52
4.3.3. Modificaciones importantes respecto a propuestas de referencia	53
4.3.3.1. Columnas calculadas y medidas	53

4.3.3.2.	Dimensión de pesos	53
4.3.3.3.	Dimensión de tiempo	53
4.3.3.4.	Hechos de inspecciones	54
4.3.3.5.	Hechos para cálculos de índices	55
4.3.3.6.	Dimensión para datos de riesgo hidrometeorológico	55
4.3.3.7.	Dimensión para datos de riesgo sísmico	56
4.3.3.8.	Dimensión de información del puente	57
4.4.	Diseño del algoritmo	59
4.4.1.	Cálculo del índice de salud estructural (BHI)	59
4.4.1.1.	Cálculo del índice de condición estructural (BCI)	60
4.4.1.1.1.	Cálculo de accesorios	60
4.4.1.1.2.	Cálculo de superestructuras	61
4.4.1.1.3.	Cálculo de subestructuras	62
4.4.1.2.	Cálculo del índice sísmico (SCI)	63
4.4.1.3.	Cálculo del índice hidrometeorológico (HCI)	64
4.4.1.3.1.	Cálculo del valor ponderado de ángulo de ataque	66
4.4.1.3.2.	Cálculo del valor ponderado de altura libre inferior	67
4.4.1.3.3.	Cálculo del valor ponderado de estrechamiento del cauce	68
4.4.2.	Cálculo de valores para la jerarquía de BCI	69
4.4.2.1.	Cálculo de valores para componentes	70
4.4.2.2.	Cálculo de valores para elementos	71
4.5.	Tecnologías seleccionadas	73
5.	Desarrollo de la herramienta	75
5.1.	Expresiones de análisis de datos (DAX)	75
5.1.1.	DAX para BHI	75
5.1.2.	DAX para BCI	76
5.1.2.1.	DAX para BCI de accesorios	76
5.1.2.2.	DAX para calcular el BCI de superestructuras	77
5.1.2.3.	DAX para BCI de subestructuras	78
5.1.3.	DAX para HCI	79
5.1.4.	DAX para SCI	80
5.1.5.	DAX para visualización de la jerarquía BCI	80
5.1.5.1.	DAX para calcular componentes	81
5.1.5.2.	DAX para calcular elementos	82
5.1.6.	Otros DAX importantes	83
5.2.	Pantallas y prototipo	87
5.2.1.	Indicadores	87
5.2.2.	Estadísticas	88
5.2.3.	Intervención	88
5.2.4.	Puentes	89
5.2.5.	Inspecciones	90

5.2.6.	Jerarquía de BCI	91
5.2.6.1.	Visualización de pesos por componente	92
5.2.6.2.	Visualización de pesos por elementos	93
5.2.6.3.	Visualización de pesos por daños	93
5.3.	Otras visualizaciones	94
5.3.1.	Ranking de puentes por BHI	94
5.3.2.	Ranking de puentes por BCI	95
5.3.3.	Gráfico pastel para mostrar BHI de puentes	96
6.	Validación y pruebas	97
6.1.	Evaluación funcional de la herramienta	97
6.1.1.	Indicadores	97
6.1.2.	Estadísticas	100
6.1.3.	Intervención	103
6.1.4.	Puentes	105
6.1.5.	Inspecciones	106
6.1.6.	Resumen de resultados de la evaluación funcional	106
6.2.	Evaluación estadística	107
6.2.1.	Consideraciones importantes	107
6.2.2.	Accesorios	108
6.2.2.1.	Análisis Alfa de Cronbach en daños	108
6.2.2.2.	Análisis si las variables son eliminadas	108
6.2.3.	Subestructura	109
6.2.3.1.	Análisis Alfa de Cronbach en daños	109
6.2.4.	Superestructura	109
6.2.4.1.	Análisis Alfa de Cronbach en daños	109
6.2.4.1.1.	Puentes tipo 1 y 3	110
6.2.4.1.2.	Puentes tipo 2 y 4	110
6.2.4.2.	Análisis si las variables son eliminadas	110
6.2.5.	Resumen de resultados del análisis	110
6.3.	Evaluación con expertos	112
6.3.1.	Diseño de la encuesta	112
6.3.2.	Resultado de la encuesta	113
7.	Conclusiones	115
7.1.	Conclusiones sobre el análisis del método de cálculo del índice de salud . . .	115
7.2.	Conclusiones sobre el diseño del modelo de cálculo del índice de salud . . .	116
7.3.	Conclusiones sobre desarrollo de la herramienta	117
7.4.	Conclusiones sobre validación y pruebas	117
7.5.	Trabajo futuro	118
7.6.	Comentarios finales	119
	Bibliografía	121

Apéndices	127
A. Azure Functions para ETL de inspecciones	127
A.1. Pseudocódigo en Python para ETL de procesamiento de inspecciones . . .	127
A.2. Repositorio con los fuentes para crear una Azure Functions	128
B. Script para crear el modelo tipo estrella	129
B.1. Script sql para crear las tablas de hechos y dimensiones	129

Índice de figuras

2.1. Arquitectura de Kimball	17
3.1. Categorías consideradas para cálculo de BHI	26
3.2. Jerarquía de BHI	26
3.3. Categorías de BHI	27
3.4. Evaluaciones de la condición estructural	28
3.5. Jerarquía de componentes, elementos y daños	28
3.6. Evaluación de superestructura	30
3.7. Evaluación de subestructura	32
3.8. Evaluación de accesorios	34
3.9. Riesgo hidrometeorológico	36
3.10. Riesgo sísmico	36
3.11. Importancia socioeconómica	38
3.12. Diagrama para cálculo de BCI	39
3.13. Diagrama para cálculo de BHI	40
4.1. Arquitectura de inteligencia de negocios	45
4.2. Archivo de inspecciones	47
4.3. Aplicación para procesamiento de inspecciones	48
4.4. Diseño para ETL de inspecciones	49
4.5. Modelo dimensional del índice de salud	50
4.6. Modelo del índice de condición estructural	51
4.7. Modelo del índice sísmico	52
4.8. Modelo del índice hidrometeorológico	52
4.9. Diseño del algoritmo para cálculo de BHI	59
4.10. Diseño del algoritmo para cálculo de BCI	60
4.11. Diseño del algoritmo para cálculo de accesorios	61
4.12. Diseño del algoritmo para cálculo de superestructuras	62
4.13. Diseño del algoritmo para cálculo de subestructuras	63
4.14. Diseño del algoritmo para cálculo del índice sísmico	64
4.15. Diseño del algoritmo para cálculo del índice hidrometeorológico	65
4.16. Diseño del algoritmo para ponderación del ángulo de ataque	66
4.17. Diseño del algoritmo para ponderación de altura libre inferior	67
4.18. Diseño del algoritmo para ponderación de estrechamiento del cauce	68

4.19. Diseño del algoritmo para jerarquía BCI	69
4.20. Diseño del algoritmo para cálculo de valores en componentes	70
4.21. Diseño del algoritmo para cálculo de valores en elementos - Parte 1	71
4.22. Diseño del algoritmo para cálculo de valores en elementos - Parte 2	72
5.1. Visualizaciones de página principal	87
5.2. Visualizaciones de estadísticas	88
5.3. Visualizaciones de intervención	89
5.4. Visualizaciones de puentes	90
5.5. Visualizaciones de inspecciones	91
5.6. Visualización de jerarquía BCI	92
5.7. Visualización de componentes.	92
5.8. Visualización de elementos	93
5.9. Visualización de daños.	94
5.10. Gráfico del ranking de puentes por BHI	95
5.11. Gráfico del ranking de puentes por BCI	95
5.12. Gráfico pastel para mostrar BHI de puentes	96
6.1. Resultados de la encuesta	114

Índice de cuadros

3.1. Ponderaciones para superestructura	31
3.2. Ponderaciones para subestructura	33
3.3. Ponderaciones para accesorios	34
3.4. Matriz de criticidad	35
3.5. Matriz de riesgo	35
3.6. Coeficientes sísmicos espectrales	37
3.7. Clasificador y factor de importancia operacional	37
3.8. Matriz de importancia socioeconómica	38
3.9. Escala de calificación para estrechamiento del cauce	41
3.10. Escala de calificación para altura libre inferior	42
3.11. Matriz para cálculo de BHI	43
4.1. Atributos de la dimensión de pesos	53
4.2. Atributos de la dimensión de tiempo	54
4.3. Atributos de hechos de inspecciones	54
4.4. Atributos de hechos de cálculos para los índices	55
4.5. Atributos de la dimensión de riesgo hidrometeorológico	56
4.6. Atributos de la dimensión de riesgo sísmico	57
4.7. Atributos de la dimensión para información de los puentes	58
6.1. Comparativa de la tabla de índices	98
6.2. Comparativa del gráfico BHI	98
6.3. Comparativa del gráfico SCI	98
6.4. Comparativa del gráfico HCI	99
6.5. Comparativa del gráfico BCI	99
6.6. Comparativa del mapa de puentes	100
6.7. Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según longitud	100
6.8. Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según material	101
6.9. Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según estructura	101
6.10. Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según carriles	102
6.11. Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según tipo ruta	102
6.12. Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según categoría TPD	103
6.13. Comparativa de la tabla de costos preliminares y recomendación de inter- vención	103

6.14. Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según recomendación de intervención	104
6.15. Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según costo de intervención	104
6.16. Comparativa de la tabla de información de puentes	105
6.17. Comparativa del mapa de la ubicación del puente	105
6.18. Comparativa de la tabla de información de puentes	106
6.19. Comparativa de la gráfica de índices según fecha de inspección	106
6.20. Clasificar la consistencia según el valor de alfa	108
6.21. Resumen de resultados del análisis	111

Índice de códigos

5.1. DAX para calcular el BHI	75
5.2. DAX para calcular el BCI	76
5.3. DAX para calcular el BCI de accesorios	76
5.4. DAX para calcular el BCI de superestructuras	77
5.5. DAX para calcular el BCI de subestructuras	78
5.6. DAX para calcular el HCI	79
5.7. DAX para calcular el SCI	80
5.8. DAX para calcular el BCI en la jerarquía	81
5.9. DAX para calcular los subíndices de componentes en la jerarquía BCI	81
5.10. DAX para cacular la suma de elementos en la jerarquía BCI	82
5.11. DAX para calcular los pesos BCI	83
5.12. DAX para calcular el valor de CaM	83
5.13. DAX para calcular la amenaza sísmica	83
5.14. DAX para calcular la longitud de asiento mínima	84
5.15. DAX para obtener el cumplimiento de ancho del asiento	84
5.16. DAX para calcular el estrechamiento del cauce	84
5.17. DAX para obtener el ranking de puentes por BHI	84
5.18. DAX para obtener el estado del BHI	84
5.19. DAX para obtener el estado del BCI	84
5.20. DAX para obtener el estado del HCI	85
5.21. DAX para obtener el estado del SCI	85
5.22. DAX para obtener la recomendación de intervención	85
5.23. DAX para calcular el costo de sustitución	86
5.24. DAX para calcular el costo de intervención	86
5.25. DAX para calcular el promedio del costo de intervención y sustitución	86
5.26. DAX para obtener la categoría TPD	86
A.1. Pseudocódigo en Python para procesamiento de inspecciones	127
B.1. Script sql para crear el modelo de datos tipo estrella	129

Nomenclatura

3NF	Tercera forma normal
ADF	Azure Data Factory
AF	Azure Functions
AKV	Azure Key Vault
APP	Siglas para referirse a una aplicación
ASB	Azure Storage Blob
AVG	Promedio de una lista de valores
Azure	Proveedor de Microsoft para computo en la nube
BCFS	Sistema de pronóstico de condición de puentes
BCI	Índice de condición estructural de puentes
BHI	Índice de salud estructural de puentes
BI	Inteligencia de negocios
Ca	Aceleración pico efectiva
CaM	Aceleración pico efectiva modificada
CONAVI	Consejo Nacional de Vialidad
DAX	Expresiones de análisis de datos
DW	Data warehousing
e-Bridge	Nombre del grupo de investigación
ER	Entidad relación
ERD	Entidad relación dimensional
ETL	Proceso de extraer, transformar y cargar datos
GIS	Sistemas de información geográfica
HCI	Índice de condición hidrometeorológica
MAX	Valor máximo de una lista
MOPT	Ministerio de Obras Públicas y Transportes
Power BI	Herramienta de software para BI
SCI	Índice de condición sísmica
SHM	Monitoreo de salud estructural
SQL	Lenguaje SQL
TEC	Tecnológico de Costa Rica
TPD	Tránsito promedio diario

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

En este documento se presenta la realización de tesis de posgrado titulada “Diseño de un Modelo Computacional para Apoyar el Cálculo de un Índice de Salud Estructural de Puentes para Costa Rica” para optar por el grado de Magister Scientiae en Ciencias de la Computación del Tecnológico de Costa Rica. La metodología utilizada para desarrollar el tema propuesto es ciencia del diseño [1] y el principal alcance en la investigación corresponde a la elaboración de un modelo dimensional de inteligencia de negocios que permita apoyar el cálculo de un índice de salud estructural de puentes en Costa Rica.

Con el prototipo desarrollado en la investigación se pretende facilitar un modelo de inteligencia de negocios aplicado a la conceptualización del índice de salud que permita a futuro tener un almacén de datos y un conjunto de visualizaciones interactivas para apoyar la toma de decisiones estratégicas en el área de gestión de estructuras de puentes en Costa Rica.

En este primer capítulo se presenta la descripción general al tema de investigación, contiene subsecciones para la introducción, descripción del problema, justificación, objetivos generales y específicos, hipótesis y organización del documento.

1.2. Antecedentes

Esta subsección presenta un breve resumen de la investigación propuesta, enfocándose en los conceptos básicos relacionados al contexto de la investigación respecto a e-Bridge.

1.2.1. Grupo de investigación e-Bridge

El grupo e-Bridge nació en el 2011 en el TEC como un proyecto de investigación dentro del programa e-Science y se caracteriza por ser un grupo multidisciplinario donde participan investigadores de las escuelas de Ingeniería en Construcción, Electrónica, Computación, Forestal, Producción Industrial, Ciencias de los Materiales, Diseño Industrial, entre otras. Otro elemento fundamental para el desarrollo del grupo ha sido la colaboración con el Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), y varias municipalidades [2].

El grupo e-Bridge está enfocado en el estudio de problemas relacionados con el estado de la salud de los puentes y su objetivo principal es brindar soluciones tecnológicas a estos problemas a través del monitoreo de variables en estas estructuras. Para más detalles, se puede consultar en el sitio [Proyecto e-Bridge](#) donde están disponibles algunos de los artículos, noticias e informes más populares en relación al tema.

1.2.2. Proyectos de investigación y extensión

En esta sección se hace un recuento de los principales proyectos de investigación y extensión desarrollados por e-Bridge en los últimos años. Estos proyectos representan la línea de investigación que ha seguido el grupo para el análisis de diversos problemas de salud estructural de puentes.

1.2.2.1. Proyecto e-Bridge 1.0

El proyecto e-Bridge 1.0 se enfocó en el tema de predicción remota de fallas en puentes (2011-2012). El objetivo de este proyecto inicial fue principalmente desarrollar capacidades institucionales en el tema de predicción de fallas en puentes, utilizando para ello el producto de un proyecto anterior [3].

1.2.2.2. Proyecto e-Bridge 2.0

El proyecto e-Bridge 2.0 - Sistema de información integrado para determinación del desempeño de estructuras de puentes, es el producto de la segunda etapa del proyecto (2013-2015) y su objetivo general fue desarrollar un sistema integrado de monitoreo para puentes. En este caso se desarrollaron varios prototipos incluyendo flujos de trabajo científicos e inteligencia de negocios (BI, por sus siglas en inglés). Para esta versión BI se enfocó a resolver consultas puntuales relacionadas con datos de inspección técnica de puentes pero no se profundizó con respecto a BI [4].

1.2.2.3. Proyecto e-Bridge 3.0

El proyecto e-Bridge 3.0 - Sistema para el Monitoreo de Estructuras de Puentes, (2016-2017) se enfocó en el diseño de un sistema de indicadores estratégicos para monitoreo de salud de puentes utilizando inteligencia de negocios. En cuanto al prototipo del sistema, se desarrolló una versión en Pentaho y otra en Power BI. El enfoque de BI se hizo en el análisis de indicadores estratégicos específicos [4], conformando a la vez el aspecto más innovador y relevante de la versión en el contexto de la propuesta de tesis.

1.2.2.4. Proyecto e-Bridge X

El proyecto e-Bridge X - Priorización de intervenciones de puentes utilizando indicadores de desempeño: Plan piloto Municipalidad de El Guarco (2018-2019), fue un proyecto de extensión que buscó aplicar y enriquecer lo desarrollado en e-Bridge 3.0, para la municipalidad del Guarco y a la vez darle un enfoque de uso de información estratégica para priorización de intervenciones de mantenimiento de las estructuras. Se enfocó en hacer un ranking de puentes para efectos de priorizar intervenciones de mantenimiento, implementado inteligencia de negocios o BI [5].

1.2.2.5. Proyecto e-Bridge BHI

El proyecto e-Bridge BHI (VIE 2020-2021) engloba el trabajo en progreso actualmente, donde se busca proponer un índice de salud estructural para puentes incluyendo una herramienta prototipo de apoyo al cálculo del índice. En esta versión se espera continuar usando inteligencia de negocios o BI (por sus siglas en inglés para Business Intelligence) [6].

El contexto de la tesis propuesta se desarrollaría dentro del objetivo 3 del proyecto BHI [7], el cual consiste básicamente en “aplicar el índice de salud estructural para estructuras tipo seleccionadas”, para lo cual se propone desarrollar una herramienta prototipo de apoyo al cálculo del índice. Cabe mencionar que es una investigación de índole interdisciplinario, con un grupo de investigadores con trayectoria y además en el cálculo del índice se involucran temas como el análisis de la complejidad de variables, análisis estadístico y probabilístico.

1.3. Definición del problema

La condición estructural de los puentes es crítica para el rendimiento global de la red vial de transporte de cualquier país y en particular de Costa Rica [8] [9] [4]. La condición o rendimiento de un puente representa la manera en que el puente funciona y se comporta ante los complejos factores que lo afectan todos los días [10]. La condición normalmente se basa en un conjunto de indicadores asociados a datos sobre inspecciones técnicas y

mediciones de salud estructural a lo largo del tiempo. La definición y gestión de estos indicadores cuantitativos provee una herramienta valiosa para comunicarse con diferentes personas relacionadas con gestión de estructuras de puentes (por ejemplo encargados de mantenimiento de puentes, políticos tomadores de decisiones, usuarios de red vial), sobre diferentes aspectos tales como: seguridad, vulnerabilidad ante desastres naturales, geometría, durabilidad, entre otros. Los indicadores se utilizan para labores de gestión como por ejemplo conservación de puentes, priorización de mantenimiento o reemplazo [11].

Con el objetivo de proponer un índice de salud estructural (BHI) específico para puentes en Costa Rica y de esta forma poder apoyar la priorización de las intervenciones de conservación de las infraestructuras a nivel nacional, surge entonces el proyecto e-Bridge BHI mencionado ya anteriormente [11]. Dentro de este contexto, el problema principal por resolver en la tesis, es la falta de un modelo computacional que permita apoyar el cálculo y análisis de un método de BCI específicamente diseñado para Costa Rica, de manera flexible y eficaz.

1.4. Justificación del proyecto

Para justificar la propuesta de investigación y tema de tesis en el contexto del proyecto e-Bridge BHI, se analizan tres aspectos que resaltan su importancia en términos de: 1) impacto, 2) profundidad e 3) innovación. Seguidamente se explican estos puntos en detalle.

1.4.1. Impacto

La condición de la infraestructura vial, es una gran debilidad socioeconómica de nuestro país ampliamente reconocida. Según el Reporte del 2019 de Competitividad Mundial del Foro Económico Mundial, Costa Rica ocupa la posición 62 del mundo entre 141 economías, sin embargo, en el tema de infraestructura se encuentra en la posición 63. De hecho, la infraestructura vial es una de las 3 debilidades más fuertes que el país viene arrastrando desde hace más de 15 años según este reporte. Por otro lado, de acuerdo con el Plan Nacional de Desarrollo y de Inversión Pública 2019-2022 del actual Gobierno de Costa Rica, nuestro país es la cuarta economía más competitiva de América Latina, pero está rezagada en el tema de infraestructura de transporte y entorno macroeconómico [12].

Dado que Costa Rica es un país en desarrollo, con recursos limitados y que enfrenta en este momento el déficit fiscal más alto de la historia, la situación demanda que se haga una correcta priorización de los proyectos de infraestructura vial, para conseguir los recursos e invertirlos de la forma más eficiente posible. Para poder realizar la priorización de estas intervenciones, primero es necesario conocer de forma precisa y cuantitativa la condición estructural de vías y el caso particular de puentes, los cuales son un elemento primordial en el funcionamiento de la infraestructura vial.

En el caso de infraestructura de puentes, según evaluaciones realizadas por el Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes (PEEP) de la Escuela de Ingeniería en Construcción del TEC, un 97 % de los puentes analizados en rutas nacionales presentan una condición regular o crítica en cuanto a partes de su estructura, e incluso más de la mitad no cumple con ciertos criterios tales como seguridad vial. Durante el periodo 2014-2018, se realizó el inventario de 1670 puentes y la inspección visual de daños para cada uno de estos, lo que permite tener una visión más clara de la condición de los puentes en rutas nacionales. Sin embargo, el resultado indica que solo un 4 % de los puentes cuenta con una condición satisfactoria, la cantidad de puentes que deben ser intervenidos es superior a los 1600 puentes, de los cuales unos 600 requieren una intervención en el corto plazo [13].

Estos números son alarmantes, sin embargo, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) está buscando constantemente recursos para intervenir más estructuras, por lo que es necesario conocer y evaluar la condición de los puentes de una manera eficiente y objetiva. En esta propuesta de investigación se pretende generar una herramienta que facilite el cálculo y el análisis de un índice que permita fundamentalmente darle una calificación global a la estructura de cada puente, utilizando herramientas de inteligencia de negocios para facilitar a las autoridades la toma de decisiones.

1.4.2. Profundidad

El objetivo principal de la propuesta para la tesis es diseñar un modelo computacional que permita apoyar el cálculo de un índice de salud estructural de puentes para Costa Rica. El aplicar un índice de salud estructural para estructuras (en este caso puentes) es una tarea de investigación de índole interdisciplinario para la que se requieren conocimientos varios, por ejemplo es necesario el análisis de la complejidad de variables, conocimientos estadísticos y computacionales para poder aportar con criterios válidos al realizar el cálculo del índice.

Uno de los aspectos importantes del contexto de los proyectos en e-Bridge es que ha impulsado la publicación de artículos científicos, los cuales son considerados como base de referencias de publicaciones relevantes para el marco teórico. Por tanto, con la propuesta de tesis de igual manera se motiva la elaboración de artículos científicos indexados para futuras publicaciones, aportando valor a la academia (el TEC), la comunidad científica y además suman a las investigaciones de importancia en temas de SHM del proyecto e-Bridge del programa de e-Science.

En cuanto al alcance específico, como se ha mencionado anteriormente, el trabajo no se trata de la definición del índice de salud estructural propiamente dicho, sino que este es un producto del proyecto e-Bridge que será tomado como insumo para la tesis. También es conveniente aclarar que el prototipo esperado no puede considerarse un sistema en producción que sea utilizado directamente en una organización, pues es en realidad una prueba de concepto para cumplir el objetivo principal, validar la hipótesis planteada y servir de base para eventuales desarrollos de sistemas reales en el futuro. Además, se

aplicará a un número de alrededor de 10 puentes, cuyos datos también estarán disponibles en el contexto de e-Bridge.

1.4.3. Innovación

Como se menciona en la sección de trabajos relacionados, es comprobable que en materia relacionada a SHM es posible encontrar bastante información, sin embargo no así para la combinación de inteligencia de negocios con la metodología de SHM, por esta razón el tema propuesto es innovador, y con la elaboración de la propuesta de tesis, se pretende continuar con la línea de investigación de e-Bridge para apoyar el cálculo del índice de salud estructural utilizando este enfoque. En los siguientes párrafos se resumen las publicaciones relevantes.

En contexto a las investigaciones del grupo en relación a SHM se describe la propuesta del desarrollo de una red colaborativa de sensores para monitorizar puentes, buscando poner a disposición tecnología que permita dar algún nivel de autonomía a las estructuras de los puentes en caso de emergencia, mediante la capacidad de los nodos sensor de colaborar entre sí para realizar un razonamiento del estado actual de la estructura a la que pertenecen e incluso de estructuras relacionadas entre sí, apoyando así la prevención de desastres en los puentes [14] [15].

Por otra parte, se cuenta con el desarrollo de un prototipo de un sistema de inteligencia de negocios aplicado a monitoreo de salud de estructuras de puentes en Costa Rica. El prototipo final consiste en un conjunto de reportes web con elementos de visualización interactivos que permiten realizar consultas de forma inmediata y flexible acerca de la condición de puentes nacionales [11]. Cabe mencionar que la aplicación de técnicas de inteligencia de negocios e indicadores estratégicos en el área de monitoreo de salud de puentes es una de las contribuciones novedosas de esta referencia.

En particular, no se ha encontrado en la literatura enfoques de definición de índices de salud estructural de puentes que utilicen técnicas de inteligencia de negocios, por esa razón la propuesta del “Diseño de un modelo computacional para apoyar el cálculo de un índice de salud estructural de puentes para Costa Rica” es considerada como innovadora.

1.5. Objetivos e hipótesis

En esta subsección se presentan el objetivo general, los objetivos específicos y la hipótesis respectiva.

1.5.1. General

El objetivo principal de la propuesta para el trabajo de tesis es diseñar un modelo computacional que permita apoyar el cálculo de un índice de salud estructural de puentes para Costa Rica.

1.5.2. Específicos

- Analizar el método propuesto para el cálculo del índice.
- Diseñar el algoritmo y el modelo de datos para apoyar el cálculo del índice.
- Desarrollar un prototipo de una herramienta para apoyar el cálculo del índice.
- Validar el prototipo desarrollado para apoyar el cálculo del índice.

1.5.3. Hipótesis

El modelo computacional propuesto apoya efectivamente la evaluación de un índice de salud estructural (BHI) específico para las condiciones de puentes en Costa Rica.

1.6. Organización del documento

Este documento está estructurado en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1 - Introducción: presenta la descripción general del proyecto de investigación, mencionando antecedentes en el contexto del grupo e-Bridge, la definición del problema, justificación del proyecto, objetivos generales y específicos e hipótesis.
- Capítulo 2 - Trabajos relacionados: también conocido como marco teórico, donde se describen los conceptos, definiciones, métodos y procedimientos que permiten abordar y comprender el ámbito de la investigación, además de determinar el estado del arte.
- Capítulo 3 - Análisis del método para cálculo del índice: se describen mediante diagramas y jerarquías las variables, indicadores, componentes, datos e inspecciones consideradas para conceptualizar y poder calcular el índice.
- Capítulo 4 - Diseño del modelo de BI: donde se describen elementos de diseño del modelo computacional para poder apoyar el cálculo del índice y realizar las visualizaciones.

-
- Capítulo 5 - Desarrollo de herramienta prototipo: incluye la descripción de las visualizaciones y funciones para apoyar el cálculo del índice de salud basado en la propuesta del modelo dimensional y la herramienta seleccionada.
 - Capítulo 6 - Validación: describe las pruebas realizadas en base a los lineamientos de la metodología ciencias del diseño y el juicio experto de investigadores del grupo e-Bridge para validar la aceptación de visualizaciones y los cálculos del índice de salud (BHI).
 - Capítulo 7 - Conclusiones y recomendaciones: este capítulo no solo presenta las conclusiones derivadas de la investigación, los resultados del proyecto, y las perspectivas de trabajos futuros, sino que también incluye una subsección dedicada a comentarios finales sobre las experiencias obtenidas y los logros del proyecto.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se describen los trabajos relacionados al tema de monitoreo de puentes e inteligencia de negocios. Además, se mencionan las publicaciones relevantes del grupo e-Bridge que forman la base de la investigación.

2.1. Trabajos relacionados

En esta sección se describen brevemente los temas e investigaciones relacionados con el contexto de esta propuesta de tesis, específicamente sobre monitoreo de salud de estructuras (SHM), metodologías para el cálculo de índices de salud de puentes, enfoques para administración de información en SHM, aplicación de almacenes de datos e inteligencia de negocios.

2.1.1. Monitoreo de salud estructural SHM

El Monitoreo de Salud Estructural (Structural Health Monitoring, SHM por sus siglas en inglés) es un campo de estudio de la ingeniería civil definido como la administración de grandes cantidades de datos asociados a variables específicas que indican la condición de sistemas estructurales, en este caso particular enfocado a los puentes en vías de transporte público [6]. Estos datos son analizados posteriormente con el fin de obtener información relevante sobre las estructuras incluyendo aspectos como vida útil remanente, estado o condición general, comprensión del comportamiento actual de la estructura, y otros [11].

Cabe resaltar que para lograr la captura de información y adecuado monitoreo se debe contar con información respecto al estado de las estructuras. Esta información se puede obtener ya sea en forma manual mediante inspecciones o bien de forma automática por medio de dispositivos tecnológicos como sensores que facilitan la obtención de datos relevantes [9]. Los parámetros que se miden mediante sensores que generan grandes volúmenes de datos, están típicamente asociados a variables estructurales tales como vibración y de-

formación, pero también pueden asociarse con variables del entorno de la estructura como el nivel del agua del río que pasa por debajo de un puente [15] [16].

En [17] se menciona que un sistema diseñado para monitorear la salud de estructuras debe contemplar al menos la integración de tres subsistemas para cumplir con los requisitos de un sistema SHM y poder organizar las actividades de monitoreo. En la referencia se resaltan como sistemas principales los siguientes: 1) un subsistema para adquisición de datos, 2) un subsistema para la gestión de datos, y 3) un subsistema para acceso y recuperación de datos.

Primero, el subsistema para adquisición de datos, cuyo enfoque principal es la captura de información, en la lectura se describe puede por ejemplo incluir sensores para obtener datos [17], En el contexto de e-Bridge ya se cuenta con trabajos relacionados para una red de sensores que conforman un prototipado en relación a este subsistema [16] [14].

Segundo, el subsistema de gestión de datos, conformado por técnicas de recopilación, almacenamiento y procesamiento de datos. Este sistema debe proporcionar una evaluación del estado de las estructuras. Se describe que el procesamiento de datos es fundamental para extraer información que permite la identificación del estado (o deterioro) de las estructuras [17].

Tercero, el subsistema de acceso y recuperación de datos, donde se describe como el sistema encargado del control y acceso a datos y su principal propósito es el análisis e interpretación con el fin de proporcionar información útil para la toma de decisiones [17].

In relation to structural health monitoring, the book entitled “Recent Advances in Structural Health Monitoring and Engineering Structures” represents the most recent advances in concepts and theory. This publication is considered fundamental for researchers and practitioners in the field, as it explores advances in damage detection and assessment, nondestructive testing, inverse problem solving, optimization, and the use of artificial neural networks in assessments. It stands out for its multidisciplinary approach that integrates artificial intelligence methods and optimization techniques to improve structural assessments, constituting a significant contribution to the development of the field [18].

2.1.2. Metodologías de cálculo de índices de salud de puentes

La condición del puente o índice de salud es una herramienta útil para evaluar la salud estructural. El índice de condición del puente (Bridge Condition Index - BCI) o de salud del puente (Bridge Health Index - BHI) se calcula con base en la condición de los elementos estructurales del puente y el servicio proporcionado por el puente. A los efectos de la gestión de puentes, el uso más importante de un BCI es identificar qué estructuras del inventario están más deterioradas y cuales necesitan reparaciones con mayor urgencia. En un sistema la funcionalidad del índice de estado del puente es ayudar a rastrear la condición general del sistema a lo largo del tiempo, evaluar los beneficios de los programas de mantenimiento y rehabilitación de puentes y servir como base para priorizar recursos

a los puentes [19].

Respecto al cálculo de índices, hay alta disponibilidad de artículos para revisión, por ejemplo, una tesis de maestría de la Universidad de Ohio, en la que el objetivo principal es comparar tres índices (BCIs) aplicando modelos de sensibilidad ANOVA para estimar la incertidumbre de los índices. Según el resultado el índice más completo considera costos de las intervenciones así como costos para los usuarios (operación extra de vehículos, atrasos, emisiones) [20].

De las referencias revisadas hasta la fecha, el documento “Synthesis of National and International Methodologies Used for Bridge Health Indices” representa un buen resumen de enfoques para cálculo de índices en SHM [19]. En dicho trabajo se analiza la condición de puentes de última generación de los puentes en los Estados Unidos y otros países. Los métodos actuales para desarrollar índices de condición o salud se agruparon en cuatro enfoques diferentes basados en los métodos computacionales utilizados. Con una discusión sobre cada enfoque se muestran los datos necesarios para calcular el índice con sus fortalezas y limitaciones [19].

Basados en el enfoque computacional utilizado, los métodos actuales para desarrollar índices de salud en puentes se pueden agrupar en los siguientes cuatro enfoques:

- Métodos basados en proporciones (ratio-based), asignan un BCI o un número de condición del puente en función de la relación entre la condición actual y la condición de la estructura cuando era nueva. El objetivo de este método es calcular el valor restante del puente [19].
- El método de promedio ponderado (weighted averaging approach), que es adecuado para planificar actividades de mantenimiento y rehabilitación de puentes. El enfoque estima la condición de toda la estructura combinando calificaciones de condición de todos los elementos individuales del puente ponderados por su importancia o contribución a la integridad estructural del puente. Como ejemplos de enfoques de combinación ponderada que se analizan en la referencia se menciona que son utilizadas en Australia (BCN), el Reino Unido (BCI), Sudáfrica (BCI) y Austria (BCI) [19].
- El método de los componentes con las peores condiciones (worst-condition), es común en los sistemas que realizan inspecciones en los componentes clave del puente. Este método se utiliza para extraer los defectos críticos en los componentes del puente. En este enfoque, el BCI se aproxima a la clasificación del componente en las peores condiciones. En la lectura se menciona que el Departamento de Transporte de Michigan utiliza la calificación NBI más baja en su Sistema de Pronóstico de Condición de Puentes (BCFS). BCFS ayuda a Michigan con las decisiones de selección de proyectos de puentes [19].
- Y el cuarto enfoque son los métodos cualitativos, el mismo no informa la condición del puente en una escala numérica. Describen una estructura como “Deficiente”,

“Regular” o “Bueno”, según el estado de la condición y la importancia de los elementos que se investigan [19].

Como puede observarse en [19], es común que cada país defina su propia metodología para calcular el BCI. Esto se debe a que existen muchos factores importantes relacionados con la condición específica de los puentes que hacen que las metodologías de cálculo de índices de condición no sean generalizables o fácilmente aplicables en diferentes países. Algunos de estos factores incluyen: alta diversidad de la infraestructura de puentes, heterogeneidad de las condiciones en que los puentes se desempeñan (p.ej. condiciones de tráfico, factores geo-climáticos y ambientales), diferencias en la manera en que los parámetros base se cuantifican, variabilidad en los datos disponibles en inventarios de puentes, e incluso diferencias en objetivos y políticas de las instituciones que administran las redes viales nacionales. Por tanto, aunque existen modelos comúnmente aceptados, normalmente cada país debe desarrollar y adaptar su propia metodología de cálculo de índices de condición de puentes.

Cabe mencionar que es posible encontrar enfoques que combinan varios métodos en ciertos casos o etapas del cálculo del índice [19]. Y también que una novedosa metodología para cálculo de BCI es enfocarse en aspectos de seguridad y confiabilidad de puentes [21].

Existen trabajos científicos recientes que investigan diversos temas relacionados con métodos para cálculo de BCI. Por ejemplo, en [5] se define un marco de referencia para clasificar el nivel de madurez de indicadores de desempeño utilizados en el cálculo de un BCI, pues pueden existir muchos indicadores pero no todos son aptos o relevantes para el índice particular. En la tesis de maestría científica en Ingeniería Civil presentada en [20], se hace una comparación de diferentes BCI para determinar su nivel de adecuación para apoyar escenarios para toma de decisiones asociadas a asignación de financiamiento bajo diferentes niveles de incertidumbre. La resiliencia de un puente (capacidad de recuperación ante un evento que dañe la estructura) incluyendo parámetros como amenazas por región, geología, sismicidad, durabilidad, es un tema actual de investigación [19].

Como se mencionó anteriormente, como parte de los productos del proyecto de investigación de e-Bridge, los ingenieros en construcción definirán los componentes, fórmulas y pesos para proponer un índice de condición estructural para el caso de Costa Rica. El trabajo de tesis propuesto se basa en este índice para desarrollar el modelo computacional adecuado para su cálculo. El índice de salud de puentes ya fue conceptualizado en [22] y el mismo es una propuesta de desarrollo que considera factores como: condición estructural, riesgos ambientales e importancia socioeconómica: La conceptualización y cálculos requeridos para obtener BHI se describen con más detalles en el capítulo 3.

2.1.3. Enfoques para administración de información en SHM

En administración de información en SHM se incluyen el estudio de modelos de información, bases de datos y sistemas administradores de datos en SHM de puentes. En el

proyecto e-Bridge 2.0 se generó un prototipo que permite la obtención de datos por medio de sistemas de información geográfica (GIS), sensores de medición del desempeño y aplicación de modelos de confiabilidad estructural. Estos sistemas utilizan herramientas de software diferentes cada una con integración a nivel de datos [23], por tanto, es necesario también un enfoque que permita la integración de información distribuida entre estos sistemas.

En ese sentido, en [23] se realiza una revisión de enfoques de integración de información en áreas relacionadas con el monitoreo de la salud estructural, con énfasis en puentes. Además, en [9] se presenta un enfoque basado en administración de flujos de trabajo científicos para modelar y ejecutar consultas estratégicas en SHM que requieren una adecuada integración de datos generados por diferentes componentes.

Por otro lado, existen muchas tecnologías y herramientas específicas que pueden aplicarse para apoyar la gestión o administración de información para SHM. En [11] en la sección de trabajos relacionados muestra una revisión de varias bibliografías y se provee un resumen de sistemas para administración de puentes utilizados mundialmente, entre los sistemas que destacan están:

- BRIMOS: Sistema que consta de varios sensores, redes de transmisión de datos de alta velocidad y un centro de información que recopila y difunde información de alto nivel sobre el comportamiento del puente [24] [11].
- ASHTOWare Bridge Management software: Utilizado para la gestión de puentes, conforma una solución eficiente de gestión de datos, también proporciona herramientas para la planificación del mantenimiento y la identificación de las necesidades de asignación de fondos [11].
- SHM Live: Sistema que realiza un monitoreo permanente de puentes transmitiendo datos de forma automática a la base de datos. Con visualizaciones gráficas del estado de los sensores en la estructura. Además permite configurar alertas en tiempo real y diferentes formas de visualización de datos [11].

En la referencia [11] se tiene un enfoque particular del proyecto e-Bridge que implementa inteligencia de negocios hasta donde se ha podido constatar. La elaboración de dicho trabajo permite a los administradores de infraestructura vial de Costa Rica, en particular del MOPT y del Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI) contar con información de fácil acceso para la toma de decisiones en temas de SHM.

2.1.4. Almacenes de datos e inteligencia de negocios (BI)

En esta subsección se describen brevemente los almacenes de datos y su importancia para la inteligencia de negocios, se mencionan además algunas herramientas existentes para BI y se introduce sobre la aplicación de BI en SHM.

2.1.4.1. Almacenes de datos

La información es considerada uno de los activos más importantes de cualquier organización. Y la misma casi siempre se utiliza para dos propósitos: mantenimiento de registros operativos y toma de decisiones analíticas. En pocas palabras, los sistemas operacionales son donde se ingresan los datos y el sistema DW/BI (data warehousing and business intelligence) es donde se obtienen los datos [25]. Esto describe dos mundos diferentes y que a la vez se complementan, por un lado la captura de datos y por otro el análisis de datos.

Más allá de la calidad de los datos, la mejor forma de almacenar y modelar los datos en un “data warehouse” es un tema de debate frecuente. Hay dos filosofías predominantes defendidas por los visionarios del almacenamiento de datos, a los que a veces se hace referencia como los padres del almacenamiento de datos, Bill Inmon y Ralph Kimball. Sus filosofías son similares en muchos aspectos, pero donde más difieren es en cómo almacenar los datos. En términos simples, Inmon aboga por almacenar los datos en forma granular y normalizada. El enfoque de Inmon a menudo se conoce como el enfoque de “fábrica de información corporativa” o “concentrar y hablar”. Mientras tanto, Kimball aboga por el uso de esquemas en estrella como una capa de presentación empresarial, conocida como la “arquitectura de bus de data mart”. Este esquema en estrella puede o no construirse con extractos directamente de los sistemas de origen o de los datos almacenados en un área de preparación. La investigación de los profesores Thilini Ariyachandra (Universidad de Cincinnati) y Hugh Watson (Universidad de Georgia) es uno de los pocos estudios que han analizado hasta qué punto el enfoque es más exitoso. Según su encuesta, el 39 % sigue predominantemente la fábrica de información corporativa de Inmon, mientras que el 26 % sigue la arquitectura de bus de data mart de Kimball. Ambos enfoques de implementación mostraron el mismo grado de éxito [25].

Al hablar de almacenes de datos e inteligencia de negocios es necesario presentar el modelado dimensional, que es ampliamente aceptado como la técnica preferida para presentar datos analíticos porque aborda dos requisitos: 1) entrega datos que son comprensibles para los usuarios, y 2) ofrece un rendimiento de consulta rápido [25].

Aunque los modelos dimensionales a menudo se instalan en sistemas de administración de bases de datos relacionales, son bastante diferentes de los modelos de 3NF (third normal form) que buscan eliminar las redundancias de datos. Las estructuras 3NF normalizadas dividen los datos en muchas entidades discretas, cada una de las cuales se convierte en una tabla relacional. La industria a veces se refiere a los modelos 3NF como modelos entidad-relación (ER). Los diagramas entidad-relación (diagramas ER o ERD) son dibujos que comunican las relaciones entre tablas. Tanto los modelos 3NF como los dimensionales se pueden representar en los ERD porque ambos consisten en tablas relacionales unidas; la diferencia entre los modelos 3NF y dimensionales es el grado de normalización. En el contexto de la referencia ambos son llamados modelos normalizados para minimizar la confusión [25].

Los modelos normalizados son inmensamente útiles en el procesamiento operativo porque

una transacción de actualización o inserción toca la base de datos en un solo lugar. Sin embargo, los modelos normalizados son demasiado complicados para las consultas de BI. Asimismo, la mayoría de los sistemas de administración de bases de datos relacionales no pueden consultar de manera eficiente un modelo normalizado; la complejidad de las consultas impredecibles de los usuarios resulta en un rendimiento desastroso de las consultas. El uso de modelado normalizado en la capa de presentación DW/BI anula la recuperación de datos intuitiva y de alto rendimiento. Afortunadamente, el modelado dimensional aborda el problema de esquemas demasiado complejos en el área de presentación [25].

De lo mencionado anteriormente se puede resumir que, un modelo dimensional contiene la misma información que un modelo normalizado, pero empaqueta los datos en un formato que ofrece al usuario la comprensión, el rendimiento de las consultas y la resistencia al cambio. Dentro del modelado se pueden encontrar diversas técnicas o esquemas que permiten la compresión de los datos, a continuación se describen algunas de ellas:

- Esquemas de estrella versus cubos OLAP. Los modelos dimensionales implementados en los sistemas de gestión de bases de datos relacionales se denominan esquemas en estrella debido a su parecido con una estructura en forma de estrella. Los modelos dimensionales implementados en entornos de bases de datos multidimensionales se denominan cubos de procesamiento analítico en línea (OLAP) [25].
- Tablas de hechos (fact table en inglés) para mediciones. La tabla de hechos en un modelo dimensional almacena las medidas de desempeño resultantes de los eventos del proceso de negocios de una organización. Debe esforzarse por almacenar los datos de medición de bajo nivel resultantes de un proceso comercial en un modelo unidimensional. Dado que los datos de medición son abrumadoramente el conjunto de datos más grande, no debe replicarse en varios lugares para múltiples funciones organizativas en la empresa. Permitir que los usuarios comerciales de múltiples organizaciones accedan a un único repositorio centralizado para cada conjunto de datos de medición asegura el uso de datos consistentes en toda la empresa [25].
- Tablas de dimensiones para contexto descriptivo. Las tablas de dimensiones son complementos integrales de una tabla de hechos. Las tablas de dimensiones contienen el contexto textual asociado con un evento de medición de proceso empresarial. Describen el “quién, qué, dónde, cuándo, cómo y por qué” asociado con el evento [25].
- Hechos y dimensiones unidos en un esquema de estrella. Es la unión de bloques de construcción en un modelo dimensional. Cada proceso empresarial está representado por un modelo dimensional que consiste en una tabla de hechos que contiene las medidas numéricas del evento. Esta estructura característica en forma de estrella a menudo se denomina unión en estrella, un término que se remonta a los primeros días de las bases de datos relacionales [25].

Hasta el momento se han descrito modelos de arquitecturas tradicionales, pero también es

importante mencionar que en la actualidad existen tendencias modernas de almacenes de datos en la nube, como “Amazon Redshift” and “Google BigQuery” [26], seguidamente una breve descripción de ambos:

- “Amazon Redshift” es una representación basada en la nube de un almacén de datos tradicional. Redshift requiere que los recursos informáticos se configuren en forma de clusters, que contienen una colección de uno o más nodos. Cada nodo tiene su propia CPU, almacenamiento y RAM. Un nodo líder compila las consultas y las transfiere a los nodos de cálculo, que ejecutan las consultas. En cada nodo, los datos se almacenan en fragmentos, llamados porciones. Redshift utiliza un almacenamiento en columnas, lo que significa que cada bloque de datos contiene valores de una sola columna en varias filas, en lugar de una sola fila con valores de varias columnas [26] [27].
- La arquitectura “Google BigQuery” es llamada serverless en inglés, y esto significa que Google administra dinámicamente la asignación de recursos de la máquina. Todas las decisiones de gestión de recursos están, por tanto, ocultas al usuario. BigQuery permite a los clientes cargar datos desde Google Cloud Storage y otras fuentes de datos legibles. La opción alternativa es transmitir datos, lo que permite a los desarrolladores agregar datos al almacén de datos en tiempo real, fila por fila, a medida que esté disponible [26] [28].

En fin, los datos son el bloque de construcción fundamental para una aplicación de BI. La inteligencia de negocios exitosa está influenciada tanto por los aspectos técnicos como por los aspectos de la organización. En general, las empresas valoran los aspectos organizacionales, como el patrocinio a nivel ejecutivo, la cultura y la asociación negocio-TI, por tener un mayor impacto en el éxito que los aspectos técnicos. Sin embargo, incluso si se hace todo bien desde una perspectiva organizacional, si no se tienen datos, no se puede hacer inteligencia de negocios. Si no tiene datos relevantes de alta calidad, con la variedad de fuentes de datos necesarias para respaldar una decisión, la iniciativa de BI tendrá un éxito reducido [29].

2.1.4.2. Inteligencia de negocios

En la subsección anterior se describieron los sistemas de DW/BI y los fundamentos del modelado dimensional. En esta subsección se presenta la arquitectura de Kimball (ver figura 2.1), de la cual es necesario entender la importancia estratégica de cada componente para evitar confundir su rol y función. Hay cuatro componentes separados y distintos a considerar en el entorno DW/BI: 1) sistemas de origen operativo, 2) sistema ETL, 3) área de presentación de datos y 4) aplicaciones de inteligencia de negocios [25]. Estos componentes se describen en mayor detalle a continuación:

1. Los sistemas de origen operativo son los sistemas operacionales de registro que capturan las transacciones comerciales. Se puede pensar en los sistemas de origen como

si fueran del almacén de datos porque presumiblemente tiene poco o ningún control sobre el contenido y el formato de los datos en estos sistemas. Las principales prioridades de estos sistemas son el rendimiento y la disponibilidad del procesamiento. Las consultas operativas contra los sistemas de origen son consultas limitadas, de un registro a la vez, que forman parte del flujo normal de transacciones y están severamente restringidas en sus demandas sobre el sistema operacional [25].

2. Los sistemas de extracción, transformación y carga (ETL) del entorno DW/BI constan de un área de trabajo, estructuras de datos instanciadas y un conjunto de procesos. El sistema ETL es todo lo que se encuentra entre los sistemas fuente operativos y el área de presentación DW/BI, en la referencia [25] hay toda una sección sobre sistemas ETL, por ahora solo se menciona para complementar la descripción de la arquitectura.
3. El área de presentación para apoyar la inteligencia de negocios, es donde los datos se organizan, almacenan y ponen a disposición para consultas directas por parte de usuarios, redactores de informes y otras aplicaciones de BI analíticas [25].
4. Las aplicaciones de inteligencia de negocios, es el último componente principal de la arquitectura Kimball DW/BI es la aplicación de BI. El término aplicación de BI se refiere a la gama de capacidades proporcionadas a los usuarios comerciales para aprovechar el área de presentación para la toma de decisiones analíticas [25].

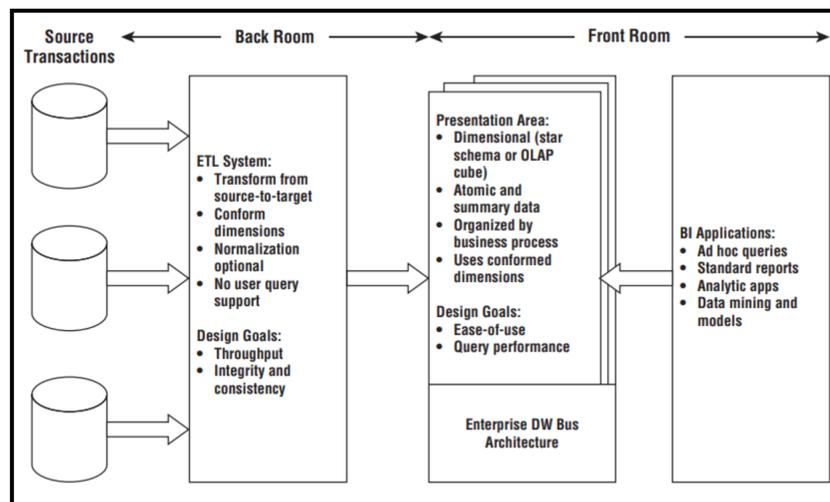


Figura 2.1: Arquitectura de Kimball [25]

2.1.4.3. Herramientas existentes para BI

Existe una gran variedad de herramientas para trabajar con inteligencia de negocios. Algunas de las más relevantes disponibles en el mercado son:

- Tableau: Es una herramienta de visualizaciones o gráficas que permite acceder y analizar los datos, crear cuadros de mando y reportes, así como compartirlos de manera sencilla [30] [31].
- SAP BI: Es una plataforma integral de inteligencia de negocio que permite obtener los datos, analizarlos y desarrollar modelos de aprendizaje automático. También, permite aplicarlos para realizar predicciones y proyecciones a futuro [30] [32].
- Pentaho: Es un software de inteligencia de negocio que proporciona integración de datos, servicios OLAP, informes, paneles de información, extracción de datos y capacidades de extracción, transformación y carga (ETL) [33].
- Oracle BI: Es un software de inteligencia de negocio cuyo punto relevante es el descubrimiento de patrones e interfaz de visualización de datos sencilla e intuitiva. Ofrece las principales funcionalidades de las herramientas de BI, tales como cuadros de mando, inteligencia artificial, alertas, etc [30] [34].
- Microsoft Power BI: Es una suite de herramientas de análisis y procesamiento de datos que provienen de diversos orígenes. Es una plataforma potente para la visualización de la información y creación de reportes [30] [35].

Un aspecto relevante en [11] es que se presenta una evaluación de herramientas, dentro de estas incluidas Tableau, Pentaho y Power BI, anteriormente mencionadas. En el artículo se concluye eligiendo Power BI ya que se considera muy calificada en cuestiones de funcionalidad y además el TEC cuenta con infraestructura y licencias para su uso web. Otro dato importante son los resultados del cuadrante mágico de Gartner donde para el 2021 Microsoft se muestra como la solución de BI más destacada, con diferencia notable sobre Tableau que se mantuvo muy cerca en reportes de años anteriores [36].

2.1.4.4. Aplicación de BI en SHM

Anteriormente en el capítulo 1 se describen cronológicamente las distintas versiones que ha tenido el proyecto e-Bridge. Cabe mencionar que las versiones con enfoques donde se ha explorado inteligencia de negocios son e-Bridge 2.0, e-Bridge 3.0 y e-Bridge X, específicamente la integración de información y manejo de indicadores estratégicos de salud de puentes utilizando inteligencia de negocios, lo cual ha sido uno de los factores innovadores de las investigaciones [11]. En este trabajo de tesis se busca extender investigaciones previas y explorar la aplicación más detallada de estas técnicas en el escenario particular del modelaje y cálculo de un índice de condición estructural específico para Costa Rica.

2.1.5. Propuesta de investigación en BHI

Cabe mencionar que el índice ha sido conceptualizado por investigadores del grupo e-Bridge, en la propuesta de investigación del periodo 2020-2021 [7] se proponen 3 ob-

jetivos, cuyos resultados fueron documentados por separado: Comparar las principales metodologías y técnicas utilizadas internacionalmente para la determinación de índices de condición o salud estructural [37], Diseñar un método para cálculo de un índice de salud estructural de puentes en Costa Rica [38], y Aplicar el índice de salud estructural para estructuras tipo seleccionadas [22]. Como resultado del trabajo realizado por el grupo en el capítulo 3 se presenta un análisis detallado de cómo obtener el valor del índice de salud de puentes, separado en la conceptualización y los cálculos necesarios.

2.2. Publicaciones relevantes

A continuación se listan algunas publicaciones relacionadas con el área de computación realizadas por investigadores y estudiantes de grado y posgrado de disciplinas como ingeniería en construcción, administración de tecnologías de información, ingeniería en computadores y electrónica, que han participado en el grupo e-Bridge, en coautoría con el Dr. César Garita, quien es el profesor asesor de esta propuesta de tesis. Los temas de estas publicaciones incluyen la aplicación de conceptos, métodos y técnicas de inteligencia de negocios, redes colaborativas, sistemas inalámbricos para monitoreo y flujos de trabajo científicos, en el área específica de monitoreo de salud de estructuras de puentes. Estas publicaciones tienen en común la aplicación novedosa de conceptos de ciencias de la computación para resolver problemas importantes en un área de otra disciplina, en este caso, ingeniería en construcción, específicamente monitoreo de salud de estructuras. Los resultados han podido validarse por pares expertos a través de los comités de programa de numerosas revistas y conferencias internacionales. El enfoque de creación de conocimiento nuevo en el contexto multidisciplinario evidenciado en las publicaciones, sirve de motivación también para esta propuesta de tesis y las publicaciones mencionadas proveen un marco de referencia para el desarrollo del objetivo de la investigación propuesta.

1. *Giannina Ortiz, Cesar Garita, Angel Navarro, and G. Paez, "Priorización de intervenciones en puentes utilizando indicadores", Tecnología en Marcha, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, Julio-Septiembre 2021*

Priorización de Estructuras de Puentes Utilizando Indicadores de Desempeño: Plan Piloto Municipalidad de El Guarco, este proyecto se ejecutó entre enero 2018 a diciembre 2019, por parte del Tecnológico de Costa Rica. Se muestra en el artículo la importancia de contar con herramientas para priorizar las intervenciones a realizar sobre un grupo de puentes y se describe la metodología utilizada para dicha priorización. La metodología propuesta se basa en el uso de 3 indicadores estratégicos: BCI, VAM y USO, definidos como indicadores técnicos, complementando este cálculo con un indicador socioeconómico, para tener finalmente una lista de intervenciones priorizada de forma integral [39].

2. *C. Garita and G. Ortiz, "A Business Intelligence Approach to Prioritize Bridge Maintenance Activities", in Accepted to: 10th European Workshop on Structural*

Health Monitoring - EWSHM 2022, Palermo, Italy, 2022.

Este trabajo presenta los principales resultados de un proyecto de extensión desarrollado por el programa e-Bridge del Instituto Tecnológico de Costa Rica, con el objetivo de diseñar y aplicar una metodología para priorizar las actividades de mantenimiento de puentes, tomando como caso de estudio los puentes reales administrados por un municipio regional específico. Para ello, en primer lugar, se inspeccionó y evaluó un determinado conjunto de puentes. Entonces, con este inventario detallado de información, se definió un conjunto de indicadores clave de desempeño del puente que incluyen la condición estructural, las variables ambientales y las categorías socioeconómicas. En consecuencia, se propuso una metodología a medida para priorizar diferentes tipos de actividades de mantenimiento para los respectivos puentes utilizando los indicadores mencionados anteriormente. La metodología se implementó utilizando una herramienta de inteligencia de negocios para gestionar toda la información y resolver consultas de priorización. Esta herramienta y los principales hallazgos del proyecto fueron compartidos durante el proyecto con actores comunitarios y colaboradores de la municipalidad a través de varios talleres. La metodología resultante y la herramienta desarrollada respaldan efectivamente la toma de decisiones con respecto a las actividades de mantenimiento de puentes para el municipio objetivo y podrían aplicarse en todo el país [40].

3. *A. Ruiz-Barquero, C. Garita, and G. Ortiz, "Collaborative Sensors Networks for Structural Health Monitoring of Bridges", presented at the XLVI Conferencia Latinoamericana de Informática - CLEI 2020, Loja, Ecuador, 2020.*

Diseño e implementación de un prototipo de red de sensores colaborativos para monitorear el estado de los puentes en Costa Rica, con el fin de apoyar la prevención de los efectos negativos causados por desastres naturales y en particular por un aumento en el nivel del agua del río debajo de un puente. En la referencia se describe el proceso de análisis, diseño, implementación y pruebas de un sistema colaborativo de red de sensores que cumple con los requisitos para monitorear y alertar en situaciones de emergencia asociadas a estructuras tipo puente [15].

4. *C. Garita, G. Ortiz, and J. Mora, "Análisis de requerimientos para un sistema nacional de monitoreo de puentes", Tecnología en Marcha, vol. 31, pp. 63-72, Octubre 2018.*

En Costa Rica, aún no se cuenta con un inventario completo de puentes en rutas nacionales por lo que resulta muy difícil conocer su condición real para poder diseñar y desarrollar un adecuado plan de mantenimiento e intervención a largo plazo, así como priorizar mejor la inversión de recursos estatales. Para abordar este problema, el proyecto de investigación e-Bridge 3.0 planteado en el Tecnológico de Costa Rica, tiene como objetivo principal diseñar un prototipo de un sistema de monitoreo de puentes que permita integrar información de las estructuras existentes con el fin de apoyar la toma de decisiones por parte de diversos actores e instituciones en el área de gestión vial. Como base para el diseño del prototipo, se realizó una fase

de análisis de requerimientos, incluyendo una revisión de trabajos relacionados y una comparación detallada de sistemas existentes que condujeron a la identificación de los actores, la información y los procesos principales que deben ser tomados en cuenta por un sistema de este tipo. Este artículo resume los resultados obtenidos del análisis de los requerimientos funcionales más importantes que debe considerar un sistema nacional de monitoreo de puentes [41].

5. C. Garita and G. Ortiz, “Development of a Business Intelligence Prototype for Bridge Health Monitoring”, presented at the 3rd International Conference on Information Systems and Computer Science - INCISCOS 2018, Quito, Ecuador, 2018.

Desarrollo de un prototipo de un sistema de inteligencia de negocios aplicado a monitoreo de salud de estructuras de puentes en Costa Rica. El prototipo final consiste en un conjunto de reportes web con elementos de visualización interactivos que permiten realizar consultas de forma inmediata y flexible acerca de la condición de puentes nacionales. Las consultas se basan en la definición de un conjunto de indicadores estratégicos relacionados con características específicas de puentes incluyendo su condición estructural, funcionalidad y variables ambientales. La aplicación de técnicas de inteligencia de negocios e indicadores estratégicos en el área de monitoreo de salud de puentes es una de las contribuciones novedosas de este trabajo [11].

6. M. Chaves, A. Ruiz, C. Garita, and G. Ortiz, “Preliminary Design of a Low-cost Water Level Monitoring System for Bridges”, presented at the XXXVIII IEEE Convention of Central America and Panama - CONCAPAN 2018, San Salvador, El Salvador, 2018.

Diseño e implementación de un primer prototipo de un sistema de monitoreo de nivel de agua para puentes. Se describe cómo se implementó la solución propuesta utilizando sensores ultrasónicos integrados conectados a placas de sistema integradas. El sistema propuesto permitirá que la comunicación entre unidades de monitoreo distribuidas se utilice en el futuro como una red colaborativa de sensores para la prevención de desastres [42].

7. G. Ortiz and C. Garita, “The e-Bridge Project Approach for SHM of Bridges in Costa Rica: Maintenance Bridge Tools”, presented at the 7th Workshop on Civil Structural Health Monitoring - CSHM-7 2017, Medellín, Colombia, 2017.

Los principales resultados incluyen la generación de herramientas para la selección de las técnicas de evaluación más adecuadas incluyendo inspección visual, monitoreo, cálculo de capacidad de carga y determinación de confiabilidad estructural. Una de las herramientas más útiles es la generación de indicadores de desempeño, calculados a partir de la información generada para cada puente y que permitan una evaluación inicial de sus condicionantes y el establecimiento de una propuesta para el mantenimiento de los puentes en Costa Rica con base en los indicadores, generando finalmente una herramienta de gestión para la gestión de esta infraestructura. El proyecto también cuenta con un programa de prestación de servicios a

través del cual se están realizando contratos con instituciones del gobierno nacional en el campo específico de la evaluación estructural de puentes [43].

8. *M. Gutierrez; and C. Garita, "Prototype Development of a Wireless Embedded System for Bridge Monitoring", in 37th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVII), Managua, Nicaragua, 2017.*

Diseño y desarrollo de un prototipo de un sistema integrado inalámbrico que utiliza sensores de acelerómetro específicos para generar datos relevantes para el monitoreo de la salud de los puentes. Este trabajo incluye el análisis de requerimientos, diseño e implementación de un prototipo de sistema utilizando principalmente tecnologías gratuitas o de bajo costo. El prototipo también incluye una interfaz web que permite el análisis de los datos de vibración del puente, entre otras características [44].

9. *C. Garita and G. Ortiz, "Integrando Información Estratégica para Monitoreo de Puentes Nacionales", presented at the III Jornadas Costarricenses de Computación e Informática - JOCICI 2017., Cartago, Costa Rica, 2017.*

En Costa Rica, la infraestructura vial representa una de las debilidades más grandes en términos de desarrollo socio-económico del país. En este contexto, los puentes son estructuras fundamentales de la infraestructura vial. Para apoyar la toma de decisiones gubernamentales en este sector, es necesario en particular contar con información detallada sobre los puentes nacionales y su condición. Este artículo presenta el enfoque general y algunos resultados preliminares del proyecto de investigación e-Bridge 3.0, que busca desarrollar un prototipo de un Sistema de Monitoreo de Puentes aplicando herramientas de inteligencia de negocios para integrar información estratégica [45].

10. *C. G. G. Ortiz, "e-Bridge 3.0: A Strategic Approach to Structural Health Monitoring of Bridges in Costa Rica", presented at the 6th IFIP World Information Technology Forum, WITFOR 2016, San Jose, Costa Rica, 2016.*

La versión de e-Bridge 3.0 es un proyecto reciente del Tecnológico de Costa Rica (TEC) destinado al diseño de un sistema de monitoreo de puentes para integrar información estratégica sobre estructuras de puentes. Se aplicarán técnicas modernas de inteligencia empresarial para generar indicadores de rendimiento estratégicos con respecto, por ejemplo, a la confiabilidad general y la vida útil restante. Este artículo presenta el proyecto e-Bridge 3.0 como una iniciativa para el establecimiento de un sistema nacional de monitoreo de puentes, que tendría un impacto significativo en la efectividad de la gestión de la infraestructura civil nacional [4].

11. *C. Garita, "Enfoques de Integración de Información para Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural de Puentes", Tecnología en Marcha, vol. 29, Enero-Marzo 2016.*

Revisión de enfoques de integración de información en áreas relacionadas con el monitoreo de la salud estructural, con énfasis en puentes. El estudio realizado busca recopilar experiencias que eviten "reinventar la rueda", así como identificar oportunidades de diferenciación, que sirvan de base para proponer enfoques novedosos

de integración de la información en este campo. Este trabajo se realizó como parte del proyecto de investigación e-Bridge 2.0, del Tecnológico de Costa Rica y el objetivo es investigar previo al diseño y desarrollo de sistemas que permitan recolectar, procesar, almacenar e integrar información asociada al monitoreo periódico de la condición de estructuras civiles como edificios y puentes [23].

12. G. Ortiz and C. Garita, "The e-Bridge 2.0 Approach for SHM of Bridges in Costa Rica", in *Structural Health Monitoring 2015 - System Reliability for Verification and Implementation, Proceedings of the Tenth International Workshop on Structural Health Monitoring, University of Stanford, September 1–3, 2015. vol. 1, F.-K. Chang; and F. Kopsaftopoulos, Eds., ed Pennsylvania, USA: DEStech Publications, Inc., 2015.*

El proyecto e-Bridge 2.0 - Sistema Integrado para el desempeño de las Estructuras de Puentes, cuyo objetivo fue el desarrollo de un prototipo de sistema para la resolución de dudas estratégicas sobre el desempeño de los puentes en Costa Rica. Los componentes principales del prototipo del sistema incluyen: un sistema de información técnica para la investigación de puentes; sistemas de sensores para medir variables de desempeño como vibración, desviación y deformación; un modelo de confiabilidad para analizar el comportamiento estructural; un sistema de información geográfica para considerar aspectos ambientales; y un sistema de integración de información para acceder sin problemas a información distribuida generada por diferentes componentes y sistemas. Entre las características novedosas de este proyecto podemos mencionar su fuerte enfoque multidisciplinario para desarrollar soluciones integradas de SHM de puentes [8].

13. A. Obando y C. Garita, "Diseño General de una Red Inalámbrica para Monitoreo de Salud de Puentes", presented at the *XXXIV Convención IEEE de Estudiantes de Centroamérica y Panamá - CONESCAPAN XXXIV, San Salvador, El Salvador, 2015.*

Proceso seguido en el proyecto e-Bridge 2.0 - Sistema integrado para la Determinación del Desempeño de Estructuras de Puentes, para diseñar un prototipo de una red inalámbrica de sensores que apoye tareas relacionadas con el monitoreo de salud de estructuras de puentes en Costa Rica. La red fue diseñada utilizando sistemas tipo PC-Duino con una versión de Linux. El diseño realizado presenta ventajas específicas con respecto a sistemas propietarios existentes pues permite construir redes inalámbricas abiertas, escalables, de bajo costo y consumo de energía, que se adaptan bien a los requerimientos de escenarios de monitoreo remoto de estructuras civiles [14].

14. C. Garita and G. Ortiz, "Towards a Workflow Management Approach for Health Monitoring of Bridges", in *Collaborative Systems for Smart Networked Environments: 15th IFIP WG 5.5 Working Conference on Virtual Enterprises, PRO-VE 2014, Amsterdam, The Netherlands, October 6-8, 2014, Proceedings. vol. 434, L.*

M. Camarinha-Matos and H. Afsarmanesh, Eds., ed Berlin Heidelberg: Springer, 2014, pp. 489-497.

Structural Health Monitoring (SHM) se refiere al almacenamiento y análisis de grandes cantidades de datos de sensores asociados a variables específicas que indican el estado de una estructura civil, por ejemplo, un puente en una carretera nacional. Las tareas de análisis de SHM generalmente involucran la integración de diferentes herramientas que pueden ser altamente heterogéneas, autónomas y distribuidas físicamente entre diferentes organizaciones. Se presenta un enfoque científico de gestión del flujo de trabajo para modelar y ejecutar consultas SHM estratégicas que requieren una integración adecuada de los datos generados por diferentes componentes de software [9].

15. *Ortiz, G., Garita, C., Navarro, A., Paez, G., and Alfaro, A. (2024). "Diseño de un índice de salud estructural de puentes para priorización de intervenciones técnicas en Costa Rica.", Tecnología en Marcha, 37(2), 144-154*

Este artículo presenta una propuesta que busca estandarizar un índice de la condición de la salud estructural de un puente, que permita priorizar y asignar recursos de forma objetiva. Para este índice se utiliza la evaluación de la condición estructural de elementos críticos, así como matrices de riesgo relacionadas con amenazas sísmicas e hidrometeorológicas. Como resultado, el diseño de este índice involucra el análisis de una gran cantidad de variables mediante criterios técnicos y estadísticos [46].

16. *R. Cespedes-Deliyore, A. Ruiz-Barquero, C. Garita and G. Ortiz, "General Design of a Power-Saving Strategy for a Collaborative Wireless Sensor Network," 2022 IEEE 40th Central America and Panama Convention (CONCAPAN), Panama, Panama, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/CONCAPAN.*

Este trabajo presenta una propuesta general de diseño para una estrategia de ahorro de energía para una red colaborativa utilizada en SHM. Esta estrategia incluye; recomendaciones de perfilado de código, mediciones de carga de CPU y mediciones de voltaje-corriente para un enfoque de optimización a nivel de instrucción. Esta estrategia aumenta la autonomía de la batería de los nodos de la red hasta en un 586 % con comunicación LoRa y administración dinámica de energía, considerando tres horas y 31 minutos como línea base, logrando hasta veintitrés horas y 45 minutos; además, puede reducir la utilización media de energía en un 11.81 % en dispositivos maestros que para este trabajo se denominan dispositivos primarios y en un 39.52 % para dispositivos esclavos, tratados como los secundarios. Además, se presentan algunos resultados significativos para la reducción de la utilización de CPU, así como la identificación de algunas áreas de interés para futuras mejoras [47] [48].

Capítulo 3

Análisis del método de cálculo del índice de salud

Este capítulo describe cómo obtener el valor del índice de salud estructural de puentes, y está dividido en dos subsecciones: la primera, conceptualización y análisis del BHI, detalla las categorías e indicadores considerados para el cálculo; la segunda, el proceso de cálculo, muestra los pasos o procedimientos requeridos para conseguir el resultado del índice.

3.1. Conceptualización y análisis de BHI

Esta subsección se enfoca en conceptualizar las categorías, componentes, elementos, e indicadores tomados en consideración para lograr el cálculo del índice de salud estructural (BHI).

Es importante mencionar que los componentes y fórmulas para el cálculo del índice han sido previamente propuestos y conceptualizados por miembros del grupo de investigación de e-Bridge [7] [37]. En este capítulo, se realiza un análisis del índice para comprender y desarrollar el modelo requerido desde el punto de vista computacional, incluyendo una visualización jerárquica de la estructura así como diagramas del proceso de cálculo del índice.

Luego de la comparativa de metodologías como resultado de la investigación el método de cálculo recomendado para puentes en Costa Rica está basado en proporciones [38] ya que se usa un número o mejor dicho un porcentaje de la condición actual de los puentes; se le da un valor remanente al puente [7]. La investigación ha llevado a considerar 3 categorías de indicadores para el cálculo del índice, como se puede ver en la figura 3.1, donde: 1) es el estado o condición de la estructuras, 2) los factores ambientales de riesgo (o criticidad), y 3) la importancia socioeconómica [38].



Figura 3.1: Categorías consideradas para cálculo de BHI [37].

3.1.1. Jerarquía del BHI

Dada la gran cantidad de variables consideradas en el cálculo del índice, es necesario y conveniente establecer una jerarquía o agrupamiento de los diferentes factores involucrados. Como se mencionó anteriormente, el BHI está compuesto por la condición estructural del puente (BCI estructural), factores ambientales e importancia socioeconómica. En las figuras 3.2 y 3.3, se puede ver dicha jerarquía del cálculo del BHI con sus respectivas categorías e indicadores.

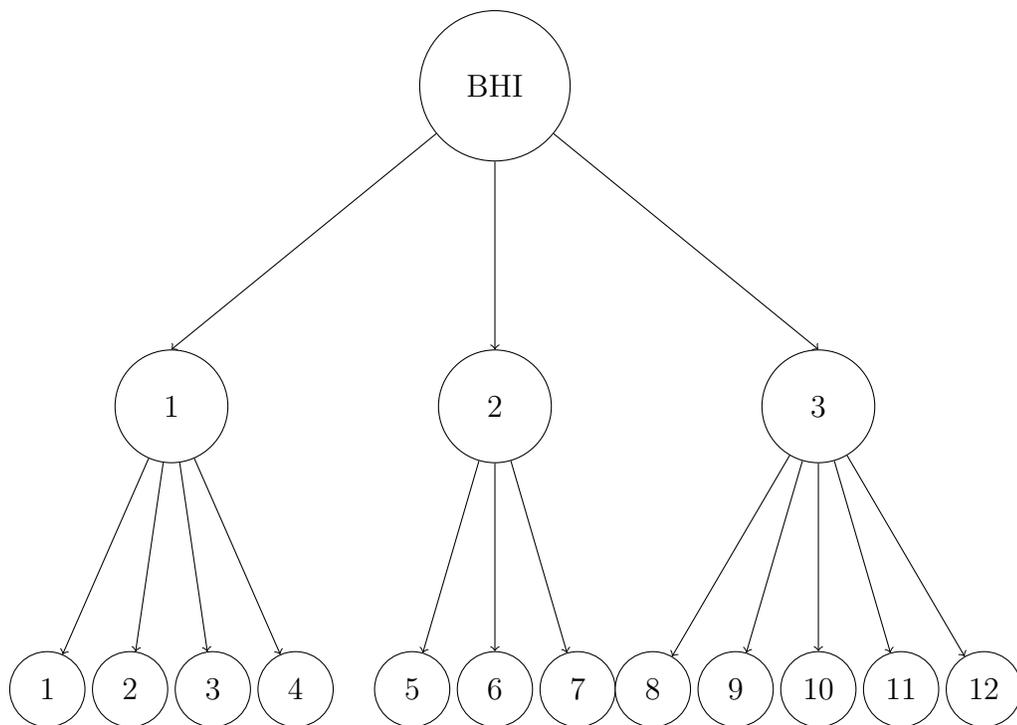


Figura 3.2: Jerarquía de BHI.

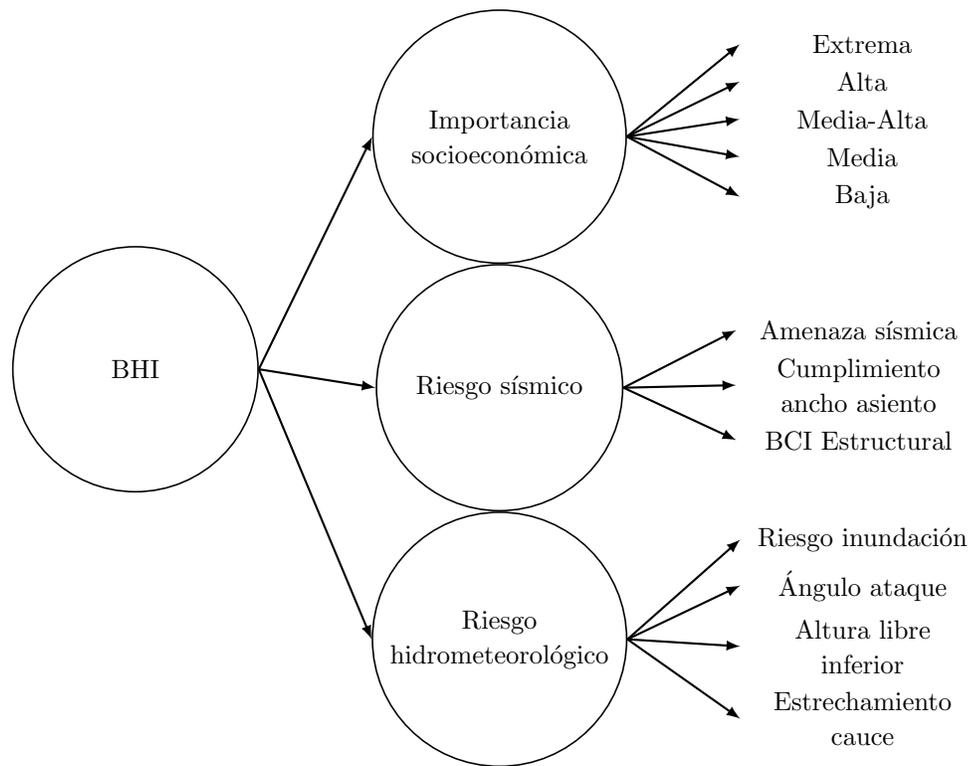


Figura 3.3: Categorías de BHI.

3.1.2. Categoría 1 - Evaluación de condición estructural (BCI)

La condición estructural del índice se calcula con base en los resultados de la inspección visual de daños realizada en cada puente, esta evaluación se realizó de acuerdo al Manual de Inspección de Puentes del MOPT (2007) y las mejoras propuestas por el grupo de investigación [49]. La evaluación de la condición estructural se refiere a la evaluación de la seguridad estructural de cada componente y elemento del puente de forma visual [38].

En la evaluación estructural para crear el índice se define una estructura jerárquica de: componentes, elementos, y daños [38]. En la figura 3.4 se muestran los 3 componentes evaluados para calcular el BCI Estructural, 1) la evaluación de la superestructura, que considera elementos correspondientes a la parte superior del puente como por ejemplo losa concreto, 2) la evaluación de la subestructura, evaluando elementos correspondientes a la parte inferior del puente como por ejemplo apoyos, bastiones y pilas, y 3) la evaluación de accesorios, donde se consideran elementos de la estructura general del puente como el pavimento y las juntas de expansión. En las siguientes subsecciones se describe más a detalle la composición del BCI.

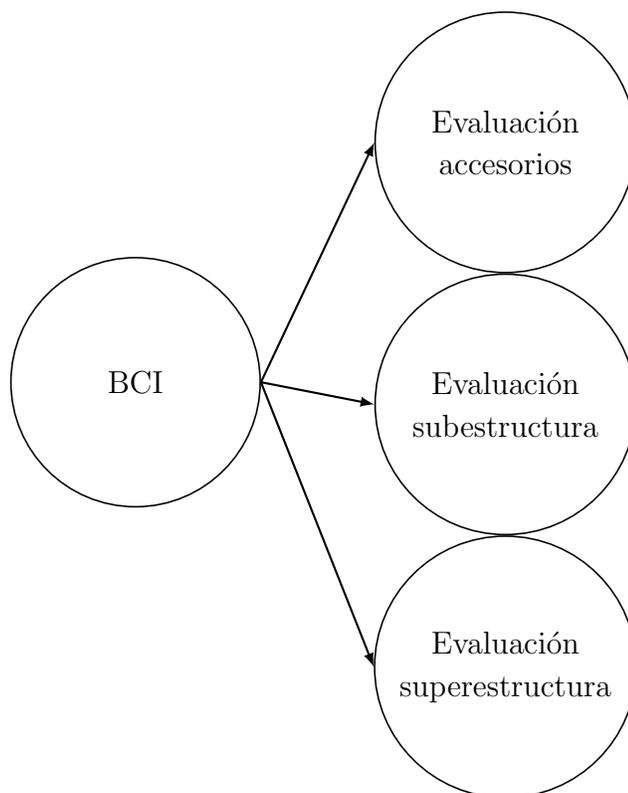


Figura 3.4: Evaluaciones de la condición estructural

3.1.2.1. Jerarquía de componentes, elementos y daños

En la figura 3.5 se presenta la jerarquía para el cálculo del BCI estructural, considerando los 3 componentes ya mencionados, 12 elementos y 72 indicadores. Posteriormente se describe la composición del árbol y sus niveles.

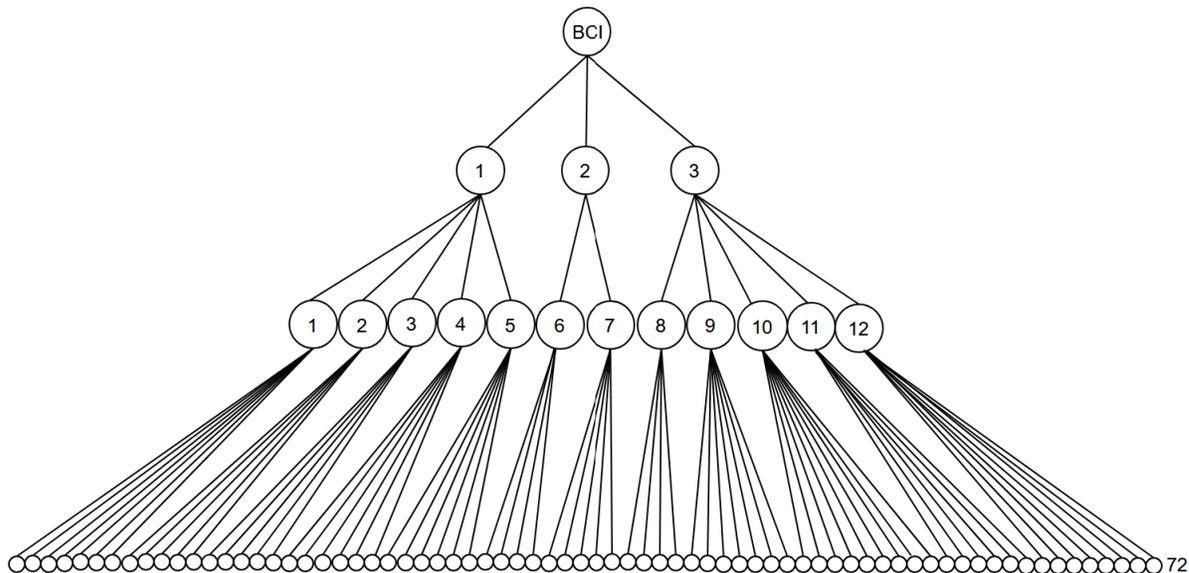


Figura 3.5: Jerarquía de componentes, elementos y daños.

3.1.2.1.1. Componentes

En el nivel 1 se presentan los componentes, los cuales representan una clasificación o agrupación conceptual de los elementos de un puente, en la investigación para conceptualizar el índice han sido considerados la superestructura (figura 3.6), la subestructura, (figura 3.7) y los accesorios (figura 3.8). Cada componente incluye a su vez la ponderación de los elementos, considerando la evaluación y peso de cada elemento [22].

La ponderación de cada elemento estructural en este proyecto varía según la tipología del puente, definiéndose cuatro categorías distintas [22]: Tipo 1 corresponde a puentes de concreto con apoyos y pilas (Caso 01); Tipo 2 a puentes de acero con apoyos y pilas (Caso 02); Tipo 3 a puentes de concreto con apoyos pero sin pilas (Caso 03); y Tipo 4 a puentes de acero con apoyos pero sin pilas (Caso 04). Es crucial señalar que estos cuatro tipos representan diferentes metodologías de ponderación para evaluar los daños en cada componente del puente o estructura, como se detalla en el cuadro 3.1 del documento.

3.1.2.1.2. Elementos

En el nivel 2, se encuentran los elementos que corresponden a partes estructurales específicas de un puente. Por ejemplo, en la figura 3.6 se puede ver que cada elemento considera cierta cantidad de variables de daño. Algunos elementos pueden estar o no presentes, o variar su ponderación, según el tipo de puente que se está analizando. También, por definición en las referencias es importante saber que, la suma de los pesos de los daños para un elemento es igual a 1 [22].

3.1.2.1.3. Daños

Existe un conjunto de valores relacionados al nivel de daño asociado al estado de un elemento particular, estos son los correspondientes al nivel más bajo del índice: Por ejemplo en la figura 3.6 se puede ver dichos daños o indicadores, cabe mencionar que los valores se definen en una escala de 1 a 5 de acuerdo con rúbricas establecidas en tablas de inspección de daños que se utilizan en las inspecciones técnicas de los puentes [22].

Para la ponderación de cada uno de los elementos se utilizó el método Delphi [50]. La capacidad de predicción de Delphi se basa en la utilización sistemática de un juicio o criterio técnico emitido por un grupo de expertos [38]. En los cuadros 3.1, 3.2 y 3.3, se muestran las ponderaciones para cada uno de los daños en los elementos por cada uno de los tipos de puente.

3.1.2.2. Componente 1 - Evaluación de superestructura

Para evaluar la superestructura se han definido cinco elementos, como se muestra en la figura 3.6 y en el cuadro 3.1. Los elementos definidos incluyen: losa de concreto, que cuenta con 7 indicadores para su evaluación; elementos principales de acero y elementos secundarios de acero, ambos con 5 daños o indicadores; y elementos principales y secundarios de concreto, cada uno con 6 daños o indicadores. Es importante mencionar que un mismo indicador puede evaluarse en diferentes elementos. Además, en la evaluación de superestructura, se utilizan los cuatro casos para el elemento losa de concreto; los casos 02 y 04 para los elementos principales y secundarios de acero; y los casos 01 y 03 para los elementos principales y secundarios de concreto.

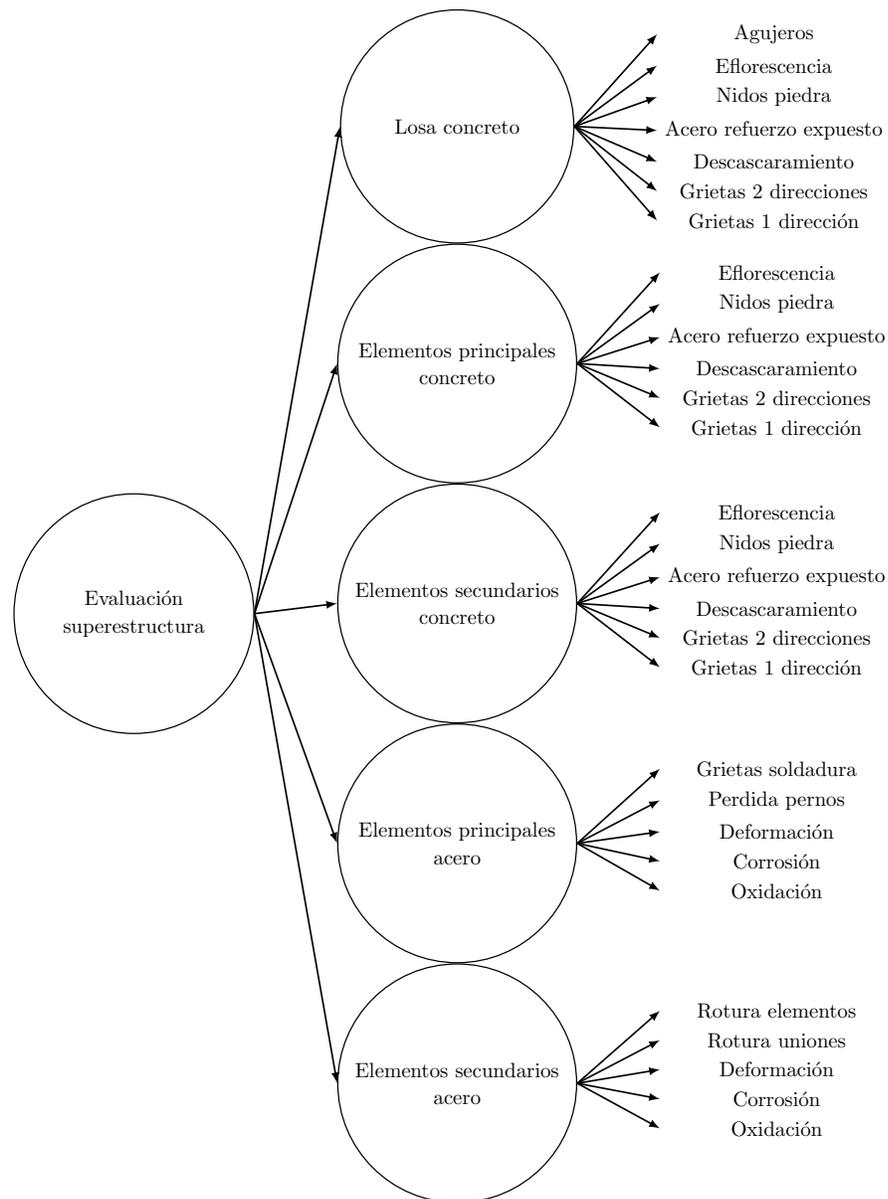


Figura 3.6: Evaluación de superestructura.

Código	Elemento	Daño	Ponderación			
			Caso 01	Caso 02	Caso 03	Caso 04
Sup-LoC	Losas concreto		0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
Sup-LoC-Gr1	Losas concreto	Grietas en una dirección	0.1667	0.1667	0.1667	0.1667
Sup-LoC-Gr2		Grietas en dos direcciones	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
Sup-LoC-Des		Descascaramiento	0.1333	0.1333	0.1333	0.1333
Sup-LoC-AcE		Acero de refuerzo expuesto	0.2333	0.2333	0.2333	0.2333
Sup-LoC-Nip		Nidos de piedra	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
Sup-LoC-Efl		Eflorescencia	0.0333	0.0333	0.0333	0.0333
Sup-LoC-Agu		Agujeros	0.1333	0.1333	0.1333	0.1333
Sup-EPs-EP-Ace		Elementos principales acero			0.5333	
Sup-EPs-EIP-Ace-Oxi	Elementos principales acero	Oxidación		0.0667		0.0667
Sup-EPs-EIP-Ace-Cor		Corrosión		0.2000		0.2000
Sup-EPs-EIP-Ace-Def		Deformación		0.1333		0.1333
Sup-EPs-EIP-Ace-Per		Pérdida de pernos		0.3333		0.3333
Sup-EPs-EIP-Ace-GrS		Grietas en soldadura		0.2667		0.2667
Sup-EPs-ES-Ace	Elementos secundarios acero			0.2667		0.2667
Sup-EPs-ES-Ace-Oxi	Elementos secundarios acero	Oxidación		0.06667		0.06667
Sup-EPs-ES-Ace-Cor		Corrosión		0.20000		0.20000
Sup-EPs-ES-Ace-Def		Deformación		0.13333		0.13333
Sup-EPs-ES-Ace-RoU		Rotura de uniones		0.33333		0.33333
Sup-EPs-ES-Ace-RoE		Rotura de elementos		0.26667		0.26667
Sup-EPs-EP-Con		Elementos principales concreto		0.5333		0.5333
Sup-EPs-EP-Con-Gr1	Elementos principales concreto	Grietas en una dirección	0.1905		0.1905	
Sup-EPs-EP-Con-Gr2		Grietas en dos direcciones	0.2381		0.2381	
Sup-EPs-EP-Con-Des		Descascaramiento	0.1429		0.1429	
Sup-EPs-EP-Con-AcE		Acero de refuerzo expuesto	0.2857		0.2857	
Sup-EPs-EP-Con-NiP		Nidos de piedra	0.0952		0.0952	
Sup-EPs-EP-Con-Efl		Eflorescencia	0.0476		0.0476	
Sup-EPs-ES-Con		Elementos secundarios concreto		0.2667		0.2667
Sup-EPs-ES-Con-Gr1	Elementos secundarios concreto	Grietas en una dirección	0.1905		0.1905	
Sup-EPs-ES-Con-Gr2		Grietas en dos direcciones	0.2381		0.2381	
Sup-EPs-ES-Con-Des		Descascaramiento	0.1429		0.1429	
Sup-EPs-ES-Con-AcE		Acero de refuerzo expuesto	0.2857		0.2857	
Sup-EPs-ES-Con-NiP		Nidos de piedra	0.0952		0.0952	
Sup-EPs-ES-Con-Efl		Eflorescencia	0.0476		0.0476	

Cuadro 3.1: Ponderaciones para superestructura [22].

3.1.2.3. Componente 2 - Evaluación de subestructura

Para evaluar la subestructura, se han definido cinco elementos, como se ilustra en la figura 3.7 y en el cuadro 3.2. Los elementos incluyen: apoyos, que cuentan con 4 daños o indicadores para su evaluación; pared cabezal aletones, con 7 daños o indicadores; bastión, también con 7 daños o indicadores; martillo pila, con 6 daños o indicadores; y pila, con 8 daños o indicadores. Es importante destacar que un mismo indicador puede ser evaluado en distintos elementos. Además, en la evaluación de subestructura, se aplican los cuatro casos para los elementos apoyos, pared cabezal y bastión, mientras que para los elementos martillo y pila solo se utilizan las ponderaciones para los casos 01 y 02.

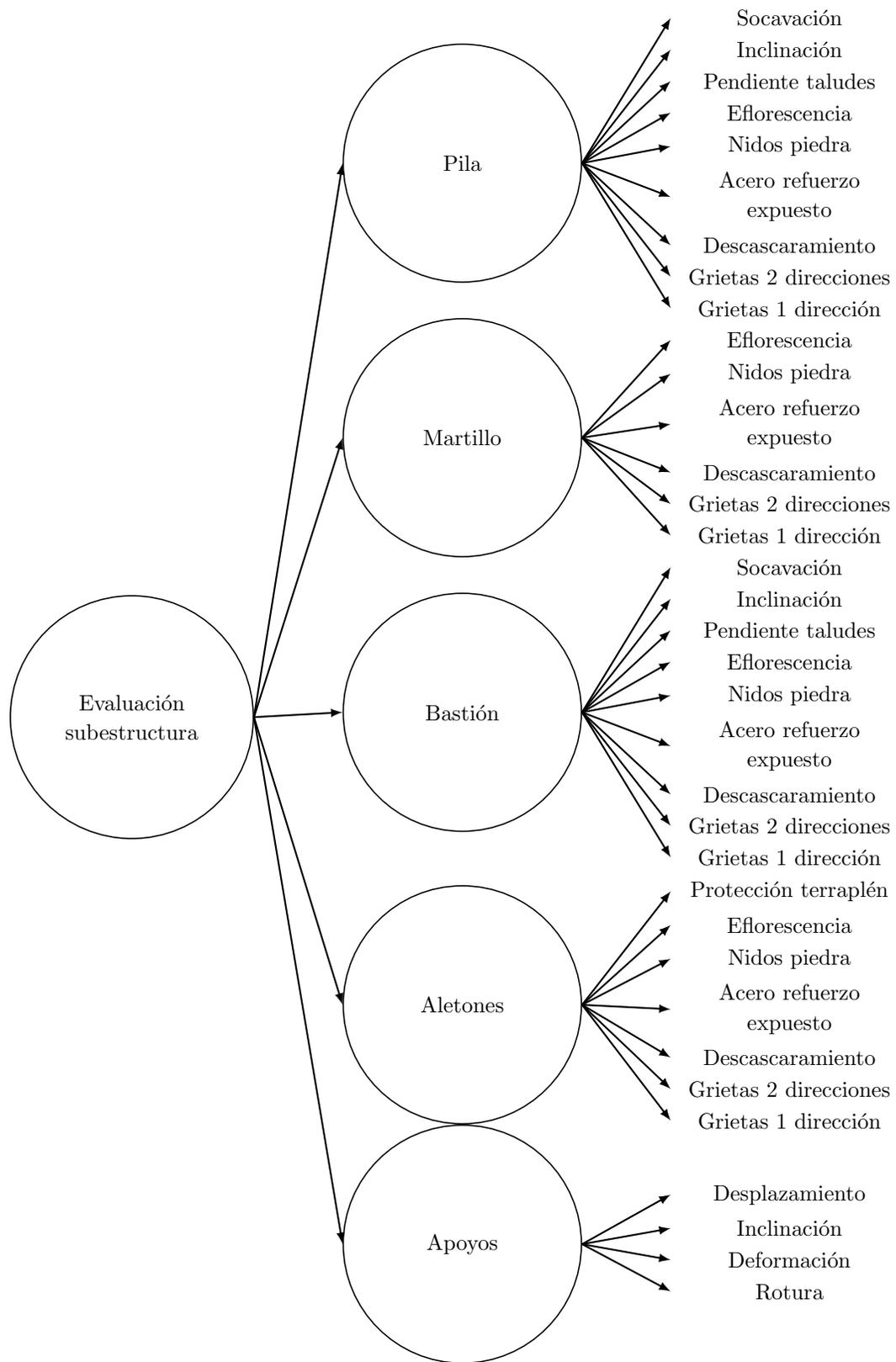


Figura 3.7: Evaluación de subestructura.

Código	Elemento	Daño	Ponderación			
			Caso 01	Caso 02	Caso 03	Caso 04
Sub-Apo	Apoyos		0.1333	0.1333	0.2500	0.2500
Sub-Apo-Rot	Apoyos	Rotura	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
Sub-Apo-Def		Deformación	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
Sub-Apo-Inc		Inclinación	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
Sub-Apo-Des		Desplazamiento	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000
Sub-Ale	Aletones		0.0667	0.0667	0.1250	0.1250
Sub-Ale-Gr1	Aletones	Grietas en una dirección	0.1429	0.1429	0.1429	0.2105
Sub-Ale-Gr2		Grietas en dos direcciones	0.1786	0.1786	0.1786	0.2632
Sub-Ale-Des		Descascaramiento	0.1071	0.1071	0.1071	0.1579
Sub-Ale-AcE		Acero de refuerzo expuesto	0.2143	0.2143	0.2143	0.3158
Sub-Ale-NiP		Nidos de piedra	0.0357	0.0357	0.7140	0.0526
Sub-Ale-Efl		Eflorescencia	0.0714	0.0714	0.0714	0.1053
Sub-Ale-Ter		Protección del terraplén	0.2500	0.2500	0.6250	0.3684
Sub-Bas	Bastión		0.3333	0.3333	0.0889	0.6250
Sub-Bas-Gr1	Bastión	Grietas en una dirección	0.0889	0.0889	0.1111	0.0889
Sub-Bas-Gr2		Grietas en dos direcciones	0.1111	0.1111	0.0667	0.1111
Sub-Bas-Des		Descascaramiento	0.0667	0.0667	0.1333	0.0667
Sub-Bas-AcE		Acero de refuerzo expuesto	0.1333	0.1333	0.0222	0.1333
Sub-Bas-NiP		Nidos de piedra	0.0222	0.0222	0.0444	0.0222
Sub-Bas-Efl		Eflorescencia	0.0444	0.0444	0.1556	0.0444
Sub-Bas-Ter		Pendiente en taludes	0.1556	0.1556	0.1778	0.1556
Sub-Bas-InT		Inclinación	0.1778	0.1778	0.2000	0.1778
Sub-Bas-Soc		Socavación	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
Sub-Mar		Martillo		0.2000	0.2000	
Sub-Mar-Gr1	Martillo	Grietas en una dirección	0.1905	0.1905		
Sub-Mar-Gr2		Grietas en dos direcciones	0.2381	0.2381		
Sub-Mar-Des		Descascaramiento	0.1429	0.1429		
Sub-Mar-AcE		Acero de refuerzo expuesto	0.2857	0.2857		
Sub-Mar-NiP		Nidos de piedra	0.0476	0.0476		
Sub-Mar-Efl		Eflorescencia	0.0952	0.0952		
Sub-Pil		Pila		0.2667	0.2667	
Sub-Pil-Gr1	Pila	Grietas en una dirección	0.1111	0.1111		
Sub-Pil-Gr2		Grietas en dos direcciones	0.1389	0.1389		
Sub-Pil-Des		Descascaramiento	0.0833	0.0833		
Sub-Pil-AcE		Acero de refuerzo expuesto	0.1667	0.1667		
Sub-Pil-NiP		Nidos de piedra	0.0278	0.0278		
Sub-Pil-Efl		Eflorescencia	0.0556	0.0556		
Sub-Pil-InT		Inclinación	0.1944	0.1944		
Sub-Pil-Soc		Socavación	0.2222	0.2222		

Cuadro 3.2: Ponderaciones para subestructura [22].

3.1.2.4. Componente 3 - Evaluación de accesorios

Para evaluar los accesorios del puente se han definido dos elementos como se puede ver en la figura 3.8 y el cuadro 3.3, donde: pavimento, que a la vez consta de 4 indicadores para su evaluación; juntas de expansión, que a la vez toman en cuenta 5 daños o indicadores. Los indicadores son ponderados basados en los 4 tipos anteriormente citados y son establecidos en las inspecciones de los puentes. En la evaluación de accesorios se toman en consideración los 4 casos.

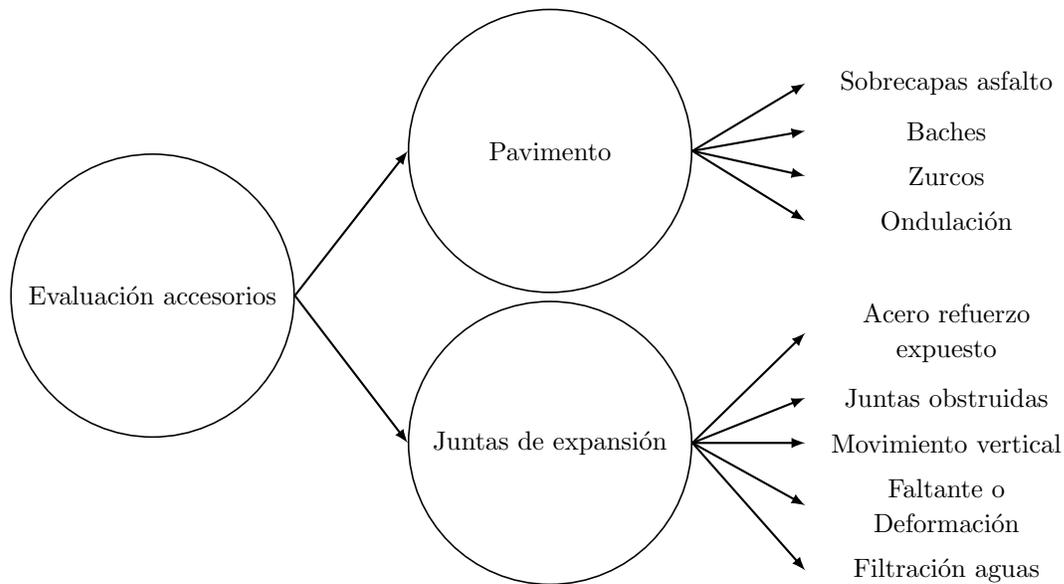


Figura 3.8: Evaluación de accesorios.

Código	Elemento	Daño	Ponderación			
			Caso 01	Caso 02	Caso 03	Caso 04
Acc-Pav	Pavimento		0.3333	0.3333	0.3333	0.3333
Acc-Pav-Ond	Pavimento	Ondulación	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
Acc-Pav-Zur		Zurcos	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
Acc-Pav-Bac		Baches	0.3000	0.3000	0.3000	0.3000
Acc-Pav-SAs		Sobrecapas de asfalto	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000
BCI-Acc-Jun	Juntas de expansión		0.6667	0.6667	0.6667	0.6667
Acc-Jun-Fil	Juntas de expansión	Filtración de aguas	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000
Acc-Jun-FaD		Faltante o deformación	0.1333	0.1333	0.1333	0.1333
Acc-Jun-MoV		Movimiento vertical	0.0667	0.0667	0.0667	0.0667
Acc-Jun-JuO		Juntas obstruidas	0.2667	0.2667	0.2667	0.2667
Acc-Jun-AcE		Acero de refuerzo expuesto	0.3333	0.3333	0.3333	0.3333

Cuadro 3.3: Ponderaciones para accesorios [22].

3.1.3. Categoría 2 - Factores de riesgo o criticidad

En los factores de riesgo, la Asociación Mundial de las Carreteras, propone una metodología para atender el tema de riesgo, la cual se basa en 3 pasos: 1) la toma de datos, 2) el análisis de riesgos simplificados, y 3) las investigaciones posteriores o análisis detallados de riesgos [38].

En esta metodología (ver cuadro 3.4 y 3.5) se establecen relaciones capacidad/demanda, similar al rating factor, para determinar la vulnerabilidad, mediante cálculos simplificados. Esto no resulta práctico para un escenario como el de las condiciones en Costa Rica, en el cual la información del puente es escasa y en el mejor de los casos, existen planos [38].

Eventos de riesgo	Vulnerabilidad				
	Baja	Media	Aceptable	Alta	Muy alta
Bajo	C1	C1	C2	C3	C3
Medio	C1	C2	C2	C3	C3
Fuerte	C2	C2	C3	C3	C4
Alto	C3	C3	C3	C4	C4
Muy alto	C3	C3	C4	C4	C4

Cuadro 3.4: Matriz de criticidad [38]

Consecuencias	Criticidad			
	Baja	Media	Alta	Muy alta
Normal	R1	R1	R2	R3
Alta	R1	R1	R2	R3
Muy alta	R1	R2	R3	R3

Cuadro 3.5: Matriz de riesgo [38]

A continuación se describen los factores de riesgo (o criticidad) contemplados para la creación del índice de salud estructural.

3.1.3.1. Riesgo hidrometeorológico

Para determinar el riesgo hidrometeorológico, se considera la amenaza de inundación, la relación del ancho del cauce, aguas arriba y aguas abajo, para finalmente obtener la criticidad hidrometeorológica [22]. En la figura 3.9 se muestran los 4 indicadores considerados para calcular el índice de riesgo.

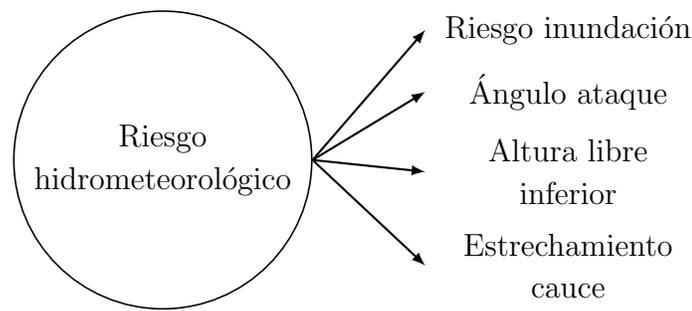


Figura 3.9: Riesgo hidrometeorológico.

En la sección de cálculos se detalla más información de cómo obtener el índice de riesgo hidrometeorológico.

3.1.3.2. Riesgo sísmico

Para determinar este riesgo se debe calcular la amenaza sísmica y el cumplimiento de la estructura con el ancho de asiento mínimo, para calcular finalmente la criticidad por sismo [22]. En la figura 3.10 se muestran los 3 indicadores considerados para calcular el nivel de riesgo sísmico, dentro de estos considerado el BCI del puente.

En el cuadro 3.6 se muestran los valores para el coeficiente sistémico espectral que se debe utilizar en el cálculo del índice sísmico. Y el cuadro 3.7 muestra la clasificación para la importancia operacional, que fue también considerada para conceptualizar el índice de riesgo sísmico.

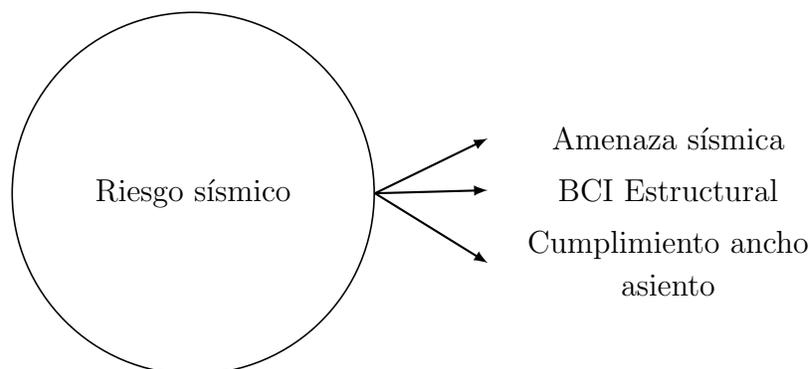


Figura 3.10: Riesgo sísmico.

Sitio de cimentación	Ca		
	Zona de amenaza sísmica		
	II	III	IV
S1	0.240	0.360	0.480
S2	0.278	0.374	0.480
S3	0.317	0.410	0.490
S4	0.360	0.367	0.432

Cuadro 3.6: Coeficientes sísmicos espectrales [22]

Clasificación	Descripción	Factor
Puentes críticos	Puentes que se requiere estén en funcionamiento después de un sismo y son fundamentales para la actividad económica a nivel nacional o regional. Puentes a lo largo de rutas estratégicas (vías de acceso hacia hospitales, puertos, fronteras y aeropuertos). Puentes a lo largo de rutas cantonales en zonas urbanas importantes que conectan con rutas estratégicas. Puentes que son requeridos para mantener los servicios públicos esenciales tales como el suministro de electricidad, agua e hidrocarburos. Puentes con un costo de construcción que excede los US \$10 millones (al 2012). Puentes a lo largo de rutas primarias sin rutas alternas similares.	1.25
Puentes esenciales	Puentes diseñados para soportar volúmenes importantes de tráfico o puentes a lo largo de rutas secundarias sin rutas alternas similares que no cumplen con requisitos para puentes críticos. Puentes a lo largo de rutas primarias, secundarias con un tránsito promedio diario (TPD) > 5000 vehículos que no clasifican como puentes críticos.	1.00
Puentes convencionales	Puentes a lo largo de rutas primarias, secundarias y terciarias y caminos cantonales que no cumplen con los requisitos para puentes críticos esenciales	1.00
Otros puentes	Puentes temporales (Vida útil menor o igual a 3 años). Puentes que brindan acceso a propiedades privadas o a lo largo de caminos dentro de dichas propiedades que no cruzan sobre vías nacionales o cantonales y cuya falla no genere perjuicios a los otros y que no son críticos para mantener las comunicaciones.	0.80

Cuadro 3.7: Clasificador y factor de importancia operacional [22]

3.1.4. Categoría 3 - Importancia socioeconómica

La decisión de intervenir una estructura, su plazo y orden de prioridad no depende sólo de su valoración técnica, sino, que es necesario también analizar la importancia de la estructura en cuanto a condiciones socioeconómicas, para ello se utiliza un indicador socioeconómico [38], en el cuadro 3.8 se tiene un ranking de 1 - 5 para categorizar la importancia de cada puente de acuerdo a sus características. En la figura 3.11 se visualiza el nivel de importancia socioeconómica junto con los 5 indicadores considerados para su categorización. El procedimiento de cálculo donde se utiliza dicha matriz se describe en la siguiente sección del documento.

Importancia	Descripción	Características
1	Baja	Otras rutas
2	Media	Ruta terciaria o TPD mayor a 5 mil vehículos
3	Media-Alta	Ruta terciaria o TPD mayor a 20 mil vehículos
4	Alta	Ruta terciaria o TPD mayor a 50 mil vehículos
5	Extrema	Ruta primaria estratégica con TPD mayor a 50 mil vehículos

Cuadro 3.8: Matriz de importancia socioeconómica [38]

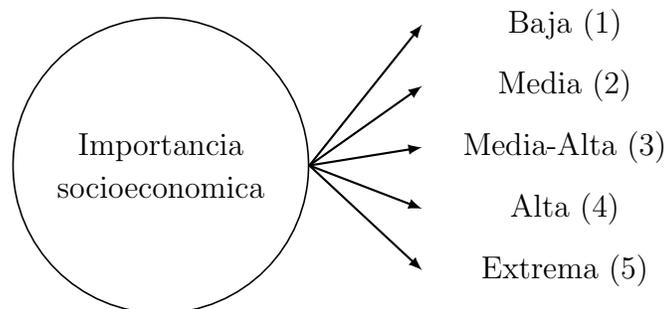


Figura 3.11: Importancia socioeconómica.

3.2. Procesos de cálculo de índices

Esta subsección se enfoca en detallar procesos previos y fórmulas que se deben realizar para el cálculo del índice de salud estructural (BHI), primero se describen los pasos para calcular el índice de condición estructural (BCI), posteriormente los índices de riesgos

hidrometeorológico (HCI) y sísmico (SCI), y finalmente el índice de salud del puente (BHI).

3.2.1. Diagrama para cálculo del BCI

En la figura 3.12 se muestra el flujo para el cálculo del índice de condición estructural (BCI), el proceso inicia con los datos de inspección (o base de datos de puentes) estos datos a la vez son procesados para calcular el BCI de accesorios, el BCI de subestructuras y el BCI de superestructuras, y con ellos calcular un BCI completo de la estructura, el mismo es el resultado del valor máximo de los BCIs.

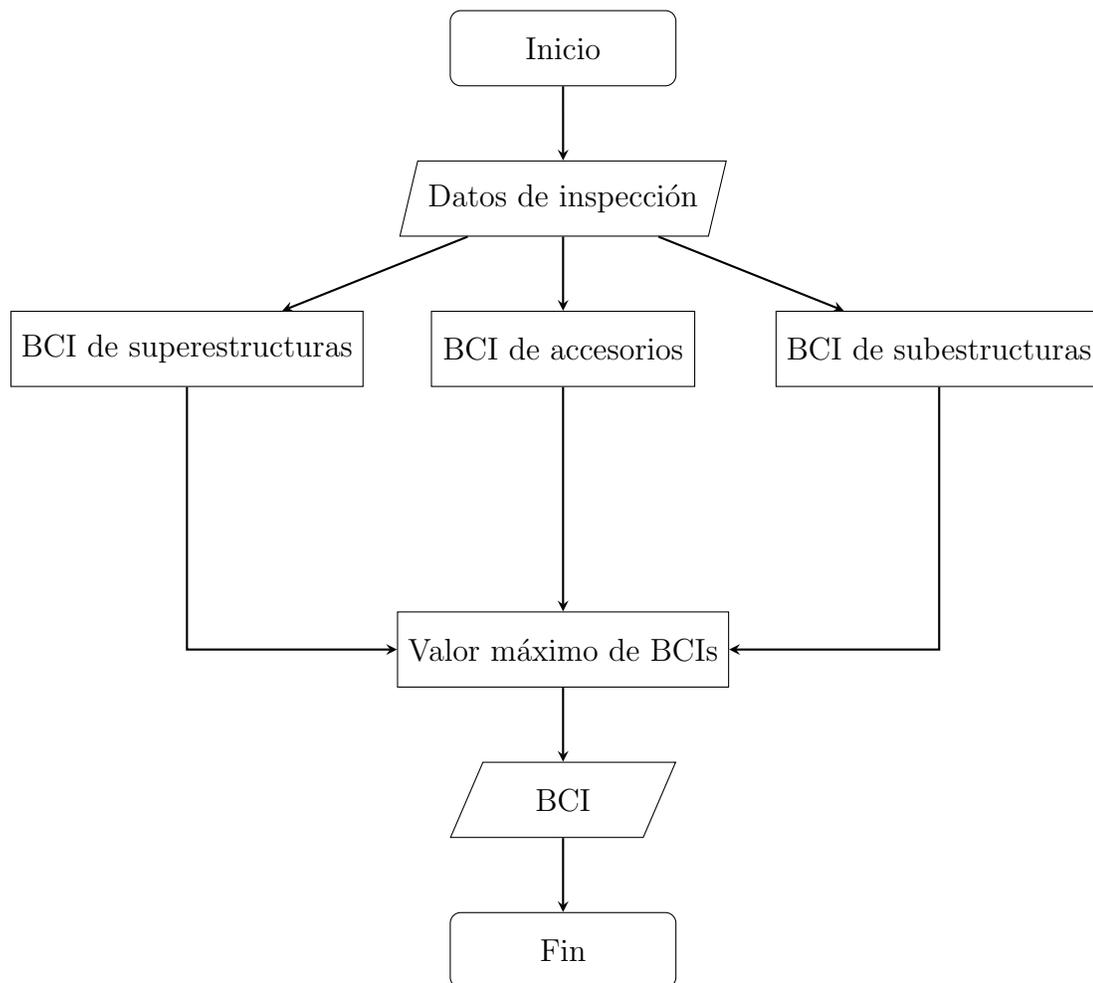


Figura 3.12: Diagrama para cálculo de BCI.

3.2.2. Diagrama para cálculo del BHI

En la figura 3.13 se muestra el flujo para el cálculo del índice de salud estructural (BHI), el proceso inicia con los datos de inspección (o base de datos de puentes), estos datos a la vez son procesados para calcular la criticidad que se deriva del índice de riesgo sísmico, y

el índice de riesgo hidrometeorológico. Además se cuenta con un indicador de importancia socioeconómica, donde el resultado final para el BHI es el promedio entre la criticidad y la importancia del puente.

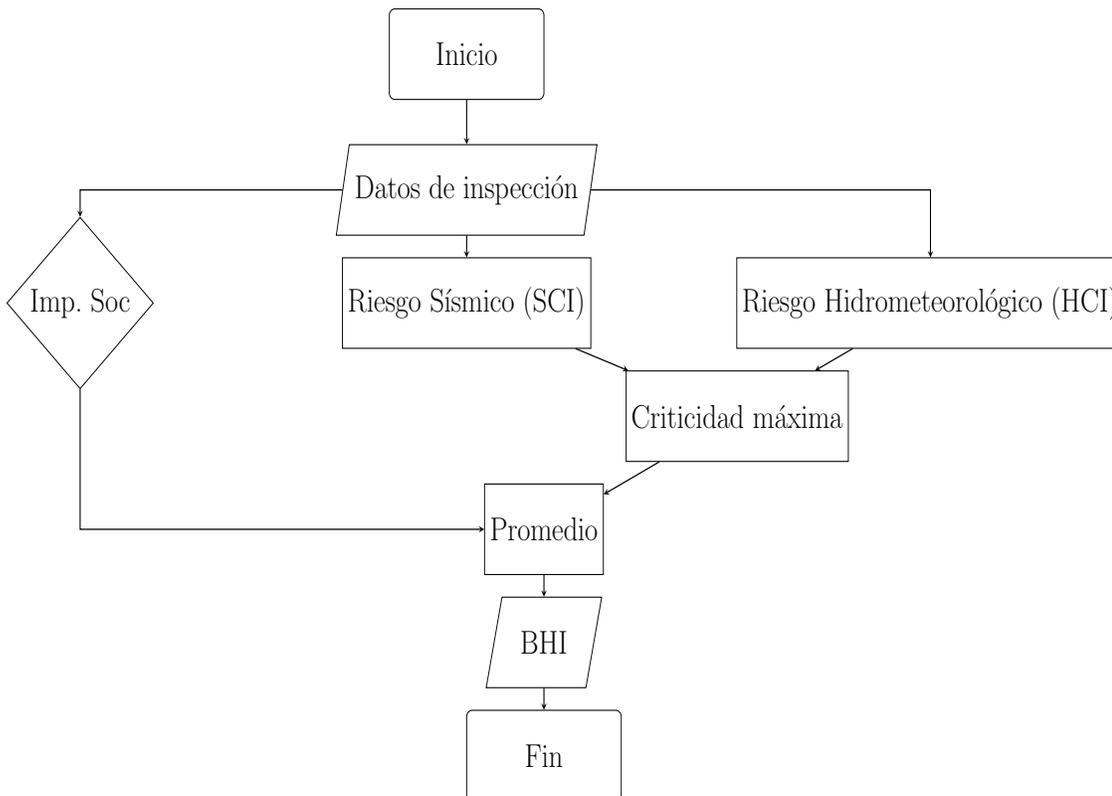


Figura 3.13: Diagrama para cálculo de BHI.

3.2.3. Índice de condición estructural (BCI)

El BCI del puente se deriva de 3 subíndices: 1) el BCI de superestructuras, 2) el BCI de subestructuras, y 1) el BCI de accesorios,. El cálculo del mismo fue previamente conceptualizado en [22], a continuación se describen los pasos necesarios para calcularlo.

3.2.3.1. Componentes

Los componentes son el producto del peso de cada elemento y sus evaluaciones. La fórmula para calcularlos sería el sumatorio del producto de la evaluación y el peso de cada elemento.

$$\text{Componente}_i = \sum_k (\text{Evaluación del elemento}_k \times \text{Peso del elemento}_k) \quad (3.1)$$

La fórmula para calcular cualquiera de los subíndices sería el sumatorio del producto del valor del componente y el peso del componente.

$$\text{BCI} = \sum_k (\text{Evaluación del componente}_k \times \text{Peso del componente}_k) \quad (3.2)$$

El índice de condición estructural (BCI) es el valor máximo de los 3 subíndices anteriormente mencionados, el mismo está concebido para mostrar valores finales en un rango de 1 a 5 como evaluación de un puente [22].

$$BCI = MAX(BCI_{\text{superestructura}}, BCI_{\text{subestructura}}, BCI_{\text{accesorios}}) \quad (3.3)$$

3.2.3.2. Daños y elementos

En las figuras 3.6, 3.7, 3.8 se muestran los indicadores (o daños) y cuadros 3.1, 3.2, 3.3 se puede ver un ejemplo de los indicadores (daños con sus pesos), elementos y componentes considerados para el cálculo del BCI.

El valor y peso de los daños se utiliza a su vez para calcular el valor de cada elemento. La fórmula para representarlo sería el sumatorio del producto del valor y el peso de cada daño.

$$\text{Elemento}_i = \sum_k (\text{Valor del daño}_k \times \text{Peso del daño}_k) \quad (3.4)$$

3.2.4. Índice de condición hidrometeorológico (HCI)

Para determinar este riesgo primero se determina el BCI hidrometeorológico el cual se obtiene del máximo entre el estrechamiento de cauce, la altura libre inferior y el ángulo de ataque. Luego se genera un promedio entre la amenaza de inundación y el BCI hidrometeorológico, quedando como resultado el índice de la condición hidrometeorológica o HCI por sus abreviaturas [51].

En primer lugar se debe definir si la zona donde se encuentra el puente es inundable o no, la fuente recomendada es la Comisión Nacional de Emergencias o la información establecida en el Plan GAM 2030. Si la zona es inundable se asigna un valor de 5, si no se asigna un valor de 1 [22].

$$\text{Estrechamiento del cauce} = \frac{\text{Ancho del cauce de aguas arriba}}{\text{Ancho del cauce de aguas abajo}} \quad (3.5)$$

Los cuadros 3.9 y 3.10 representan la escala para obtener el estrechamiento del cauce y la altura libre inferior.

Estrechamiento del cauce E	Escala 1 a 5
$1.5 < E$	5
$1.3 < E \leq 1.5$	4
$1.1 < E \leq 1.3$	3
$0.9 < E \leq 1.1$	2
$E \leq 0.9$	1

Cuadro 3.9: Escala de calificación para estrechamiento del cauce [46].

Altura libre inferior $h(m)^*$	Escala 1 a 5
$h \leq 1.5$	5
$1.5 < h \leq 3.0$	4
$3.0 < h \leq 4.5$	3
$4.5 < h \leq 6.0$	2
$6.0 < h$	1

Cuadro 3.10: Escala de calificación para altura libre inferior [46].

Posteriormente se verifica la relación aguas arriba y aguas abajo, la altura libre inferior y el ángulo de ataque del agua. Finalmente, con estos datos es posible obtener el BCI hidrometeorológico, eligiendo el mayor valor entre el riesgo hidrológico y el riesgo por inundación [22].

$$HCI = MAX(\text{Riesgo hidrológico}, \text{Riesgo de inundación}) \quad (3.6)$$

3.2.5. Índice de condición sísmica (SCI)

Para determinar este riesgo se debe calcular primero la amenaza sísmica y el cumplimiento de la estructura con el ancho de asiento mínimo, para luego poder obtener la criticidad por sismo [51].

Lo primero que se debe calcular es la aceleración pico efectiva Ca . Esta se obtiene de el cuadro 3.6 mostrada anteriormente, la cual es parte de los lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes [22].

Una vez calculado el Ca , se debe calcular la aceleración pico efectiva modificada por fallas, esta se calcula de la siguiente forma:

$$CaM = \text{Coeficiente} \times Ca \quad (3.7)$$

El valor del coeficiente es 1.2 si hay fallas cercanas y 1 si no hay fallas cercanas, la fuente de esta información es la Comisión Nacional de Emergencias.

Posteriormente, se debe calcular la amenaza sísmica con la siguiente fórmula:

$$\text{Amenaza sísmica} = \frac{CaM}{0.588} \times 4 + 1 \quad (3.8)$$

Por otra parte, se debe determinar si el ancho de asiento que tiene el puente cumple con los requerimientos mínimos, para ello se mide el ancho de asiento en sitio y se compara con la siguiente fórmula, establecida en los lineamientos para el diseño sismorresistente de puentes.

$$N = I \times (305 + 2.50L) \times (1 + 0.000125S^2) \quad (3.9)$$

Donde, N es la longitud de asiento mínima (mm), I el factor de importancia (ver cuadro 3.7), L se refiere a la longitud de la superestructura (m), y S corresponde al ángulo de sesgo del apoyo medido a partir de una línea normal al claro (en grados).

Para el cumplimiento se compara el ancho de asiento real con el mínimo requerido, se anota 1 si cumple y 5 si no cumple. Finalmente, el BCI por sismo, será el máximo valor entre el cumplimiento de ancho de asiento y la amenaza sísmica [22].

Para calcular SCI primero se determina el BCI de sismo, que se obtiene a partir del valor máximo entre cumplimiento de ancho de asiento y ¹BCI de las estructuras. Luego se genera un promedio entre la amenaza sísmica y el BCI de sismo [51], el cual es el resultado final para el índice de riesgo sísmico.

$$SCI = \text{AVG}(\text{Amenaza sísmica}, \text{MAX}(\text{Ancho asiento}, BCI)) \quad (3.10)$$

3.2.6. Índice de salud estructural de puentes (BHI)

Para el cálculo del BHI, se toman en consideración el BCI (estructural) y los BCI sísmico (SCI) e hidrometeorológico (HCI), eligiendo el valor más crítico de estos dos, a este valor se le denomina criticidad [22], que posteriormente se utiliza junto con el cuadro 3.11, para obtener el valor final del BHI.

Para la definición de la importancia socioeconómica se utiliza la matriz de el cuadro 3.8. Y posteriormente se calcula el BHI de acuerdo a la siguiente matriz de el cuadro 3.11:

Importancia	Criticidad				
	1	2	3	4	5
1	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
2	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
3	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
4	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0

Cuadro 3.11: Matriz para cálculo de BHI [22]

Finalmente, el BHI es un promedio entre la importancia socioeconómica y el valor máximo entre el SCI y HCI [51]. Seguidamente su formula:

$$BHI = \text{AVG}(\text{Importancia socioeconómica}, \text{MAX}(SCI, HCI)) \quad (3.11)$$

Luego de completado el cálculo del índice BHI, se simplifica el obtener el ranking de puentes, el cual sería la lista descendiente de puentes de acuerdo al valor del BHI [51].

¹Agregar el BCI estructural en este paso garantiza incluirlo en el cálculo final del BHI.

Capítulo 4

Diseño del modelo para cálculo del índice de salud

Este capítulo describe la propuesta para la arquitectura de inteligencia de negocios, el proceso de extracción, limpieza y carga de los datos de inspecciones, el modelo de datos tipo estrella, y el diseño del algoritmo, así como la lista de tecnologías utilizadas para el diseño y desarrollo de la herramienta.

4.1. Propuesta para arquitectura de inteligencia de negocios

Esta subsección se enfoca en describir el modelo de inteligencia de negocios propuesto para dar solución al cálculo del índice de salud de puentes. Menciona las facilidades que el modelado dimensional provee en relación a visualización para toma de decisiones y se incluyen además él porque es una propuesta innovadora en el área de investigación.

En la figura 4.1 se muestran los pasos iniciando desde el proceso de toma de los datos hasta llegar a la visualización de información al usuario. En subsecciones posteriores de este capítulo, se proporciona una descripción más detallada de estos pasos. Adicionalmente, se examinan cuatro aspectos cruciales que definen la arquitectura de la solución: 1) el modelo de inteligencia de negocios, que estructura y guía el análisis de los datos; 2) la facilidad para realizar visualizaciones, que permite una interpretación intuitiva de los resultados; 3) el aspecto innovador del sistema, que involucra las referencias de BI y SHM; y 4) el uso de cómputo en la nube, que facilita el escalado y la accesibilidad de la solución.

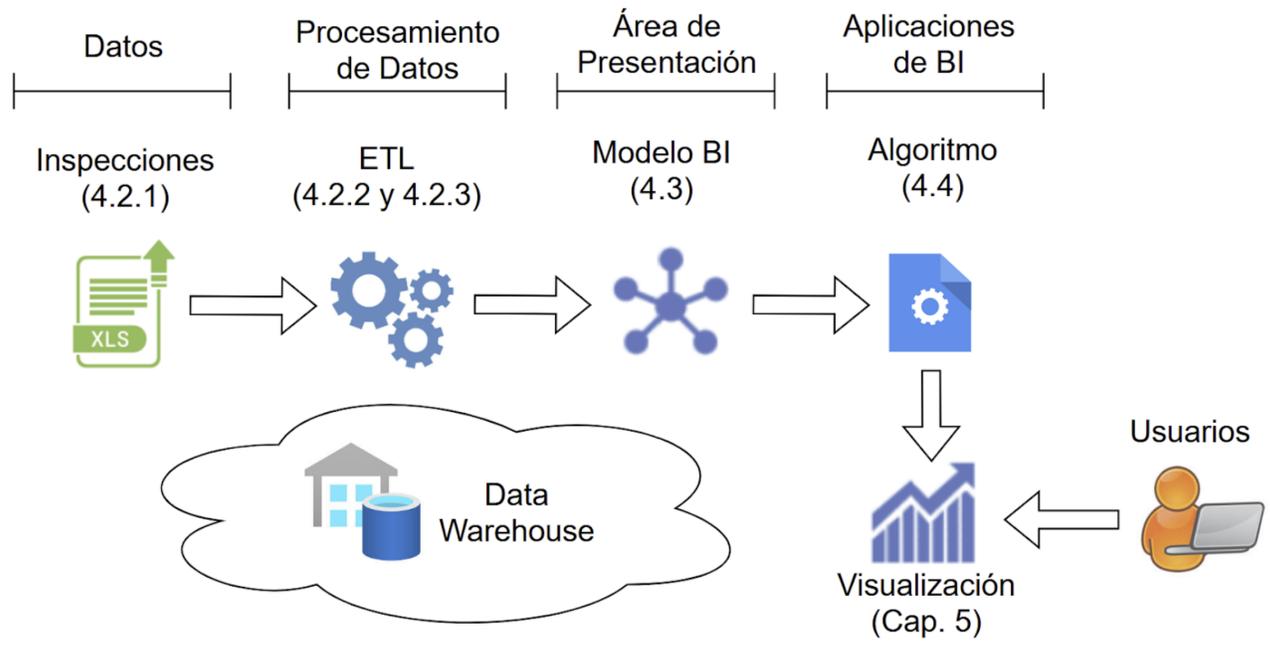


Figura 4.1: Arquitectura de inteligencia de negocios.

4.1.1. Modelo de inteligencia de negocios

La propuesta se centra en realizar un modelo de inteligencia de negocios o BI tipo estrella, ya que el mismo permite visualizar la información de manera legible, en dichos modelos se crean tablas de hechos y dimensiones para contener los resultados de cálculos que se requieren analizar, con este concepto se crean dos tablas de hechos, la primera tabla contiene los cálculos de todos los índices como lo son el índice de salud del puente o BHI, el índice de condición del puente (BCI), el índice la condición sísmica (SCI) y el índice del riesgo hidrometeorológico (HCI). La segunda tabla de hechos contiene los datos de las estructuras provenientes de las inspecciones. También se crean las dimensiones para el tiempo, la información de puentes, datos sísmicos, datos hidrometeorológicos y datos de las ponderaciones para las estructurales, ver figura 4.5 para más detalles.

4.1.2. Facilidad para visualizaciones

La elaboración de dicha propuesta permite realizar variedad de visualizaciones o gráficas que facilitan la interpretación de datos, basadas en el resultado de los índices calculados por año de inspección. Entre las visualizaciones es posible incluir un despliegue en forma de árbol de como fue concebido el BCI, lo cual permite verificar los sub cálculos que fueron realizados para el resultado del índice estructural.

Además en el capítulo 5 se homologan las visualizaciones de versiones anteriores de e-Bridge y se incluyen una serie de visualizaciones nuevas que se simplifican mediante el

uso de Power BI y la existencia del modelo dimensional propuesto.

4.1.3. Aspecto innovador

De la propuesta es innovador la aplicación de Inteligencia de Negocios (o BI por sus siglas en inglés) para dar solución a un problema que originalmente no se ha tratado con una herramienta similar, en el marco teórico se reflejan citas [8] [11] propias del TEC en esta área de investigación. Cabe mencionar que la utilización de computación en la nube para diseñar la arquitectura de BI, resolver el procesamiento complejo del ETL y hospedar el modelo dimensional son aspectos novedosos de la propuesta actual.

4.1.4. Cómputo en la nube

Como servidor de aplicaciones se utilizó Azure [52], el mismo facilita variedad de herramientas y simplifica la creación del prototipo, el modelo dimensional y la aplicación para el ETL pueden ser implementadas en esta plataforma en la nube sin la necesidad de realizar complejas instalaciones en ambientes de desarrollo, mediante un servicio de bases de datos en Azure Portal se instala el prototipo del modelo dimensional y en Azure Data Factory se diseñó el aplicativo para procesamiento de datos, este último hace uso de actividades, en especial Azure Functions que permite encapsular funcionalidades complejas como la implementación de toda una aplicación, realizar cómputo en la nube, agilizando el trabajo de data warehousing en forma nativa.

4.2. Procesamiento de datos

Esta subsección describe el procedimiento realizado para obtención de datos del archivo de inspecciones manuales, primero se describe el formato del archivo, luego se presenta la aplicación propuesta para procesar los datos, y finalmente se describe un pipeline diseñado para transformar los datos y alimentar las tablas del modelo.

4.2.1. Archivo de inspecciones

El archivo de inspecciones se procesa para obtener, transformar y cargar los datos en 4 tablas relevantes, 1) tabla de inspecciones, 2) tabla de datos riesgo hidrometeorológico, 3) tabla de datos riesgo sísmico y 4) tabla de hechos para los cálculos de índices, posteriormente la información de dicha tabla es moldeada en Power BI con la tarea de agregar los cálculos o resultados de los subíndices, BCI, HCI, SCI y BHI, cabe mencionar que la obtención y procesamiento de los datos del archivo de inspecciones (ver figura 4.2) se hace mediante un ETL, el cual se describe más adelante.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	CODIGO_INSPECCION	CODIGO_PUENTE	NOMBRE_PUENTE	INSPECTOR	TIPO_PUENTE	MATERIAL	TIPO_STRUCTURE	N_STRUCTURE	PROVINCIA	CANTON
1	PEEP-05-P019-20-2014	P019	Q. MONA	GIANNINA ORTIZ	1	CONCRETO	VIGA SIMPLE	1	PUNTA ARENAS	GARABITO
1	PEEP-05-P019-20-2014	P019	Q. MONA	GIANNINA ORTIZ	1	CONCRETO	VIGA SIMPLE	2	PUNTA ARENAS	GARABITO
1	PEEP-11-1010-23-2014	1010	Q. ESTERO MARGARITA	ALEJANDRO ALFARO	1	CONCRETO	VIGA SIMPLE	1	LIMÓN	LIMÓN
1	PEEP-11-1010-23-2014	1010	Q. ESTERO MARGARITA	ALEJANDRO ALFARO	1	CONCRETO	VIGA SIMPLE	2	LIMÓN	LIMÓN
1	PEEP-05-G143-35-2016	G143	RIO DEJUCO	ROLANDO PEREIRA	2	ACERO	VIGA SIMPLE	1	GUANACASTE	NANDARE
1	PEEP-05-G143-35-2016	G143	RIO DEJUCO	ROLANDO PEREIRA	2	ACERO	VIGA SIMPLE	2	GUANACASTE	NANDARE
1	PEEP-05-G143-35-2016	G143	RIO DEJUCO	ROLANDO PEREIRA	2	ACERO	VIGA SIMPLE	3	GUANACASTE	NANDARE
0	PEEP-04-G077-09-2017	G077	RIO LAS VUELTAS	ROLANDO PEREIRA	2	ACERO	VIGA SIMPLE	1	GUANACASTE	LA CRUZ
0	PEEP-04-G077-09-2017	G077	RIO LAS VUELTAS	ROLANDO PEREIRA	2	ACERO	VIGA SIMPLE	2	GUANACASTE	LA CRUZ
1	PEEP-08-MQU001-01-2019	MQU001	RIO PURIRES	ANGEL NAVARRO	3	CONCRETO	VIGA SIMPLE	1	CARTAGO	EL GUARCO
1	PEEP-11-1072-70-2016	1072	RIO DESENREDO	ALEJANDRO ALFARO	3	CONCRETO	VIGA SIMPLE	1	LIMÓN	POCOCI
3	PEEP-09-P111-32-2015	P111	QUEBRADA PIÑUELA	GIANNINA ORTIZ	3	CONCRETO	VIGA SIMPLE	1	PUNTA ARENAS	OSA
4	PEEP-09-P041-35-2015	P041	RIO LEPIANTO	GIANNINA ORTIZ	4	ACERO	VIGA SIMPLE	1	PUNTA ARENAS	PUNTA ARENAS
5	PEEP-09-A347-45-2017	A347	RIO CATARATTAS	ALEJANDRO ALFARO	4	ACERO	VIGA SIMPLE	1	ALAJUELA	SAN RAMÓN
6	PEEP-10-P085-28-2015	P085	RIO OLLA CINCO	ROLANDO PEREIRA	4	ACERO	VIGA SIMPLE	1	PUNTA ARENAS	OSA

Figura 4.2: Archivo de inspecciones.

4.2.2. Aplicación para procesamiento de inspecciones

Para este procesamiento se propone una ¹aplicación en Azure Data Factory que facilita el diseño y creación de un pipeline para procesar el archivo de inspecciones, limpiar y cargar los datos en las respectivas tablas. Azure brinda muchas funcionalidades en la nube, que permiten automatizar el proceso de carga, realizar modificaciones o personalización en caso de modificaciones al modelo.

La figura 4.3 muestra el proceso de limpieza y carga de datos de la aplicación, en Azure se ejecuta el pipeline para el ETL, el cual toma el archivo de inspecciones manuales y guarda los datos en 4 tablas distintas; 1) la tabla de inspecciones para BCI incluyendo información de las estructuras, 2) la tabla de datos de riesgo sísmico, 3) la tabla de datos de riesgo hidrometeorológico y 4) la tabla de datos para cálculos de los índices.

¹Para la creación del ambiente ver repositorio del apéndice A.

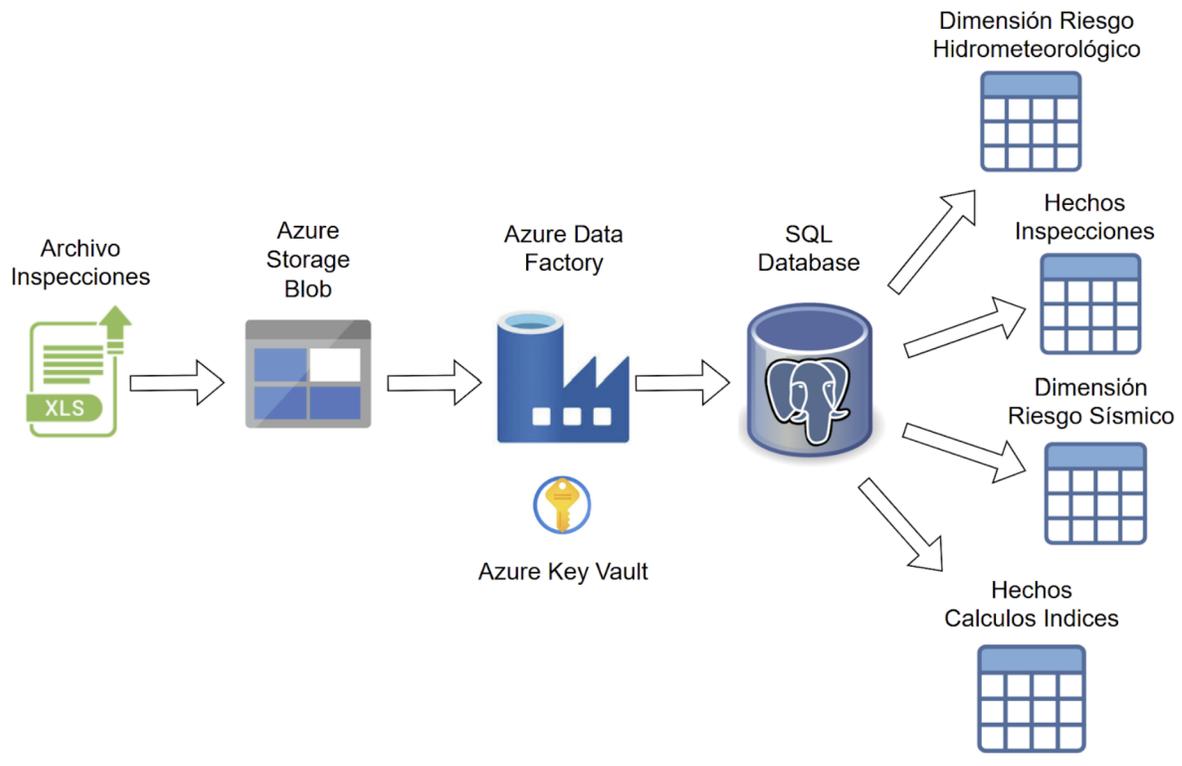


Figura 4.3: Aplicación para procesamiento de inspecciones.

4.2.3. Proceso de extracción, limpieza y carga

En la figura 4.4 se muestra el diseño del pipeline para ejecutar el proceso de ETL, se define de la siguiente forma: 1) la actividad llamada extraer inspecciones, que se encarga de cargar el archivo temporalmente en el almacén de Azure, 2) la actividad llamada transformar y limpiar inspecciones, para ejecutar el script de procesamiento de datos (ver apéndice A) que se encarga de limpiar, transformar y cargar los datos de las inspecciones en 4 tablas diferentes, la tabla de hechos de inspecciones, la tabla de riesgos sísmico, la tabla de riesgo hidrometeorológico y la tabla de hechos para cálculos de índices, 3) la actividad para notificar la ejecución exitosa del archivo, y 4) la actividad para registro de errores.

Cabe mencionar que el paso de transformar y limpiar inspecciones es un proceso complejo y requiere uso de recursos de cómputo, para esta solución Azure Data Factory tiene disponible actividades que permiten la ejecuciones de código ya sea en forma de batch/script o encapsulación de una aplicación compleja, de estas la que más se ajusta a lo necesitado es la actividad llamada Azure Functions, la misma facilita la creación de una aplicación en un lenguaje de elección y se encarga de ejecutar el cómputo complejo y regresar estados, en este diseño solamente consideramos un estado de error (código de respuesta 500) y uno de procesado con éxito (código de respuesta 200), la propuesta solamente presenta el diseño y un pseudocódigo para lograr el prototipo.

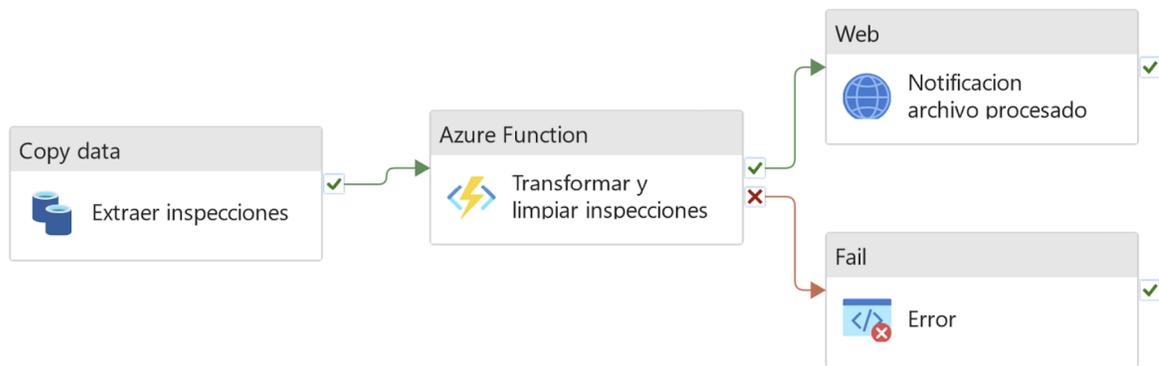


Figura 4.4: Diseño para ETL de inspecciones.

4.3. Modelado de datos

Esta subsección se enfoca en definir el modelo dimensional propuesto para almacenar los cálculos y sub cálculos que permiten concebir el índice de salud estructural (BHI). Primero se presenta el diagrama general del modelo, posteriormente se describen por separado las entidades y dimensiones que permiten realizar los sub cálculos para el índice de condiciones estructural (BCI), el índice de riesgo sísmico (SCI) y el índice de riesgo hidrometeorológico (HCI). Cabe resaltar que los 3 índices ya han sido previamente descritos en capítulos anteriores y que es necesario el cálculo previo para poder realizar el cálculo del índice de salud estructural del puente (BHI).

4.3.1. Diagrama del modelo dimensional

En la figura 4.5 se muestra el ²modelo dimensional propuesto para dar solución al índice de salud estructural de puentes (BHI). En este diseño se definen dos tablas de hechos, una llamada *hechosinspecciones* que contienen todos los datos de las inspecciones de puentes y la segunda tabla de hechos es *hechoscalculosindices*, donde es almacenado tanto el BHI, como los subíndices que lo originaron. Este modelo consta también de cinco dimensiones: 1) la dimensión para almacenar la información de los puentes, 2) la dimensión para contener los cálculos que originan el subíndice sísmico, 3) la dimensión para almacenar los resultados de los cálculos que permiten realizar el subíndice hidrometeorológico, 4) una dimensión para el tiempo, y 5) una dimensión para almacenar el peso de cada indicador.

²Para la creación del modelo en un ambiente de base de datos utilizar el script del apéndice B.

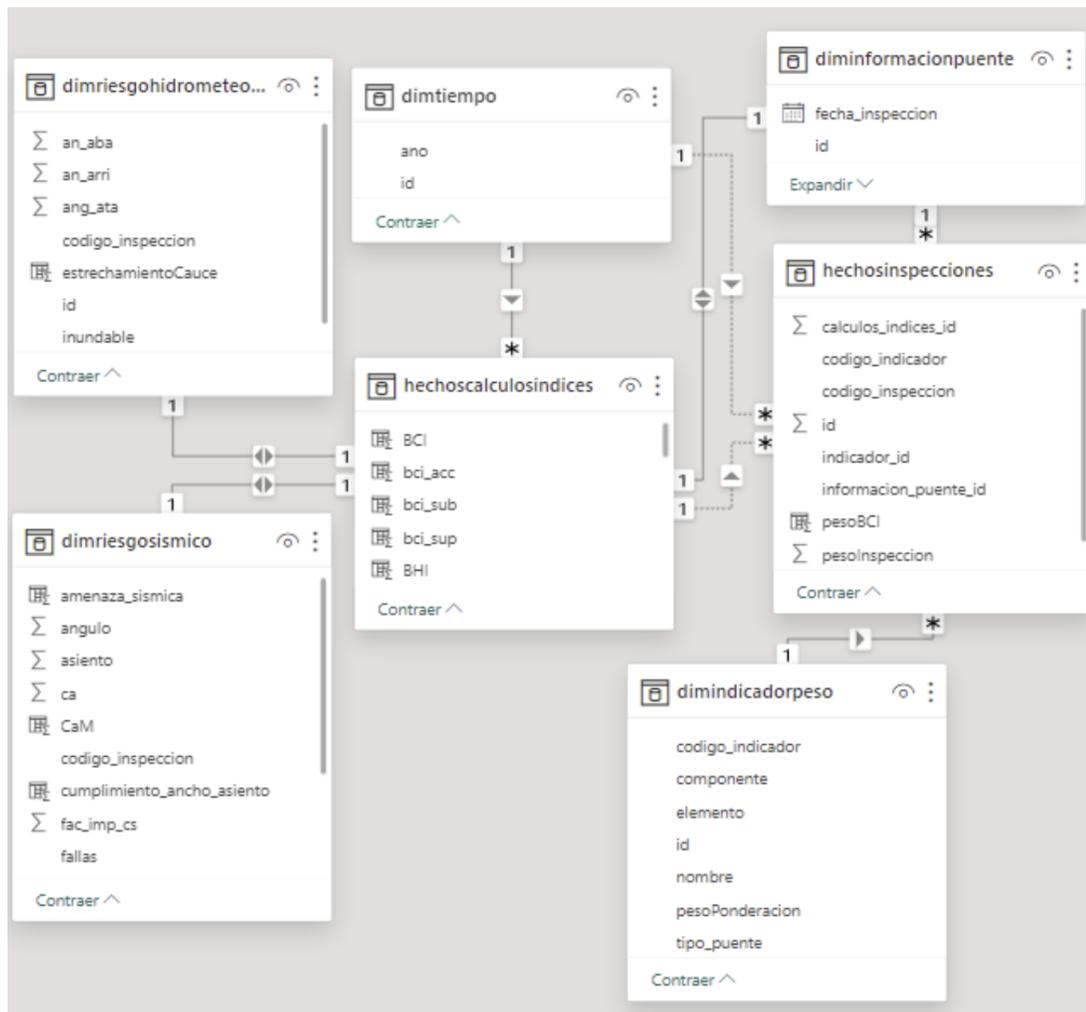


Figura 4.5: Modelo dimensional del índice de salud.

4.3.2. Modelo para el índice de salud estructural (BHI)

Para completar el modelo del cálculo del índice de salud se incluyen tres subíndices; 1) el índice riesgo sísmico 2) el índice de riesgo hidrometeorológico y 3) el índice de la condición estructural. Para estos se aplican reglas de modelo de inteligencia de negocios, donde se definen tablas en modelado de dimensiones para los riesgos sísmicos e hidrometeorológicos y una tabla de hechos de inspecciones para los datos de las estructuras. En las siguientes subsecciones se detallan dichas dimensiones.

4.3.2.1. Modelo para el índice de condición estructural (BCI)

Tomando como base el modelo de la referencia [22], para la propuesta actual se genera un nuevo diseño de modelo de datos, con modificaciones importantes en la forma de cómo manejar las variables o indicadores, donde estos ahora son utilizados como entradas o filas de una tabla de hechos. Se creó una columna para peso, una para el nombre del

indicador y otra columna para identificar el tipo de componente. Estas modificaciones se considerarán como mejoras porque permite dos ventajas con respecto al modelo anterior: 1) se facilita mediante el motor de bases de datos la ejecución de código sql para realizar consultas o bien para realizar cálculos; 2) mediante Power BI dicha modificación permite desplegar en forma de árbol y visualizar de donde se originó el índice.

En la figura 4.6 se muestra el diagrama que permite realizar el cálculo del BCI estructural, la tabla de *hechosinspecciones* contiene los datos recolectados sobre el estado de las estructuras, la tabla nombrada *hechosCalculosIndices* es una tabla de hechos que contiene columnas calculadas y métricas de los subíndices de accesorios, superestructura, subestructura.

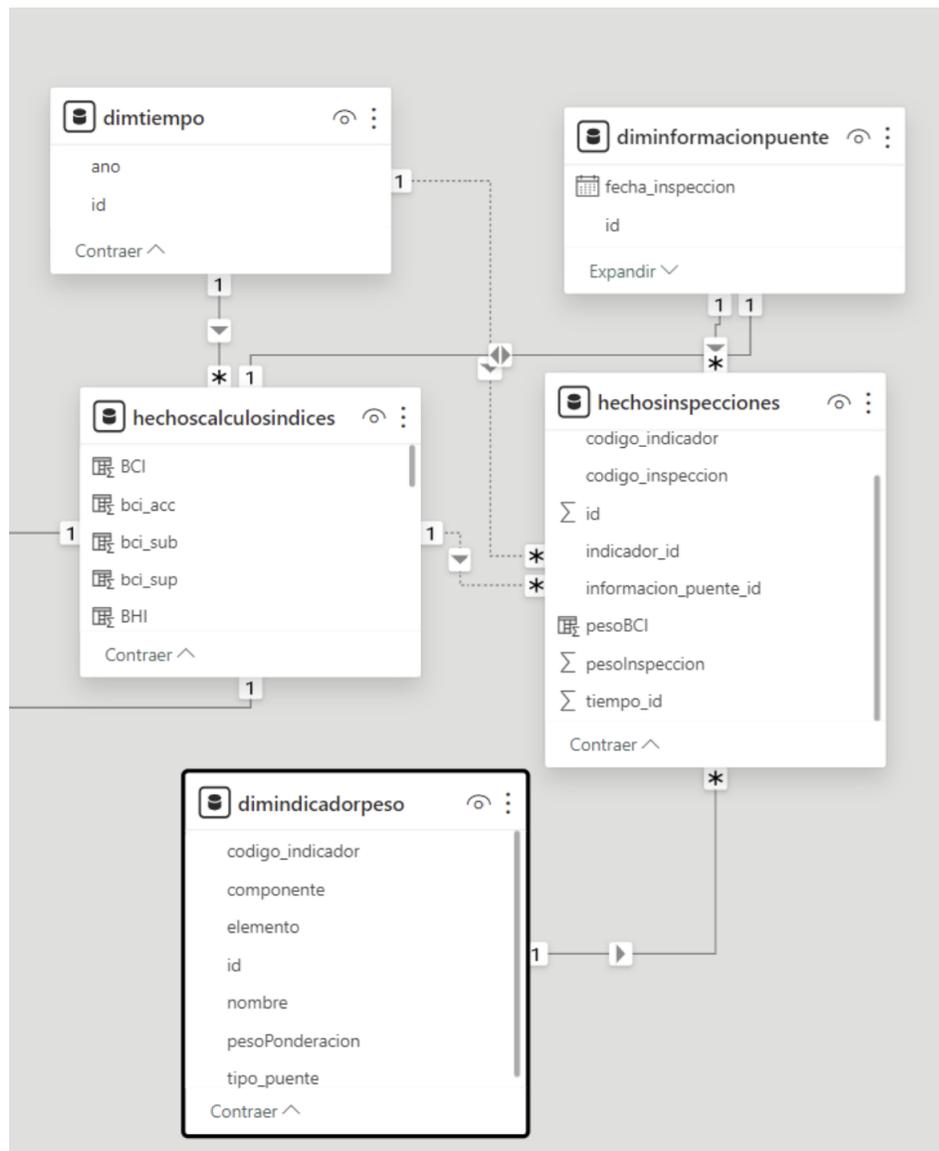


Figura 4.6: Modelo del índice de condición estructural.

4.3.2.2. Modelo para el índice sísmico (SCI)

En la figura 4.7 se muestra la propuesta del modelo para dar solución al índice de riesgo sísmico. El diagrama muestra la tabla de hechos, que se relaciona uno a uno con una tabla de dimensiones, la cual contiene datos del riesgo sísmico que son provenientes de las inspecciones manuales y las métricas necesarias para calcular el índice SCI. Más adelante en la sección de modificaciones importantes se detallan los atributos considerados en la versión del modelo propuesto.

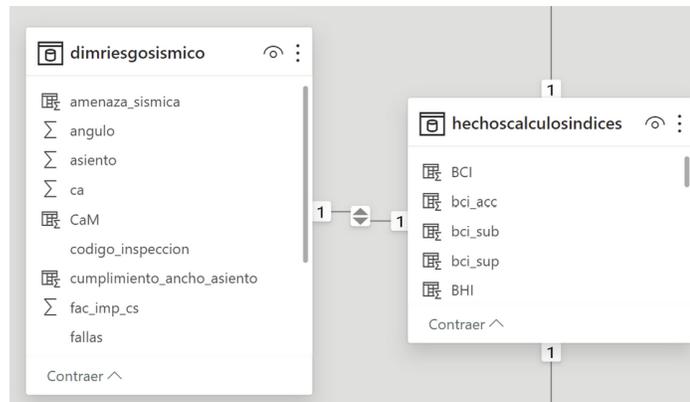


Figura 4.7: Modelo del índice sísmico.

4.3.2.3. Modelo para el índice hidrometeorológico (HCI)

En la figura 4.8 se muestra la propuesta del modelo para dar solución al índice de riesgo hidrometeorológico. El diagrama muestra la tabla de hechos, que se relaciona uno a uno con una tabla de dimensiones, la misma contiene los datos del riesgo hidrometeorológico, provenientes de las inspecciones manuales y las métricas necesarias para calcular el índice HCI. En la siguiente sección se detallan los atributos considerados en la versión del modelo propuesto.

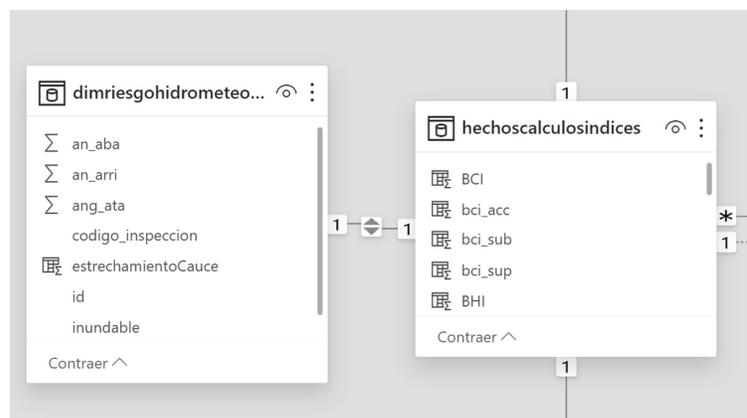


Figura 4.8: Modelo del índice hidrometeorológico.

4.3.3. Modificaciones importantes respecto a propuestas de referencia

Dentro de las modificaciones o mejoras consideradas en base a reglas del modelado de data warehousing y la arquitectura de Kimball [53], a diferencia de la referencia [22] en este nuevo modelo se describen las siguientes modificaciones:

4.3.3.1. Columnas calculadas y medidas

Es importante destacar que el nuevo diseño del modelo dimensional implicó la reestructuración de funciones y cálculos en la herramienta de BI de versiones anteriores de e-Bridge, empleando ahora DAX en Power BI. Además, surgió la necesidad de crear nuevas columnas y medidas para calcular los índices; para más detalles, consultar la sección 5.1.

4.3.3.2. Dimensión de pesos

Se crea una tabla para la dimensión de los pesos ponderados de los daños o indicadores utilizados para el cálculo del índice de condición estructural. Esta tabla funciona como una especie de catálogo y sirve de apoyo al realizar computo mediante la creación de las medidas y columnas calculadas con el lenguaje DAX.

El cuadro 4.1 muestra la descripción de los atributos correspondientes a la dimensión de pesos ponderados.

Atributo	Descripción
Id	Número consecutivo usado como llave primaria
codigo_indicador	Código alfanumérico del indicador o daño
componente	Nombre del componente de la estructura
elemento	Nombre del elemento
nombre	Nombre del indicador, dato utilizado para mostrarlo en el árbol
peso_ponderacion	Valor numérico para el peso de la ponderación
tipo_puente	Identificador para el tipo de puente

Cuadro 4.1: Atributos de la dimensión de pesos

4.3.3.3. Dimensión de tiempo

Por reglas de datawarehousing [53] es recomendable crear una dimensión de tiempo, la misma por definición en la versión propuesta solo utiliza una columna para el año, pero el modelo permite la facilidad de modificarlo si fuera necesario.

El cuadro 4.2 muestra la descripción de los atributos más importantes correspondientes a la dimensión de tiempo.

Atributo	Descripción
Id	Número consecutivo usado como llave primaria
ano	Valor numérico para representar el año

Cuadro 4.2: Atributos de la dimensión de tiempo.

4.3.3.4. Hechos de inspecciones

En las investigaciones previas se propone diseñar un modelo de inteligencia de negocios entre los 3 factores estructurales, sin embargo en esta investigación se propone realizar un modelo tipo estrella para los cálculos del BCI con 2 tablas de hechos, una para las inspecciones y otra para los cálculos de los índices. La razón de la modificación es para facilitar con el uso de herramientas de BI y el lenguaje sql de las bases de datos, la verificación del origen de los cálculos, además esta nueva implementación facilita dicha verificación por medio de visualizaciones en forma de un árbol. Para esta nueva propuesta se hace uso de reglas de datawarehousing the Kimball [53].

El cuadro 4.3 muestra la descripción de los atributos más importantes definidos para los hechos de inspecciones.

Atributo	Descripción
Id	Número consecutivo usado como llave primaria
codigo_indicador	Código alfanumérico del indicador o daño
codigo_inspeccion	Código alfanumérico del la inspección
peso	Numero entero con el peso del indicador, asignado en la inspección
informacion_puente_id	Id de referencia a la tabla de información de puentes
tiempo_id	Id de referencia a la tabla de tiempo
indicador_id	Id de referencia a la tabla de ponderaciones de indicadores
calculos_indices_id	Id de referencia a la tabla de cálculos de índices
peso_BCI	Columna calculada para usar de dato auxiliar en los cálculos

Cuadro 4.3: Atributos de hechos de inspecciones.

4.3.3.5. Hechos para cálculos de índices

La segunda tabla de hechos, llamada *hechosCalculosIndices* se crea en el modelo para referenciar las inspecciones con sus respectivas dimensiones, donde los cálculos de los índices no se realizan desde el motor de bases de datos sino más bien se resuelven mediante medidas y columnas calculadas con el lenguaje DAX de Power BI.

El cuadro 4.4 muestra la descripción de los atributos más importantes correspondientes a los hechos de cálculos de índices.

Atributo	Descripción
Id	Número consecutivo usado como llave primaria
tiempo_id	Id de referencia para la tabla de tiempo
informacion_puente_id	Id de referencia a la tabla de información de puentes
riesgo_sismico_id	Id de referencia para la tabla de riesgo sísmico
riesgo_hidrometeorologico_id	Id de referencia para la tabla de riesgo hidrometeorológico
ranking	Columna calculada para hacer el raking de puentes
SCI	Columna calculada para obtener el SCI
HCI	Columna calculada para obtener el HCI
BCI	Columna calculada para obtener el BCI
BHI	Columna calculada para obtener el BHI
estado_SCI	Columna calculada para obtener el estado el puente según el SCI
estado_HCI	Columna calculada para obtener el estado el puente según el HCI
estado_BCI	Columna calculada para obtener el estado el puente según el BCI
estado_BHI	Columna calculada para obtener el estado el puente según el BHI
recomendacion_intervencion	Columna calculada para obtener la recomendación de intervención

Cuadro 4.4: Atributos de hechos de cálculos para los índices.

4.3.3.6. Dimensión para datos de riesgo hidrometeorológico

Se propone el diseño del modelo dimensional para los datos relacionados al riesgo hidrometeorológico en una tabla separada ya que la obtención de estos valores no tienen

un patrón en común con respecto al índice estructural, para estos se calculan diferentes fórmulas descritas en el siguiente capítulo.

El cuadro 4.5 muestra la descripción de los atributos más importantes correspondientes a la dimensión de riesgo hidrometeorológico. Cabe resaltar que, se define el estrechamiento del cauce como una columna calculada mediante el uso de DAX, para luego solamente utilizar el valor en los cálculos del índice en la tabla respectiva.

Atributo	Descripción
Id	Número consecutivo usado como llave primaria
codigo_inspeccion	Código alfanumérico del la inspección
an_aba	Ancho de aguas arriba
an_arri	Ancho de aguas abajo
an_ata	Ángulo de Ataque
li_inf	Altura libre inferior
inundable	Zona inundable
estrechamiento_cauce	Columna calculada para usar como dato auxiliar en las formulas

Cuadro 4.5: Atributos de la dimensión de riesgo hidrometeorológico.

4.3.3.7. Dimensión para datos de riesgo sísmico

Se propone el diseño del modelo dimensional para los datos relacionados al riesgo sísmico en una tabla separada ya que la obtención de estos valores no tienen un patrón en común con respecto al índice estructural.

El cuadro 4.6 muestra la descripción de los atributos más importantes correspondientes a la dimensión de riesgo sísmico. Cabe resaltar que, se definen algunos atributos que son columnas calculadas mediante el uso de DAX, por ejemplo la amenaza sísmica, esto se recomienda para predefinir valores a utilizar en los cálculos del índice en la tabla respectiva.

Atributo	Descripción
Id	Número consecutivo usado como llave primaria
codigo_inspeccion	Código alfanumérico del la inspección
angulo	Ancho de aguas arriba
asiento	Ancho de asiento
ca	Aceleración pico efectiva
CaM	Columna calculada para obtener la aceleración pico efectiva modificada
suelo	Suelo predominante a sismo
fac_imp_cs	Factor de importancia operacional del puente
fallas	Fallas sísmicas cercanas
long_sup	Longitud de la superestructura
zon_sis	Zona de amenaza sísmica
amenaza_sismica	Columna calculada para obtener la amenaza sísmica
cumplimiento_ancho_asiento	Columna calculada para obtener el cumplimiento de ancho del asiento
longitud_asiento_minima	Columna calculada para obtener la longitud de asiento mínima

Cuadro 4.6: Atributos de la dimensión de riesgo sísmico.

4.3.3.8. Dimensión de información del puente

Se crea una dimensión para tener los detalles de la información de los puentes, la misma se une con la tabla de costos ya que la recomendación en modelos tipo estrella es desnormalizar el modelo relacional para obtener un mejor desempeño en las herramientas de visualizaciones.

El cuadro 4.7 muestra la descripción de los atributos más importantes correspondientes a la dimensión de información de los puentes. Cabe mencionar que, se definen algunos atributos que son columnas calculadas mediante el uso de DAX, por ejemplo el costo intervención, esto se recomienda para predefinir valores a utilizar en los cálculos del índice en la tabla respectiva.

Atributo	Descripción
Id	Número consecutivo usado como llave primaria
codigo_puente	Código del puente
nombre_puente	Nombre del puente
inspector	Nombre del inspector
tipo_puente	Tipo de puente definido para cálculo de BHI
material	Material principal de la superestructura
tipo_estructura	Tipología estructural de la superestructura
n_superestructura	Número de superestructura a la que corresponde la inspección
provincia	Provincia donde se ubica el puente
canton	Cantón donde se ubica el puente
distrito	Distrito donde se ubica el puente
fecha_inspeccion	Fecha en que se realizó la inspección
tipo_ruta	Tipo de ruta (primaria, secundaria, terciaria o cantonal)
numero_ruta	Número de ruta asignado
tpd	Valor del tránsito promedio diario
longitud_puente	Longitud total de puente
numero_carriles	Cantidad de carriles
codigo_inspeccion	Código de la inspección
longitud	Longitud de la ubicación del puente
latitud	Latitud de la ubicación del puente
fotografia	Dirección URL de la fotografía lateral del puente
ancho_puente	Ancho del puente
tipo_costo	Tipología del puente para estimar el costo
informe_puente	Dirección URL de la carpeta con la información puente
area	Valor numérico para el área del puente
categoria_longitud	Rango para la categoría según la longitud
categoria_tpd	Rango para categoría según el tpd
importancia_socioeconomica	Valor numérico para la importancia socioeconómica
costo_cuadrado	Valor numérico para el costo por metro cuadrado
descripcion	Descripción del puente
costo_intervencion	Columna calculada para obtener el costo de intervención
costo_sustitucion	Columna calculada para obtener el costo de sustitución
%_costo_interv_sustitucion	Columna calculada para obtener el porcentaje del costo de intervención y el costo de sustitución

Cuadro 4.7: Atributos de la dimensión para información de los puentes.

4.4. Diseño del algoritmo

Esta subsección describe el diseño de los algoritmos para calcular los índices: salud estructural (BHI), condición estructural (BCI), condición sísmica (SCI) y condición hidrometeorológica (HCI). Mediante la utilización de diagramas se detallan a continuación la solución para los cálculos más importantes en relación a los índices mencionados.

4.4.1. Cálculo del índice de salud estructural (BHI)

La figura 3.13 definida en la sección de análisis, ilustra en forma general como es calculado el índice. En esta subsección se considera los índices BCI, SCI y HCI como valores previamente calculados en el proceso, funcionan como entradas del algoritmo. Donde, la figura 4.9 muestra una versión simplificada de los pasos para calcular el BHI, el cual es el promedio entre la importancia socioeconómica y el valor máximo entre el SCI y HCI (la criticidad). Y la importancia socioeconómica es determinada a partir de el cuadro 3.8.

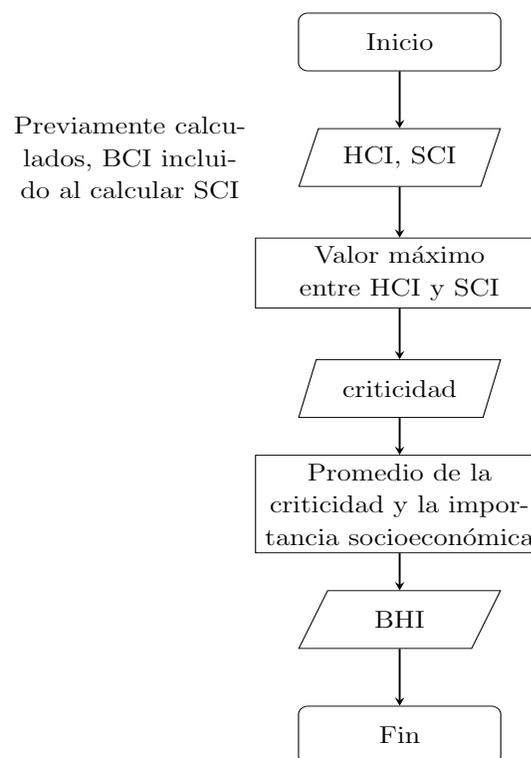


Figura 4.9: Diseño del algoritmo para cálculo de BHI.

Las siguientes subsecciones describen en detalle el diseño de los algoritmos y los pasos para obtener cada subíndice por separado.

4.4.1.1. Cálculo del índice de condición estructural (BCI)

Para obtener el índice de la condición estructural es necesario primero calcular los subíndices de accesorios, subestructura y superestructura. En la figura 4.10 se muestran los pasos para calcular el valor del índice BCI, el mismo se obtiene mediante el sumatorio del subíndice de accesorios multiplicado por 0.05, el subíndice de subestructura multiplicado por 0.50 y el subíndice de superestructura multiplicado por 0.50, donde 0.05, 0.50 y 0,45 son los valores constantes de la ponderación para cada componente de la estructura.

Cabe mencionar que el prototipo de la propuesta muestra una ³diferencia con respecto a la solución mostrada en el capítulo de análisis en la figura 3.12, donde, al obtener el BCI se hace una suma de los subíndices mencionados y no la elección del máximo de ellos.

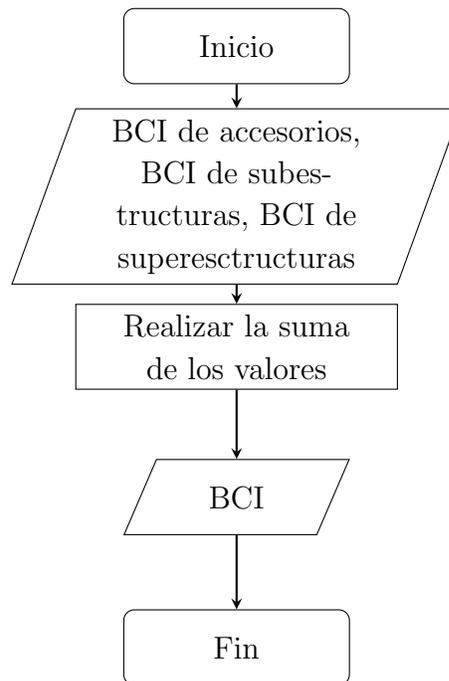


Figura 4.10: Diseño del algoritmo para cálculo de BCI.

En las siguientes subsecciones se detallan los pasos para calcular los subíndices de accesorios, superestructuras y subestructuras.

4.4.1.1.1. Cálculo de accesorios

Para realizar el cálculo de los accesorios se toman en consideración los elementos: 1) juntas de expansión y 2) pavimento con sus ponderaciones 0.6667 y 0.3333 respectivamente. En la figura 4.11 se muestran los pasos para conseguir el resultado del subíndice de accesorios. Cabe mencionar que *pesoBCI* es un método auxiliar para calcular el sumatorio de los

³Esto es debido a una actualización en los cálculos disponible en [46].

pesos de daños multiplicados por sus respectivas ponderaciones. Al finalizar, la salida del algoritmo se debe multiplicar por la ponderación de accesorios que es la constante 0.05.

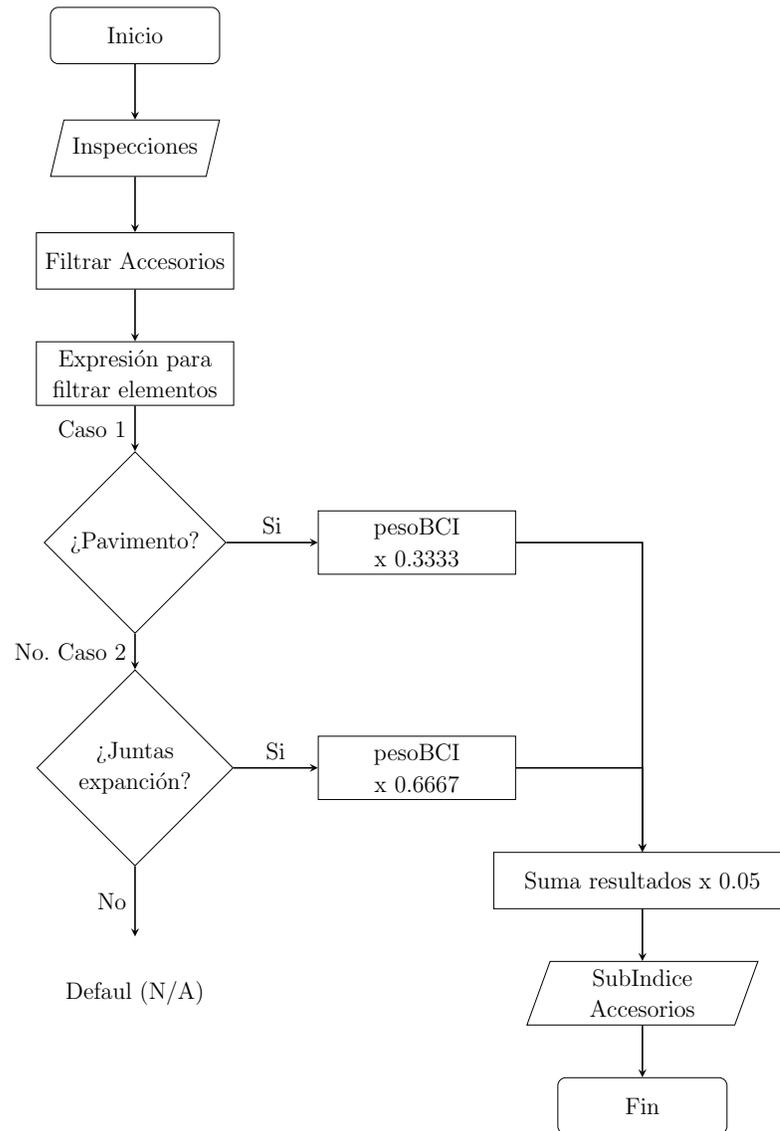


Figura 4.11: Diseño del algoritmo para cálculo de accesorios.

4.4.1.1.2. Cálculo de superestructuras

Para realizar el cálculo de las superestructuras se toman en consideración los elementos: 1) losa de concreto, 2) principales de acero, 3) secundarios de acero, 4) principales de concreto, 5) secundarios de concreto con sus ponderaciones 0.2, 0.5333 (o cero para los casos donde el tipo de puente es 1 o 3), 0.2667 (o cero para los casos donde el tipo de puente sea 1 o 3), 0.5333 (0 donde el tipo de puente es diferente a 1 o 3), 0.2667 (0 donde el tipo de puente es diferente a 1 o 3) respectivamente. Cabe mencionar que *pesoBCI* es un método auxiliar para calcular el sumatorio de los pesos de daños multiplicados por sus respectivas ponderaciones. Al finalizar, la salida del algoritmo se debe multiplicar por la

ponderación de superestructuras que es la constante 0.45. En la figura 4.12 se muestran en detalle los pasos del diseño para el algoritmo.

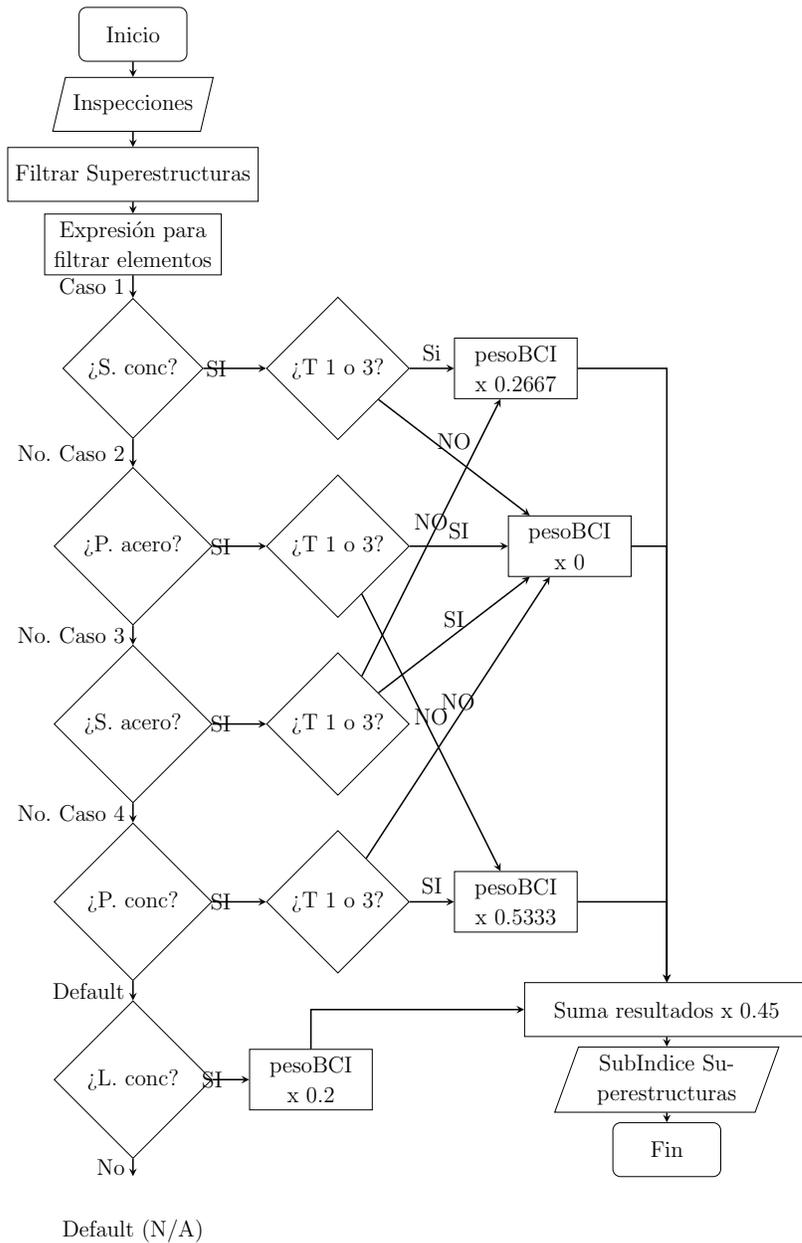


Figura 4.12: Diseño del algoritmo para cálculo de superestructuras.

4.4.1.1.3. Cálculo de subestructuras

Para realizar el cálculo de las subestructuras se toman en consideración los elementos: 1) apoyos, 2) aletones, 3) bastión, 4) martillo, y 5) pila con sus ponderaciones 0.1333 o 0.25 (para puentes mayores al tipo 2), 0.667 o 0.125 (para puentes mayores al tipo 2), 0.333 o 0.625 (para puentes mayores al tipo 2), 0.2 (0 donde el tipo de puente es mayor a 2), 0.2667

(0 donde el tipo de puente es mayor a 2) respectivamente. Se debe considerar que *pesoBCI* es un método auxiliar para calcular el sumatorio de los pesos de daños multiplicados por sus respectivas ponderaciones. Al finalizar, la salida del algoritmo se debe multiplicar por la ponderación de subestructuras que es la constante 0.5. En la figura 4.13 se muestran los pasos que dan solución al algoritmo.

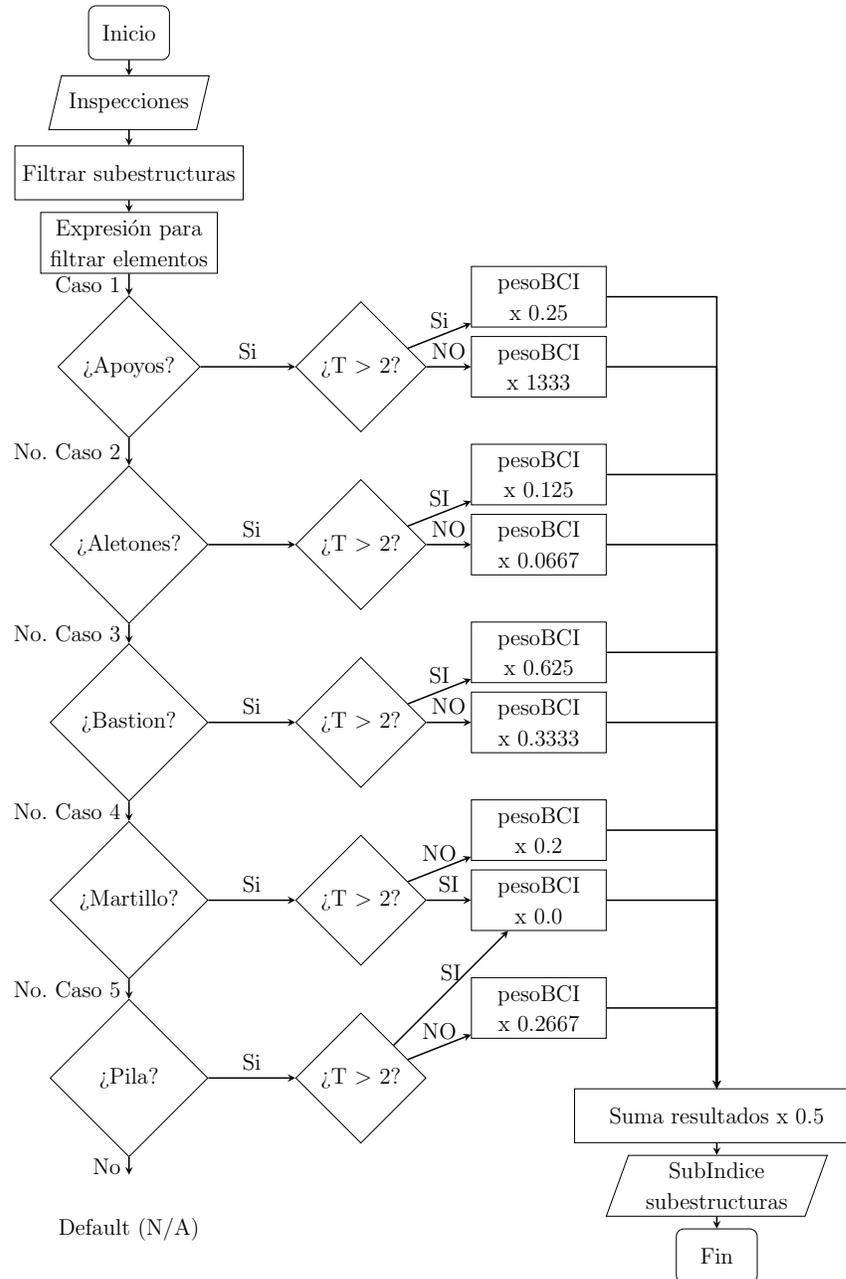


Figura 4.13: Diseño del algoritmo para cálculo de subestructuras.

4.4.1.2. Cálculo del índice sísmico (SCI)

El SCI se obtiene del promedio entre la amenaza sísmica y el BCI sísmico, estos a su vez dependen de cálculos de fórmulas definidas en el capítulo de análisis en la sección 2.3.5

y de valores que provienen de las inspecciones manuales. En la figura 4.14 se muestra en detalle el diseño del algoritmo que permite obtener el valor del índice sísmico (SCI).

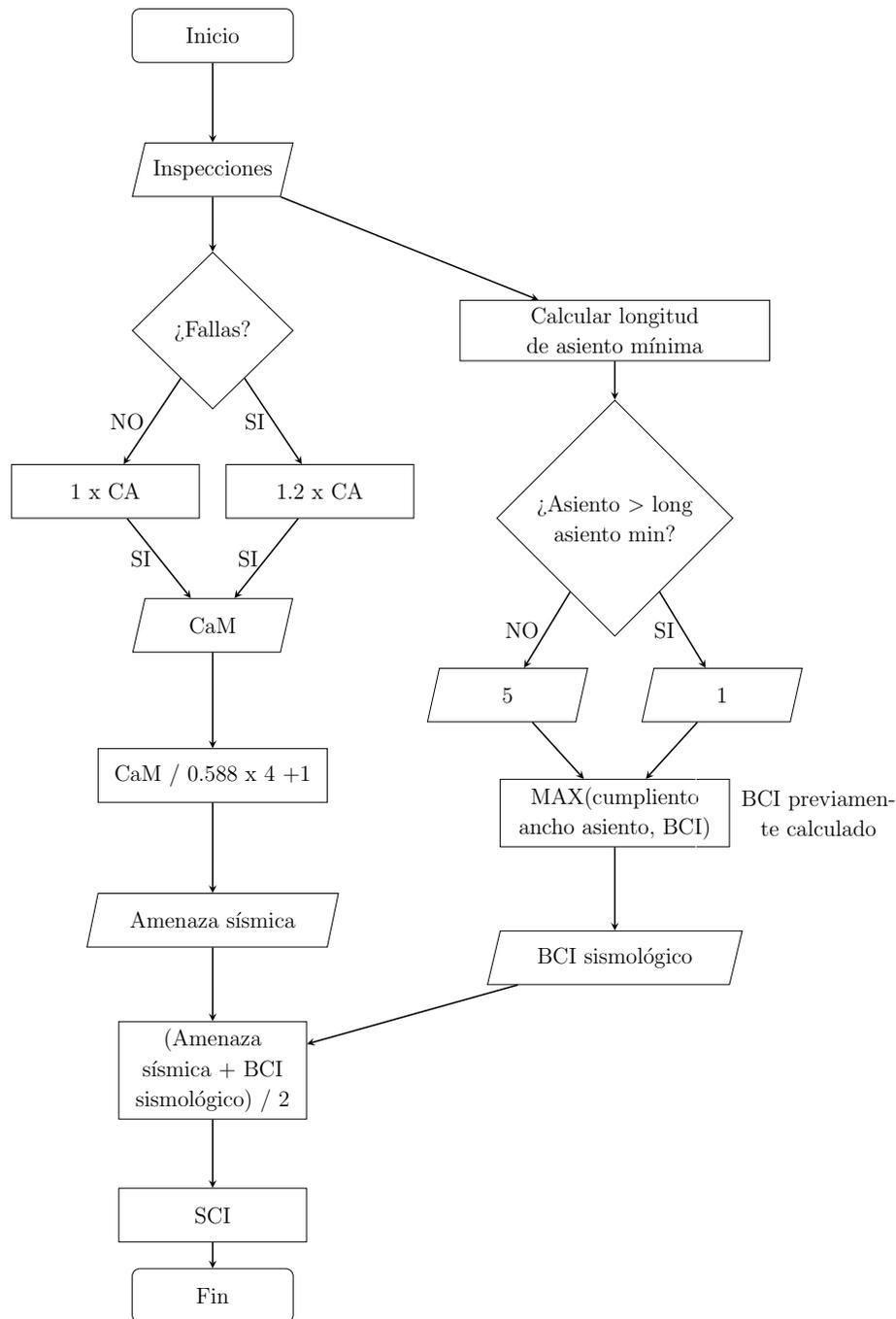


Figura 4.14: Diseño del algoritmo para cálculo del índice sísmico.

4.4.1.3. Cálculo del índice hidrometeorológico (HCI)

El índice hidrometeorológico (HCI) se obtiene del promedio entre la ponderación del valor del indicador inundable y el BCI hidrometeorológico, el cual se obtiene del máximo entre los valores ponderados previamente calculados del ángulo de ataque, la altura libre inferior

y el estrechamiento del cauce (los pasos de la solución respectivamente descritos en las figuras 4.16, 4.17 y 4.18). La figura 4.15 describe los pasos a seguir para calcular el índice mencionado.

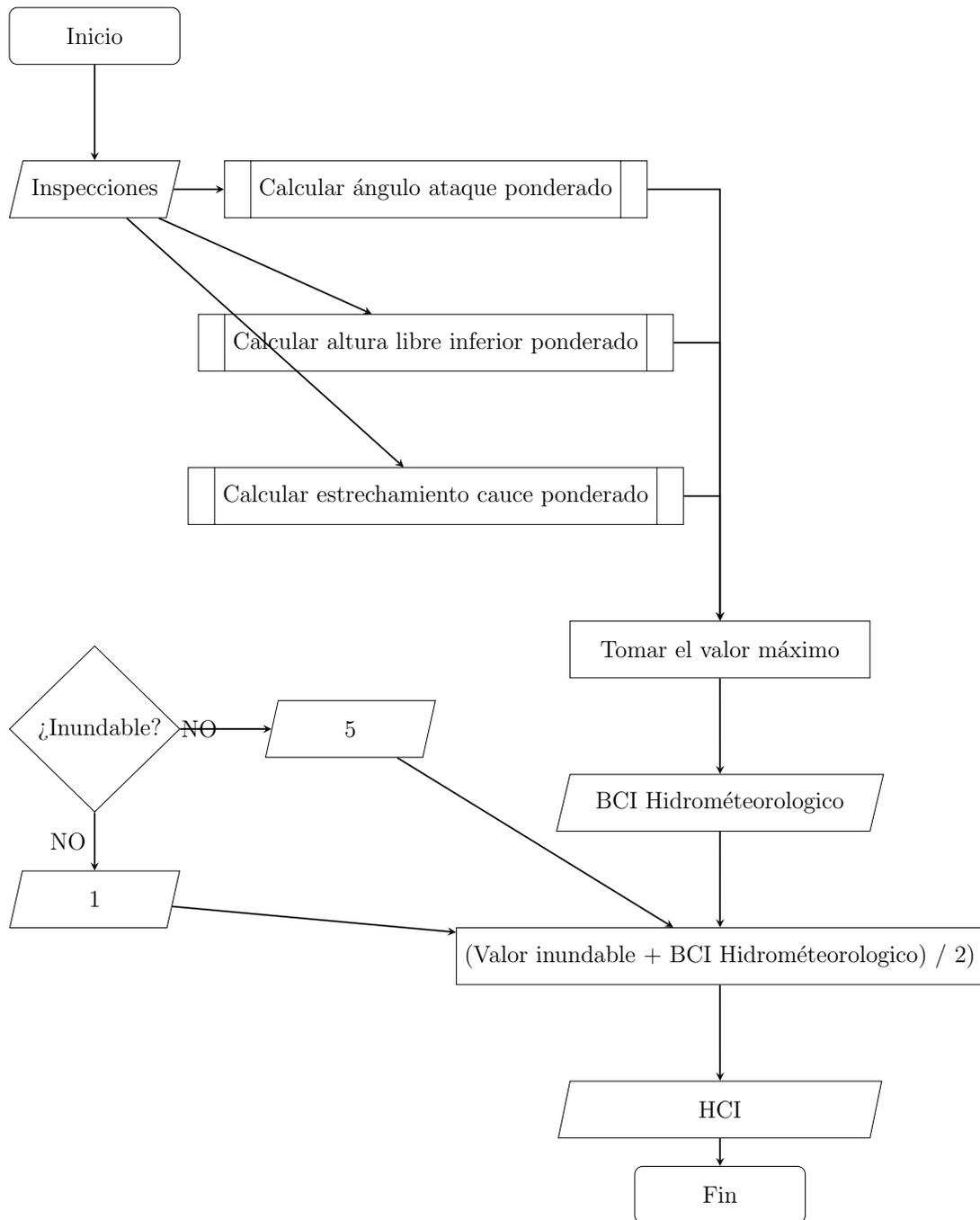


Figura 4.15: Diseño del algoritmo para cálculo del índice hidrometeorológico.

En las siguientes subsecciones se detallan los pasos para calcular los valores de las ponderaciones del ángulo de ataque, la altura libre inferior y el estrechamiento del cauce.

4.4.1.3.1. Cálculo del valor ponderado de ángulo de ataque

Para obtener la ponderación del ángulo de ataque se evalúa el iniciador de ángulo de ataque proveniente de las inspecciones manuales, y luego con una serie de condicionales se debe evaluar y asignar la ponderación correspondiente. Por ejemplo, si el valor de la inspección tiene un ángulo de ataque mayor a 75, se asigna un valor constante de 5; sino, se procede a evaluar la siguiente condición. Los detalles de este proceso y los pasos del algoritmo para obtener el valor mencionado se ilustran en la figura 4.16.

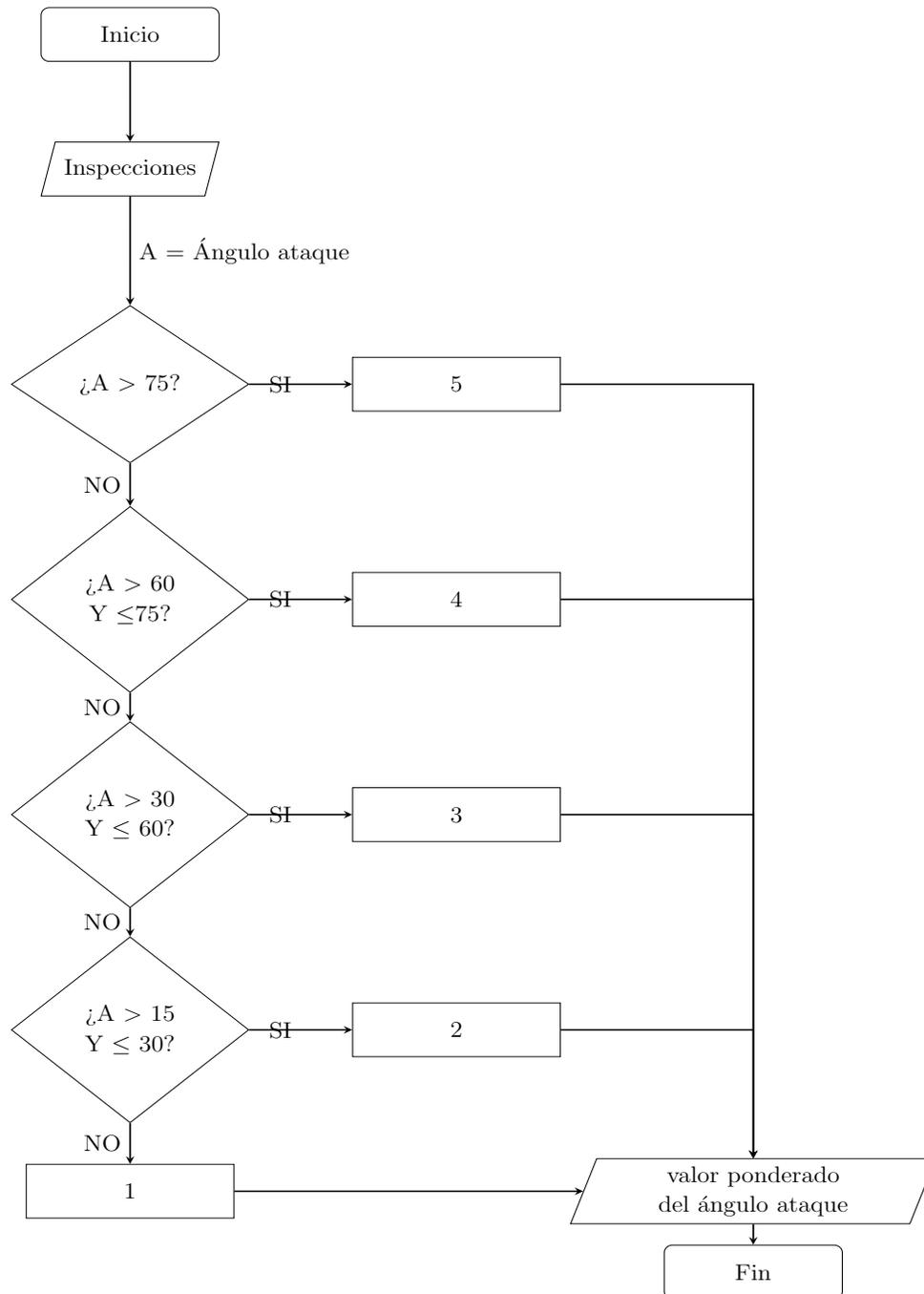


Figura 4.16: Diseño del algoritmo para ponderación del ángulo de ataque

4.4.1.3.2. Cálculo del valor ponderado de altura libre inferior

Para obtener la ponderación de la altura libre inferior se evalúa el iniciador respectivo que proviene de las inspecciones manuales, con una serie de condicionales se debe evaluar y asignar la ponderación correspondiente. Por ejemplo, si el valor de la inspección tiene una altura libre inferior menor o igual a 1.5, se asigna un valor constante de 5; en caso contrario, se procede a evaluar la siguiente condición. En la figura 4.17 se detallan los pasos para el algoritmo que permite obtener el valor mencionado.

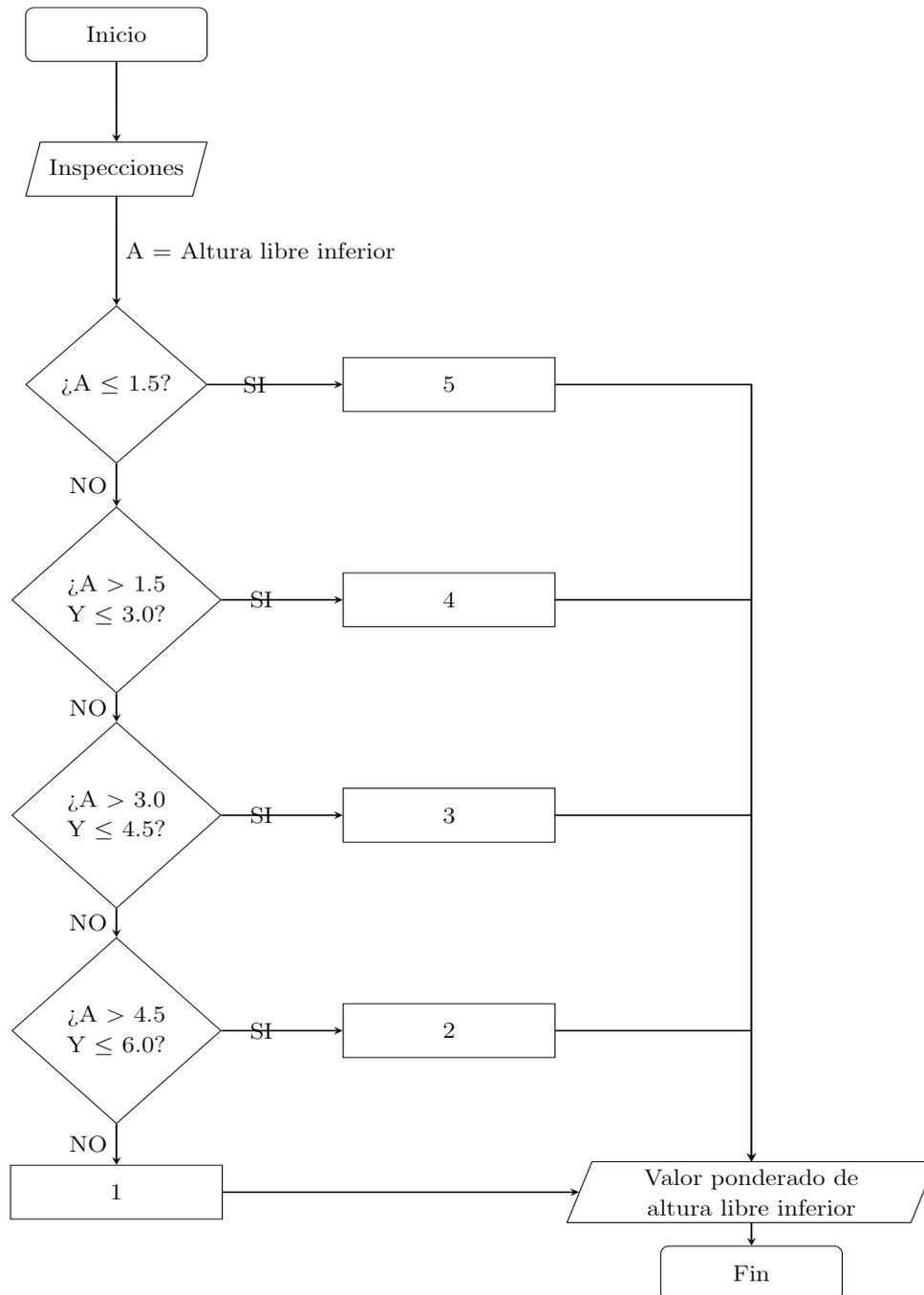


Figura 4.17: Diseño del algoritmo para ponderación de altura libre inferior

4.4.1.3.3. Cálculo del valor ponderado de estrechamiento del cauce

Para obtener la ponderación del estrechamiento del cauce se evalúa el iniciador correspondiente que proviene de las inspecciones manuales, con una serie de condicionales se debe evaluar y asignar la ponderación del caso. Por ejemplo, si el valor de la inspección tiene un estrechamiento del cauce mayor a 1.5, se asigna un valor constante de 5; sino, se procede a evaluar la siguiente condición. En la figura 4.18 se detallan los pasos para el algoritmo que permite obtener el valor mencionado.

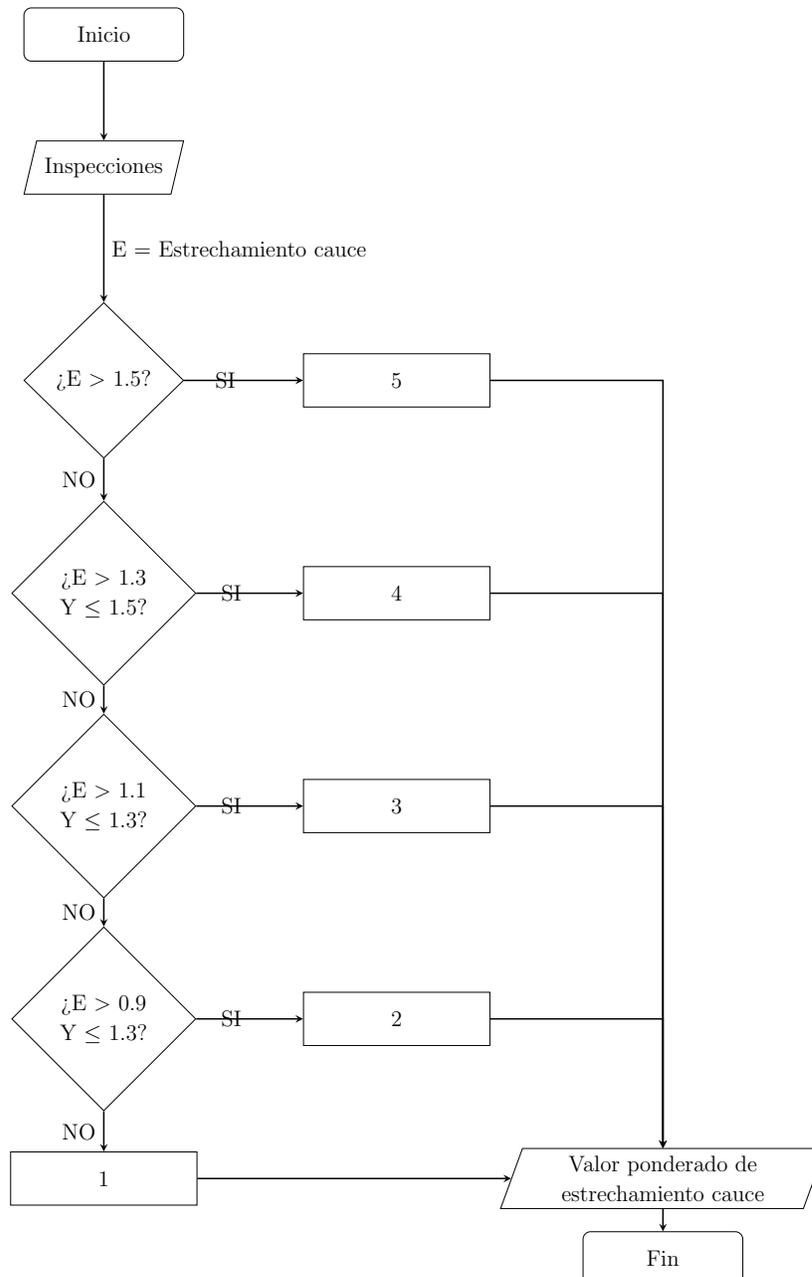


Figura 4.18: Diseño del algoritmo para ponderación de estrechamiento del cauce

4.4.2. Cálculo de valores para la jerarquía de BCI

Para visualizar dinámicamente el índice de la jerarquía BCI, fue necesario desarrollar un algoritmo que reutilice las medidas previamente creadas y que permita mostrar los subíndices en los distintos niveles de la jerarquía. Para diseñar este algoritmo, se crearon dos métodos auxiliares: el primero, denominado “calcular componentes”, se enfoca en calcular los valores de los componentes; el segundo, llamado “calcular elementos”, se encarga de calcular los valores de los elementos. Ambos métodos están detallados en las figuras 4.20, 4.21 y 4.22. Además, la figura 4.19 ilustra los pasos necesarios para la implementación de este algoritmo, que facilita la visualización del BCI en la jerarquía.

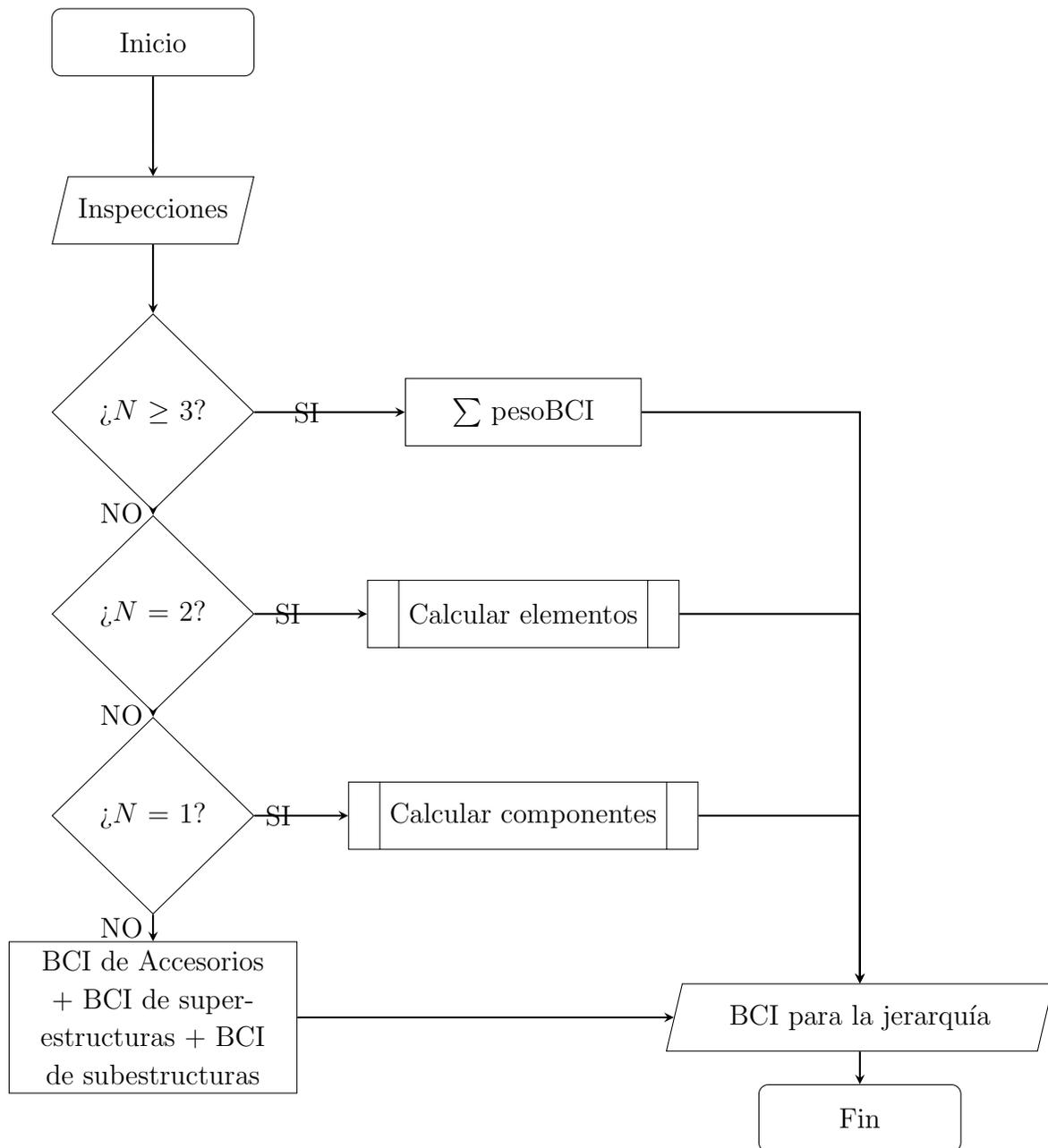


Figura 4.19: Diseño del algoritmo para jerarquía BCI.

En las siguientes subsecciones se muestra el diseño del algoritmo con los pasos para calcular los valores de componentes y elementos.

4.4.2.1. Cálculo de valores para componentes

Como se mencionó anteriormente se diseñó un algoritmo para calcular y poder mostrar los valores en forma dinámica en los distintos niveles del árbol, componentes corresponde al nivel 1 en la jerarquía BCI. La solución evalúa específicamente tres condiciones para verificar si se debe efectuar el cálculo ya sea de accesorios, subestructuras o superestructuras. En la figura 4.20 se muestran los pasos que permiten dicha solución.

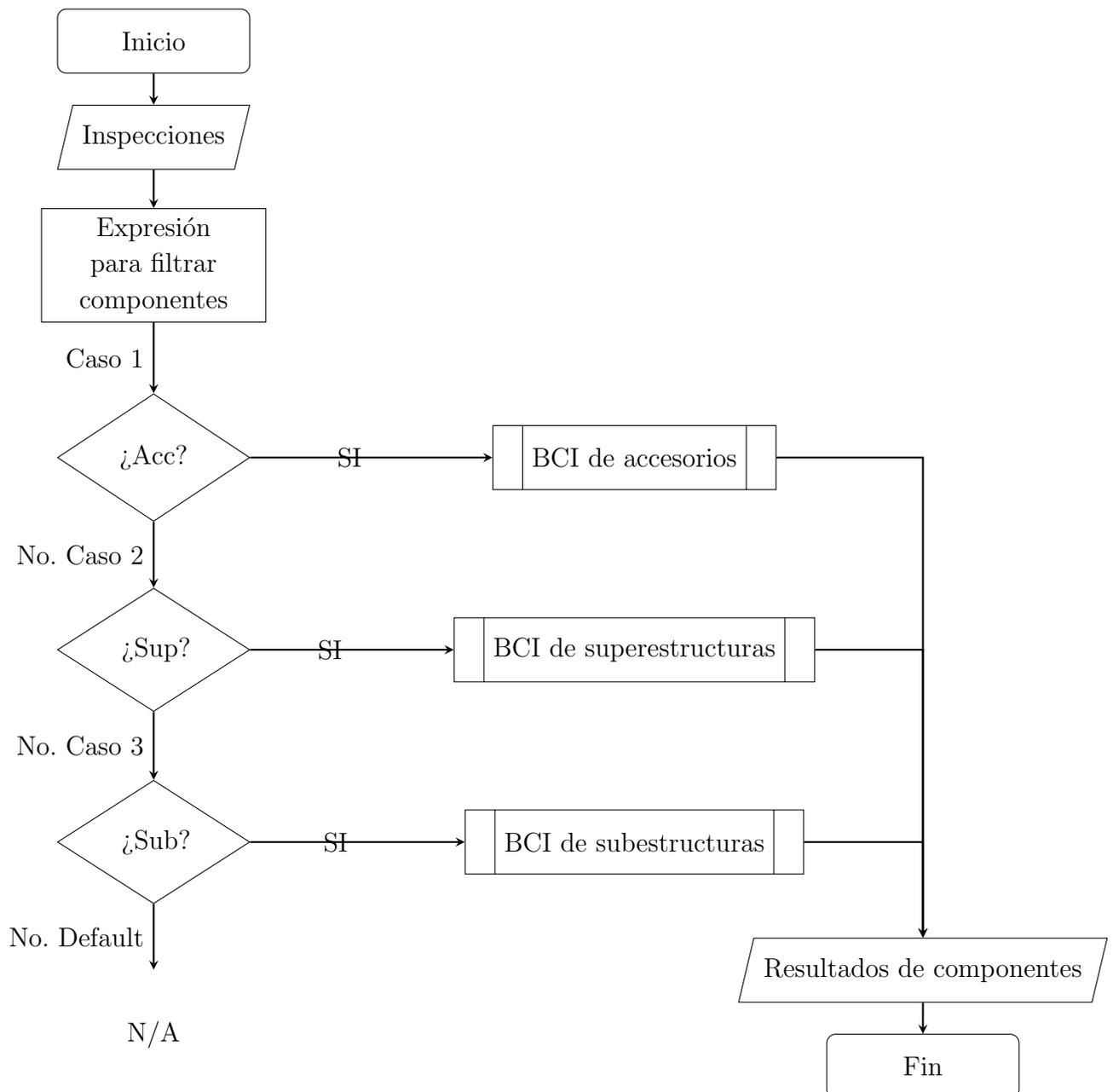


Figura 4.20: Diseño del algoritmo para cálculo de valores en componentes.

4.4.2.2. Cálculo de valores para elementos

Como se mencionó anteriormente se diseñó un algoritmo para calcular y poder mostrar los valores en forma dinámica en el árbol, el caso de elementos es el nivel 2 en la jerarquía BCI. La solución evalúa una serie de condiciones para verificar el cálculo que se debe de aplicar al elemento. En las figuras 4.21 y 4.22 se detallan los pasos que permiten dicha solución.

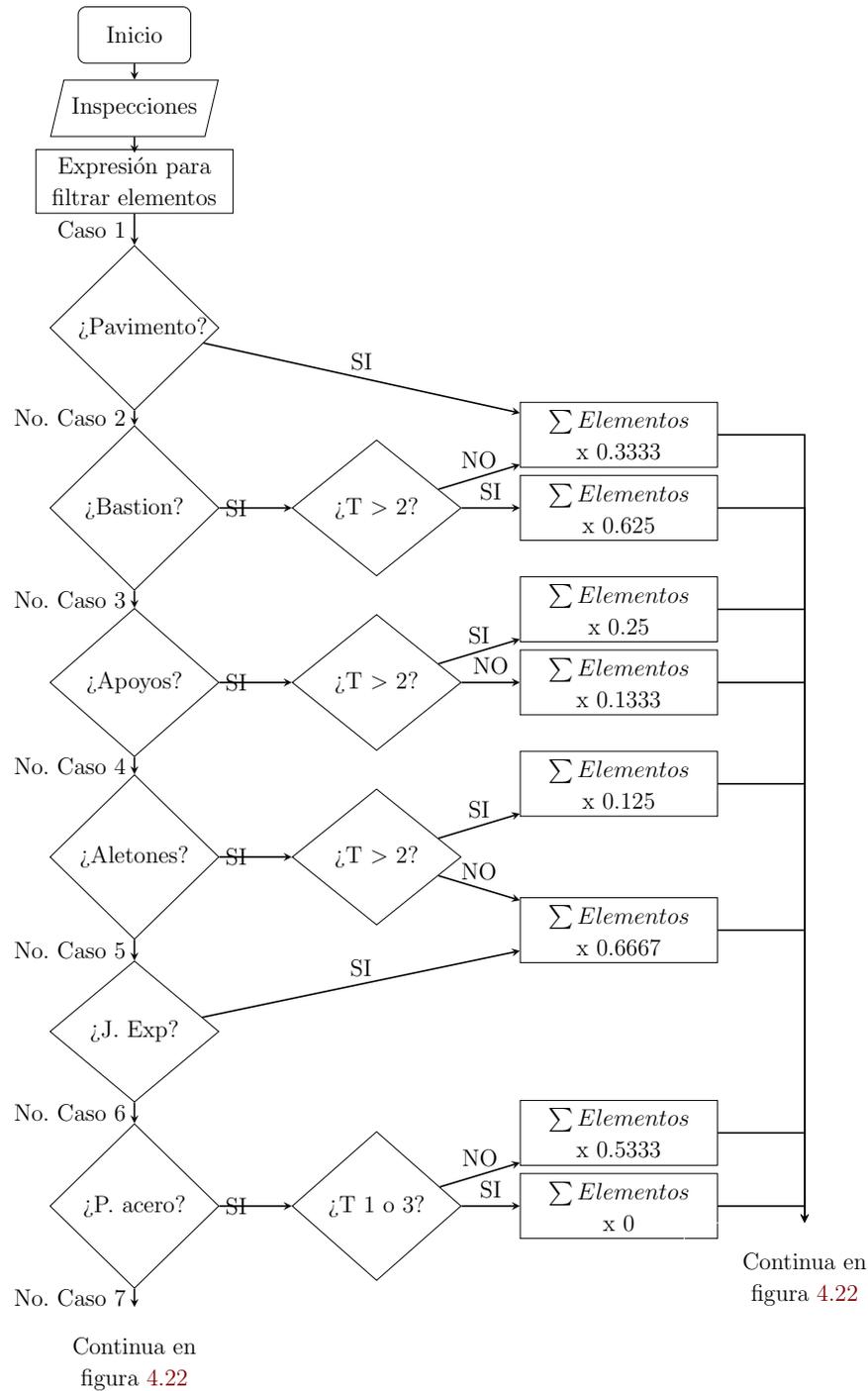


Figura 4.21: Diseño del algoritmo para cálculo de valores en elementos - Parte 1.

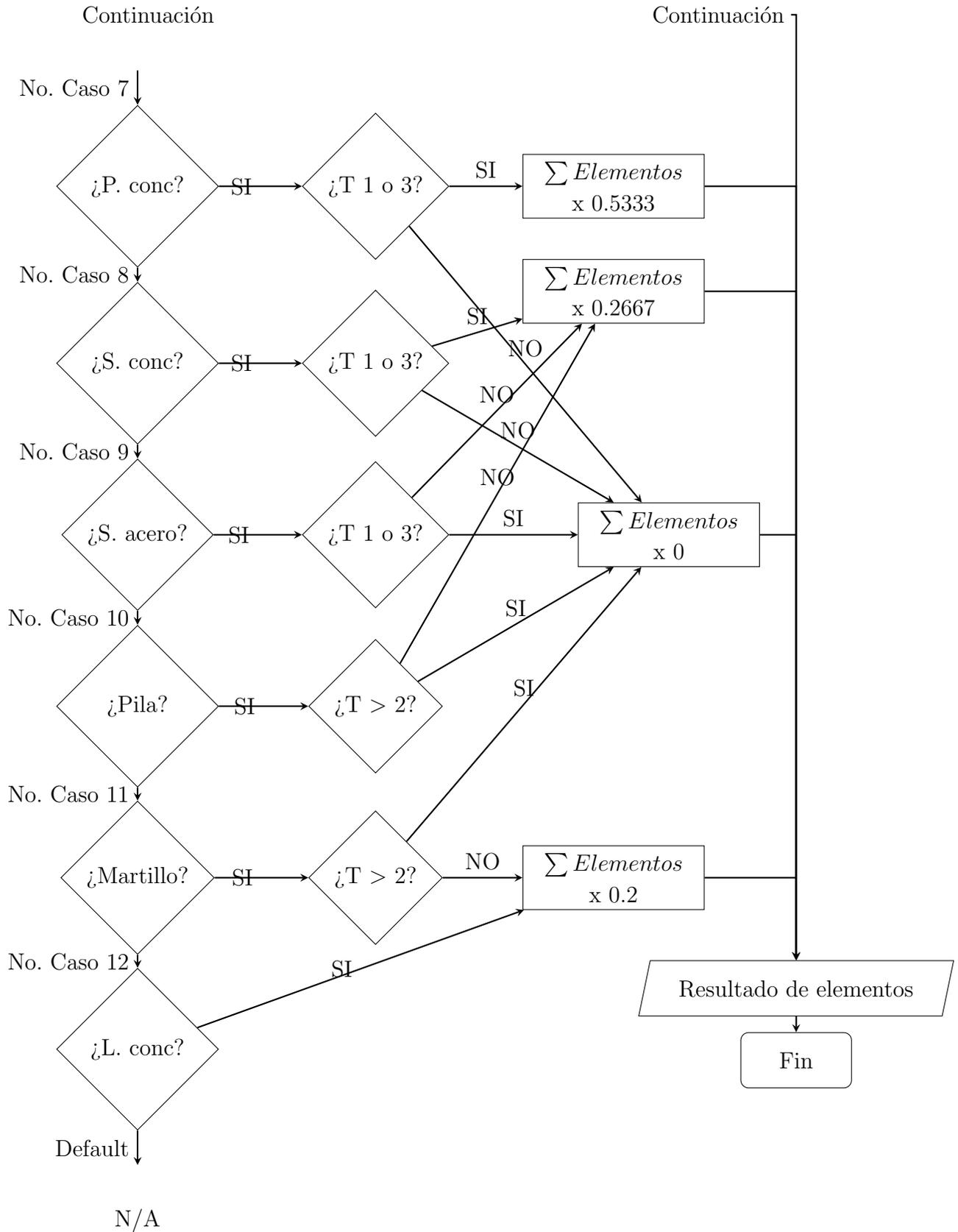


Figura 4.22: Diseño del algoritmo para cálculo de valores en elementos - Parte 2.

4.5. Tecnologías seleccionadas

Esta subsección describe las herramientas y tecnologías utilizadas para la elaboración del diseño del modelo dimensional, el procesamiento de datos y la aplicación de visualizaciones.

- Microsoft Power BI: Como producto de investigaciones anteriores el grupo de investigación e-Bridge ya cuenta con licencias para uso de Power BI [35], la cual es una plataforma de análisis de datos e inteligencia de negocios (BI), la misma permite a los usuarios conectar una variedad de fuentes de datos, realizar análisis avanzados, crear visualizaciones interactivas e informes. Esta investigación toma como base el dashboard creado en la versión anterior de de la herramienta de e-Bridge, se integran las visualizaciones con el nuevo modelo de BI creado en PostgreSQL, además refleja visualizaciones nuevas como el árbol para validar el origen del índice BCI.
- PostgreSQL: Al ser un proyecto de investigación se elige el gestor de bases de datos PostgreSQL [54], el cual es conocido por su robustez, escalabilidad y capacidad de personalización, este gestor de bases de datos relacionales posee amplia trayectoria y es de libre uso, el mismo brinda la facilidad que puede ser integrado con variedad de tecnologías, en este caso conectado con Power BI y hospedado en Azure.
- pgAdmin: Se utilizó pgAdmin [55] como herramienta y editor para la creación del modelo dimensional y la ejecución de scripts sql en PostgreSQL. PgAdmin proporciona una interfaz gráfica de usuario para administrar y manipular la base de datos de manera eficiente y fácil de usar.
- Azure Portal: Se utilizó el portal de Azure [52] como host del aplicativo para ejecutar el pipeline de procesado de datos y también como servidor para el modelo dimensional o modelo de BI.
- Azure Data Factory: Azure Data Factory [56] es un servicio de integración de datos en la nube de Microsoft que permite crear, orquestar y programar flujos de trabajo de integración de datos. Proporciona una plataforma unificada para la ingesta, preparación, transformación y carga de datos desde una amplia variedad de fuentes. En este caso facilita la creación de un aplicativo donde se puede adjuntar el archivo de inspecciones, crear y ejecutar el pipeline para el ETL que toma el archivo y almacena los datos en las tablas respectivas de PostgreSQL.
- Azure Functions: Azure Function [57] es una plataforma de cómputo serverless basada en eventos que permite desarrollar de manera más eficiente y utilizando el lenguaje de programación a elección (en este aplicativo se hace un prototipo con Python 3.11). El uso de esta plataforma simplifica la orquestación, creación y depuración en entornos locales de desarrollo, y permite desplegar en la nube con los servicios de Azure.

- Python: Para la ejecución del pipeline de procesamiento de datos se crea una pseudo aplicación en Python [58] que es un lenguaje de programación interpretado, orientado a objetos, de alto nivel. Python es ampliamente usado en industrias como desarrollo de aplicaciones, ciencias de datos, juegos, inteligencia artificial y es de libre uso. Con el uso de Python y la librería Pandas se facilita el procesamiento del archivo de inspecciones.

Capítulo 5

Desarrollo de la herramienta

Este capítulo describe el desarrollo de la herramienta mediante el uso de Power BI y expresiones de análisis de datos (DAX), las pantallas y prototipo de la aplicación para crear las visualizaciones de la versión de e-Bridge BHI, así como otras visualizaciones importantes en relación al cálculo de índices.

5.1. Expresiones de análisis de datos (DAX)

Una de las facilidades que Power BI ofrece es el uso de DAX [59] (Data Analysis Expressions por su siglas en inglés) el cual es una biblioteca de funciones y operadores que se pueden combinar para crear fórmulas y expresiones, las cuales permiten crear los cálculos de los índices de puentes desde esta herramienta. A continuación se describen las expresiones para calcular las columnas y medidas que han concebido los índices de puentes.

5.1.1. DAX para BHI

El cálculo del índice de salud estructural del puente (BHI) puede ser calculado mediante el promedio entre la criticidad y la importancia socioeconómica: En el código 5.1 para determinar la criticidad, se utiliza la función MAX que obtiene el valor máximo entre el índice de condición hidrometeorológica (HCI) y el índice de condición sísmica (SCI). Simultáneamente, se emplea la función RELATED para extraer el valor de la *importancia_socioeconomica* desde la tabla relacionada *diminformacionpuente*, y luego se calcula y retorna el promedio de los valores obtenidos.

```
BHI =  
VAR criticidad = MAX([HCI], [SCI])  
VAR imp_soc = RELATED(diminformacionpuente[importancia_socioeconomica])  
RETURN (criticidad + imp_soc) / 2
```

Código 5.1: DAX para calcular el BHI

5.1.2. DAX para BCI

El valor del índice de condición estructural del puente (BCI) es la suma de los subíndices estructurales, los cuales se calculan con las medidas de [bci_acc] BCI de accesorios, [bci_sub] BCI de subestructuras y [bci_sup] BCI de superestructuras. La solución se muestra a continuación en el código 5.2.

```
BCI = [bci_acc] + [bci_sub] + [bci_sup]
```

Código 5.2: DAX para calcular el BCI

Como se ha mencionado este índice depende de los cálculos de las estructuras, por lo tanto, a continuación se describen las expresiones que permiten obtener dichos subíndices.

5.1.2.1. DAX para BCI de accesorios

La medida DAX llamada *bci_acc_medida* presente en el código 5.3, calcula el BCI de accesorios utilizando la función CALCULATE. Este cálculo se realiza en varios pasos: primero, se aplica un filtrado de datos utilizando la función FILTER para seleccionar las filas de la tabla *hechosinspecciones* donde el campo *codigo_indicador* contiene la cadena con el prefijo “Acc”, correspondiente a los accesorios. Luego, se procede a una suma ponderada mediante la función SUMX, que itera sobre las filas filtradas y calcula la suma ponderada del campo *peso_BCI*, utilizando la función SWITCH para evaluar distintas condiciones y asignar factores de ponderación específicos, multiplicando el valor de *peso_BCI* por 0.3333 o 0.6667 según el valor del *codigo_indicador* (ya sea “Acc-Pav” o “Acc-Jun”). Además, con el fin de optimizar el DAX se aplica un contexto de filtro con la función ALLEXCEPT, eliminando todos los filtros en la tabla *hechoscalculosindices*, excepto el filtro para el campo *id*. Finalmente, el resultado de la suma ponderada se multiplica por la constante de 0.05 para obtener el valor final del BCI de accesorios.

```
bci_acc_medida =
CALCULATE (
    (
        SUMX (
            FILTER (
                hechosinspecciones,
                CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador], "Acc")
            ),
            hechosinspecciones[peso_BCI] * SWITCH (
                TRUE (),
                CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador], "Acc-Pav"),
                0.3333 ,
                CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador], "Acc-Jun"),
                0.6667
            )
        )
    )
)
```

```

    )
  ),
  ALLEXCEPT (hechoscalculosindices, hechoscalculosindices[id])
) * 0.05

```

Código 5.3: DAX para calcular el BCI de accesorios

5.1.2.2. DAX para calcular el BCI de superestructuras

La medida DAX llamada *bci_sup_medida* mostrada en el código 5.4, calcula el BCI de superestructuras utilizando la función `CALCULATE`. Este proceso comienza con la obtención del tipo de puente mediante la función `RELATED`, que extrae el valor de *tipo_puente* desde la tabla relacionada *diminformacionpuente*. A continuación, se realiza un filtrado de datos con la función `FILTER` para seleccionar las filas de la tabla *hechosinspecciones* en las que el campo *codigo_indicador* contiene la cadena con el prefijo “Sup”. Luego, se lleva a cabo una suma ponderada utilizando `SUMX`, iterando sobre las filas filtradas para calcular la suma ponderada del campo *peso_BCI* según el valor de *codigo_indicador* y *tipo_puente*, empleando la función `SWITCH` para evaluar distintas condiciones y asignar factores de ponderación específicos. Dependiendo de estos valores, el *peso_BCI* se multiplica por diferentes factores. Además, con el fin de optimizar el DAX se aplica un contexto de filtro con la función `ALLEXCEPT`, que elimina todos los filtros en la tabla *hechoscalculosindices*, excepto el filtro en el campo *id*. Finalmente, el resultado de la suma ponderada se multiplica por una constante de 0.45 para obtener el valor final del BCI de superestructura.

```

bci_sup_medida =
CALCULATE (
  (
    SUMX (
      FILTER (
        hechosinspecciones,
        CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador], "Sup")
      ),
      hechosinspecciones[peso_BCI] * SWITCH (
        TRUE (),
        CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador], "Sup-EPS-EIP-Ace"),
        IF(OR(RELATED(diminformacionpuente[tipo_puente])=1,
            RELATED(diminformacionpuente[tipo_puente])=3), 0, 0.5333),
        CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador], "Sup-EPS-ES-Ace"),
        IF(OR(RELATED(diminformacionpuente[tipo_puente])=1,
            RELATED(diminformacionpuente[tipo_puente])=3), 0, 0.2667),
        CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador], "Sup-EPS-EP-Con"),
        IF(OR(RELATED(diminformacionpuente[tipo_puente])=1,
            RELATED(diminformacionpuente[tipo_puente])=3), 0.5333, 0),

```

```

CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador], "Sup-EPS-ES-Con"),
  IF(OR(RELATED(diminformacionpuente[tipo_puente])==1,
        RELATED(diminformacionpuente[tipo_puente])==3), 0.2667, 0),
CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador], "Sup-LoC"),
  0.2
)
)
),
ALLEXCEPT (hechoscalculosindices, hechoscalculosindices[id])
) * 0.45

```

Código 5.4: DAX para calcular el BCI de superestructuras

5.1.2.3. DAX para BCI de subestructuras

La medida DAX llamada *bci_sub_medida* cuya solución se adjunta en el código 5.5, calcula el BCI de subestructura utilizando la función CALCULATE. El proceso comienza con la obtención del tipo de puente, empleando la función RELATED para extraer el valor de *tipo_puente* de la tabla relacionada *diminformacionpuente*. Posteriormente, se realiza un filtrado de datos utilizando la función FILTER, que selecciona las filas de la tabla hechosinspecciones donde el campo codigo_indicador contiene la cadena con el prefijo “Sub”. Luego, se efectúa una suma ponderada mediante la función SUMX, iterando sobre las filas filtradas para calcular la suma ponderada del campo *peso_BCI* según el valor de *codigo_indicador* y el *tipo_puente*. Esta ponderación se realiza utilizando la función SWITCH, que evalúa diversas condiciones y devuelve un valor específico, de modo que el *peso_BCI* se multiplica por factores diferentes en función del tipo de puente. A continuación, con el fin de optimizar el DAX se aplica un contexto de filtro con la función ALLEXCEPT, eliminando todos los filtros en la tabla *hechoscalculosindices* excepto el de campo id. Finalmente, el resultado de la suma ponderada se multiplica por una constante de 0.5 para obtener el valor final del BCI de subestructura.

```

bci_sub_medida =
CALCULATE (
  (
    SUMX (
      FILTER (
        hechosinspecciones,
        CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador], "Sub")
      ),
      hechosinspecciones[peso_BCI] * SWITCH (
        TRUE (),
        CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador], "Sub-Apo"),
          IF(RELATED(diminformacionpuente[tipo_puente])>2,0.25,0.1333),
        CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador], "Sub-Ale"),

```

```

        IF(RELATED(diminformacionpuente[tipo_puente])>2,0.125,0.0667),
        CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador],"Sub-Bas"),
        IF(RELATED(diminformacionpuente[tipo_puente])>2,0.625,0.3333),
        CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador],"Sub-Mar"),
        IF(RELATED(diminformacionpuente[tipo_puente])>2,0,0.2),
        CONTAINSSTRING(hechosinspecciones[codigo_indicador],"Sub-Pil"),
        IF(RELATED(diminformacionpuente[tipo_puente])>2,0,0.2667)
    )
)
),
ALLEXCEPT (hechoscalculosindices, hechoscalculosindices[id])
) * 0.5

```

Código 5.5: DAX para calcular el BCI de subestructuras

5.1.3. DAX para HCI

Haciendo uso de DAX se define la columna calculada HCI, que evalúa el riesgo hidrometeorológico del puente. la solución mostrada en el código 5.6, utiliza la función RELATED para obtener los valores de las variables de *estrechamiento_cauce*, *altura_libre_inferior* y *angulo_ataque* desde la tabla relacionada *dimriesgohidrometeorologico*, ponderando cada uno mediante condiciones IF que asignan un nivel de riesgo de 1 a 5. El valor máximo entre estos riesgos ponderados se determina utilizando la función MAX. Adicionalmente, se considera el riesgo de inundabilidad, asignando un valor de 5 si el puente es inundable y 1 en caso contrario. Finalmente, el valor de HCI se consigue al sumar el valor del riesgo de inundabilidad al máximo riesgo hidrometeorológico y dividiendo esta suma entre 2.

```

HCI =
VAR estrechamiento_cauce_val =
RELATED(dimriesgohidrometeorologico[estrechamiento_cauce])
VAR estrechamiento_cauce_ponderado =
    IF(estrechamiento_cauce_val>1.5,5,IF(estrechamiento_cauce_val>1.3 &&
    estrechamiento_cauce_val<=1.5,4,IF(estrechamiento_cauce_val>1.1 &&
    estrechamiento_cauce_val<=1.3,3,IF(estrechamiento_cauce_val>0.9 &&
    estrechamiento_cauce_val<=1.3,2,1))))
VAR altura_libre_inferior =
RELATED(dimriesgohidrometeorologico[li_inf])
VAR altura_libre_inferior_ponderado =
    IF(altura_libre_inferior<=1.5,5,IF(altura_libre_inferior>1.5 &&
    altura_libre_inferior<=3.0,4,IF(altura_libre_inferior>3.0 &&
    altura_libre_inferior<=4.5,3,IF(altura_libre_inferior>4.5 &&
    altura_libre_inferior<=6.0,2,1))))
VAR angulo_ataque = RELATED(dimriesgohidrometeorologico[ang_ata])

```

```

VAR angulo_ataque_ponderado = IF(angulo_ataque>75,5,IF(angulo_ataque>60 &&
    angulo_ataque<=75,4,IF(angulo_ataque>30 &&
    angulo_ataque<=60,3,IF(angulo_ataque>15 && angulo_ataque<=30,2,1))))

VAR bci_hidro =
MAX(estrechamiento_cauce_ponderado,
MAX(altura_libre_inferior_ponderado,angulo_ataque_ponderado))

RETURN
DIVIDE((IF(RELATED(dimriesgohidrometeorologico[inundable]),5,1)) + bci_hidro,2)

```

Código 5.6: DAX para calcular el HCI

5.1.4. DAX para SCI

Haciendo uso de DAX el valor del índice sismológico se consigue del promedio entre la amenaza sísmica y el BCI sismológico. En el código 5.7, para determinar la amenaza sísmica, se utiliza la función RELATED para obtener el valor de la *amenaza_sismica* de la tabla relacionada *dimriesgosismico*. Y para el valor del BCI sísmico se emplea la función MAX que facilita el determinar el máximo entre el campo *cumplimiento_ancho_asiento* de la tabla mencionada y el valor de la medida [BCI] (esto garantiza incluir el índice de condición estructural en el resultado final del BHI). Finalmente, la función DIVIDE se utiliza para calcular el promedio, sumando *amenaza_sismica* y *bci_sismico*, y dividiendo el resultado entre 2.

```

SCI =
VAR amenaza_sismica = RELATED(dimriesgosismico[amenaza_sismica])
VAR bci_sismico =
    MAX(RELATED(dimriesgosismico[cumplimiento_ancho_asiento]), [BCI])
RETURN DIVIDE(amenaza_sismica + bci_sismico, 2)

```

Código 5.7: DAX para calcular el SCI

5.1.5. DAX para visualización de la jerarquía BCI

El código DAX 5.8 para *bci_arbol* calcula el índice de condición de puentes basado en varios niveles de agregación de datos, utilizando variables de funciones. Inicialmente, se establecen las variables *calcular_elementos* y *calcular_componentes* que corresponden a medidas previamente definidas en Power BI. La variable *bci_temp* se calcula mediante una estructura condicional anidada: si solo hay un indicador en *hechosinspecciones*, se suma directamente el *peso_BCI*. Si el número de indicadores está entre 2 y 8, se utiliza el valor de *calcular_elementos*. Para indicadores entre 9 y 35, se utiliza *calcular_componentes*. Si el número de indicadores excede 35, se suma las medidas *bci_acc_medida*, *bci_sup_medida*,

y *bci_sub_medida* para obtener un valor compuesto. Esta solución permite evaluar el BCI a diferentes niveles de detalle, adaptándose a la cantidad de datos disponibles y proporcionando un cálculo dinámico basado en la estructura y composición del componente utilizado para la visualización de la jerarquía de BCI.

```

bci_arbol =
VAR calcular_elementos = [calcular_elementos]
VAR calcular_componentes = [calcular_componentes]
VAR bci_temp =
    IF(
        COUNT(hechosinspecciones[codigo_indicador]) == 1,
        SUM(hechosinspecciones[peso_BCI]), // Nivel >= 3
        IF(
            AND(COUNT(hechosinspecciones[codigo_indicador]) >
                1, COUNT(hechosinspecciones[codigo_indicador]) < 9),
            calcular_elementos, // Nivel = 2
            IF(
                AND(COUNT(hechosinspecciones[codigo_indicador]) >
                    8, COUNT(hechosinspecciones[codigo_indicador]) < 36),
                calcular_componentes, // Nivel = 1
                ([bci_acc_medida] + [bci_sup_medida] + [bci_sub_medida]) //
                Nivel = 0
            )
        )
    )
RETURN bci_temp

```

Código 5.8: DAX para calcular el BCI en la jerarquía

5.1.5.1. DAX para calcular componentes

Haciendo uso de código DAX se define una medida llamada *calcular_componentes* que determina el índice de condición para los diferentes componentes del puente basándose en el contexto actual del filtro aplicado a la columna componente de la tabla *dimindicadorpeso*. Utiliza la función IF para verificar si la columna está actualmente en el alcance del filtro, es decir, si la consulta o visualización está centrada en un componente específico. Dentro del IF, se usa SWITCH para seleccionar el valor de la medida correspondiente (*bci_acc_medida*, *bci_sup_medida* y *bci_sub_medida*) basado en el valor del componente obtenido con VALUES(dimindicadorpeso[componente]). Esto permite asignar dinámicamente la medida del índice de condición correcta (accesorios, superestructura o subestructura) dependiendo del componente que esté siendo examinado en la visualización. A continuación en el código 5.9 se muestra el ejemplo de la solución descrita.

```

calcular_componentes =
IF(

```

```

ISINSCOPE(dimindicadorpeso[componente]),
SWITCH (
    VALUES(dimindicadorpeso[componente]),
    "Accesorios", [bci_acc_medida],
    "Superestructura", [bci_sup_medida],
    "Subestructura", [bci_sub_medida]
)
)
)

```

Código 5.9: DAX para calcular los subíndices de componentes en la jerarquía BCI

5.1.5.2. DAX para calcular elementos

Haciendo uso del código DAX 5.10 se define la medida *calcular_elementos* que está diseñada para evaluar el índice de condición de diversos elementos estructurales de un puente, ajustando los cálculos según el tipo específico de puente. El proceso inicia con la declaración de *sum_elemento*, que calcula la suma de *peso_BCI* para los elementos seleccionados dentro del contexto actual de *dimindicadorpeso[elemento]* utilizando las funciones CALCULATE y ALLSELECTED. Adicionalmente, se determina el *tipo_puente* con la función MIN para identificar el tipo de estructura del puente. El retorno de la función utiliza IF para verificar si la columna elemento está en el contexto actual de filtrado y luego aplica SWITCH para asignar un factor de ponderación multiplicativo específico a *sum_elemento* basado en el elemento concreto. Los factores de ponderación varían según el elemento y tipo de puente, y se utilizan condiciones IF y OR para ajustar estos factores en respuesta a las características del puente. Los diferentes multiplicadores se aplican a elementos como pavimento, juntas de expansión, losa de concreto, etc. Esto permite apoyar el cálculo de BCI y asignar valores dinámicos a los elementos en la visualización de la jerarquía.

```

calcular_elementos =
VAR sum_elemento = CALCULATE(SUM(hechosinspecciones[peso_BCI]),
    ALLSELECTED(dimindicadorpeso[elemento]))

VAR tipo_puente = MIN(dimindicadorpeso[tipo_puente])

RETURN
    IF(
        ISINSCOPE(dimindicadorpeso[elemento]),
        SWITCH (
            VALUES(dimindicadorpeso[elemento]),
            "Pavimento", sum_elemento * 0.3333,
            "Juntas de Expansion", sum_elemento * 0.6667,
            "Losa Concreto", sum_elemento * 0.2,
            "Elementos Secundarios Acero", sum_elemento *

```

```

        IF(OR(tipo_puente==1,tipo_puente==3),0, 0.2667),
        "Elementos Principales Acero", sum_elemento *
        IF(OR(tipo_puente==1,tipo_puente==3), 0, 0.5333),
        "Elementos Principales Concreto", sum_elemento *
        IF(OR(tipo_puente==1,tipo_puente==3), 0.5333, 0),
        "Elementos Secundarios Concreto", sum_elemento *
        IF(OR(tipo_puente==1,tipo_puente==3), 0.2667, 0),
        "Apoyos", sum_elemento * IF(tipo_puente>2,0.25,0.1333),
        "Aletones", sum_elemento * IF(tipo_puente>2,0.125,0.0667),
        "Bastion", sum_elemento * IF(tipo_puente>2,0.625,0.3333),
        "Martillo", sum_elemento * IF(tipo_puente>2,0,0.2),
        "Pila", sum_elemento * IF(tipo_puente>2,0,0.2667)
    )
)

```

Código 5.10: DAX para cacular la suma de elementos en la jerarquía BCI

5.1.6. Otros DAX importantes

Dentro del modelo fue necesario crear una serie de expresiones para ejecutar cálculos auxiliares y utilizarlos en los cálculos principales de los índices. A continuación se describen los DAX mas relevantes para el prototipo:

La expresión para obtener el *peso_BCI* es una columna calculada en la tabla de *hechosInspecciones*, su código 5.11 es la multiplicación de la ponderación y el valor de la inspección.

```

peso_BCI = hechosinspecciones[peso] *
    RELATED(dimindicadorpeso[peso_ponderacion])

```

Código 5.11: DAX para calcular los pesos BCI

La expresión para calcular el *CaM* es una columna calculada en la tabla de *dimRiesgoSismico* para obtener el valor de la aceleración pico efectiva. La solución en código DAX 5.12 se muestra en la siguiente línea.

```

CaM = IF(dimriesgosismico[fallas],1.2, 1 ) * dimriesgosismico[ca]

```

Código 5.12: DAX para calcular el valor de CaM

La amenaza sísmica es una columna calculada en la tabla de *dimRiesgoSismico* que se puede calcular luego de calculado el C_aM , como se muestra en la fórmula 5.13.

```

amenaza_sismica = (dimriesgosismico[CaM]/0.588) * 4 + 1

```

Código 5.13: DAX para calcular la amenaza sísmica

La longitud de asiento mínima es una columna calculada en la tabla de *dimRiesgoSismico*, como se muestra en el bloque de código 5.14.

```
longitud_asiento_minima = dimriesgosismico[fac_imp_cs] * (305 + 2.50 *
    dimriesgosismico[long_sup]) * (1 + 0.000125 *
    POWER(dimriesgosismico[angulo],2))
```

Código 5.14: DAX para calcular la longitud de asiento mínima

El cumplimiento de ancho del asiento es una columna calculada en la tabla de *dimRiesgoSismico*, el código se muestra en la siguiente fórmula 5.15.

```
cumplimiento_ancho_asiento =
    IF(dimriesgosismico[asiento]>dimriesgosismico[longitud_asiento_minima],1,5)
```

Código 5.15: DAX para obtener el cumplimiento de ancho del asiento

El estrechamiento del cauce es una columna calculada en la tabla de *dimRiesgoHidrometeorologico*, como se puede ver en el código 5.16 es el resultado de la división de valores de inspecciones de aguas arriba y aguas abajo.

```
estrechamiento_cauce = dimriesgohidrometeorologico[an_arri] /
    dimriesgohidrometeorologico[an_aba]
```

Código 5.16: DAX para calcular el estrechamiento del cauce

En el código 5.17 se adjunta la solución de ejemplo para obtener el ranking de puentes, el cual es una columna calculada en la tabla de *hechosCalculosIndices*, cabe mencionar que el mismo está basado en el valor del BHI.

```
ranking = RANKX(ALLSELECTED(hechoscalculosindices), [BHI], , DESC)
```

Código 5.17: DAX para obtener el ranking de puentes por BHI

El estado BHI es una columna calculada en la tabla de *hechosCalculosIndices*, es un indicador del estado del puente basado en el valor del BHI, como se muestra en la siguiente fórmula del código DAX 5.18.

```
estado_bhi =
VAR estado = [BHI]
RETURN IF(estado < 2, "SATISFACTORIO", IF(estado < 3, "ACEPTABLE", IF(estado < 4,
    "INSATISFACTORIO", IF(estado <= 5, "DEFICIENTE"))))
```

Código 5.18: DAX para obtener el estado del BHI

El estado BCI es una columna calculada en la tabla de *hechosCalculosIndices*, es un indicador del estado basado en el valor del BCI, mostrado en la siguiente fórmula 5.19.

```
estado_bci =
```

```

VAR estado = [BCI]
RETURN
IF(estado <2 ,"SATISFACTORIO", IF(estado <3 ,"ACEPTABLE",IF(estado <4
  ,"INSATISFACTORIO", IF(estado <=5 ,"DEFICIENTE"))))

```

Código 5.19: DAX para obtener el estado del BCI

El estado HCI es una columna calculada en la tabla de *hechosCalculosIndices*, es un indicador del estado basado en el valor del HCI, como se muestra en la siguiente fórmula 5.20.

```

estado_hci =
VAR estado = [HCI]
RETURN
IF(estado <2 ,"SATISFACTORIO", IF(estado <3 ,"ACEPTABLE",IF(estado <4
  ,"INSATISFACTORIO", IF(estado <=5 ,"DEFICIENTE"))))

```

Código 5.20: DAX para obtener el estado del HCI

El estado SCI es una columna calculada en la tabla de *hechosCalculosIndices*, es un indicador del estado basado en el valor del SCI, el código adjunto en 5.21 muestra la solución para el DAX.

```

estado_sci =
VAR estado = [SCI]
RETURN
IF(estado <2 ,"SATISFACTORIO", IF(estado <3 ,"ACEPTABLE",IF(estado <4
  ,"INSATISFACTORIO", IF(estado <=5 ,"DEFICIENTE"))))

```

Código 5.21: DAX para obtener el estado del SCI

La recomendación de intervención es una columna calculada en la tabla de *hechosCalculosIndices*, es un indicador de intervención basado en el valor del BHI, como se muestra en la fórmula 5.22.

```

recomendacion_intervencion =
VAR estado = [estado_bhi]
RETURN
IF(estado="SATISFACTORIO" ,"MANTENIMIENTO RUTINARIO", IF(estado="ACEPTABLE"
  ,"MANTENIMIENTO CORRECTIVO", IF(estado="INSATISFACTORIO" ,"MANTENIMIENTO
  CORRECTIVO/REHABILITACION", IF(estado="DEFICIENTE"
  ,"REHABILITACION/SUSTITUCION"))))

```

Código 5.22: DAX para obtener la recomendación de intervención

El costo de sustitución es una columna calculada en la tabla de *dimInformacionPuente*, es el monto respectivo al costo de sustitución obtenido de la multiplicación del área por el costo por metro cuadrado, como se muestra en la fórmula 5.23.

```
costo_sustitucion = [area] * [costo_metro_cuadrado]
```

Código 5.23: DAX para calcular el costo de sustitución

El costo de intervención es una columna calculada en la tabla de *dimInformacionPuente*, es el monto respectivo al costo de intervención, la solución del bloque de código 5.24 es el DAX creado para obtener dicho valor.

```
costo_intervencion =
VAR peso_accesorios = 0.05 * (0.25 *
    RELATED(hechoscalculosindices[promedio_acc]) - 0.25)
VAR peso_subestructura = 0.50 * (0.25 *
    RELATED(hechoscalculosindices[promedio_sub]) - 0.25)
VAR peso_superestructura = 0.45 * (0.25 *
    RELATED(hechoscalculosindices[promedio_sup]) - 0.25)
RETURN [costo_sustitucion] * (peso_accesorios + peso_subestructura +
    peso_superestructura)
```

Código 5.24: DAX para calcular el costo de intervención

El porcentaje de costo intervención/sustitución es una columna calculada en la tabla de *dimInformacionPuente*, es el monto respectivo a la división de la intervención entre el costo de sustitución, como se muestra en la fórmula 5.25.

```
promedio_costo_intervencion_y_sustitucion =
    DIVIDE([costo_intervencion],[costo_sustitucion])
```

Código 5.25: DAX para calcular el promedio del costo de intervención y sustitución

El cálculo de la categoría TPD es una columna calculada en la tabla de *dimInformacionPuente*, es el monto asignado del rango que pertenece al valor TPD, como se muestra en la fórmula 5.26.

```
categoria_tpd =
IF(diminformacionpuente[tpd] > 5000 && diminformacionpuente[tpd] < 10000,
    "5000-10000",IF(diminformacionpuente[tpd]>10000 &&
    diminformacionpuente[tpd]< 20000,
    "10000-20000",IF(diminformacionpuente[tpd]>20000 &&
    diminformacionpuente[tpd]<50000,"20000-50000",
    IF(diminformacionpuente[tpd]>50000,"50000","0-5000"))))
```

Código 5.26: DAX para obtener la categoría TPD

5.2. Pantallas y prototipo

Esta subsección describe el prototipo del sistema de e-Bridge. Cabe mencionar que aunque se contaba con versiones previas del dashboard en Power BI, en este trabajo principalmente se mejoran y estandarizan las visualizaciones usando el nuevo modelo de datos y además se agrega como una visualización completamente nueva, el árbol o jerarquía de pesos BCI.

5.2.1. Indicadores

La página principal incluye 4 gráficos de barras, una tabla y el mapa de Costa Rica. La tabla muestra los puentes, su nombre y los siguientes índices: índice de salud estructural, índice de condición estructural, índice hidrometeorológico e índice de condición sísmica. Los puentes están ordenados por valor de BCI (de mayor a menor). La tabla permite filtrar el resto de las visualizaciones para que muestren solamente la información respectiva del puente que se selecciona. La figura 5.1 muestra la página.

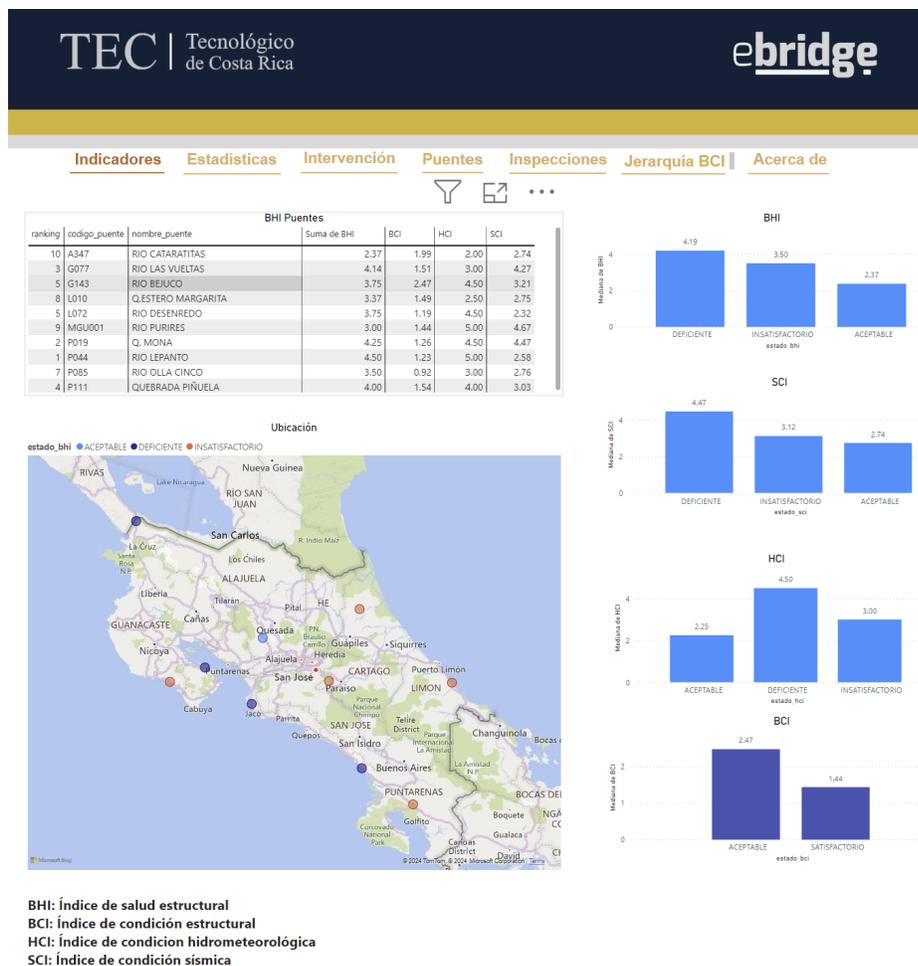


Figura 5.1: Visualizaciones de página principal.

5.2.2. Estadísticas

La figura 5.2 muestra la sección respectiva a estadísticas. A la izquierda de la pantalla se encuentra un filtro que permite ver la cantidad de puentes dentro de cada clasificación para cada provincia, cantón y distrito en específico. Y a la derecha se muestran las estadísticas respectivas según características del puente como: Longitud, materiales, tipo de ruta y la categoría TPD.

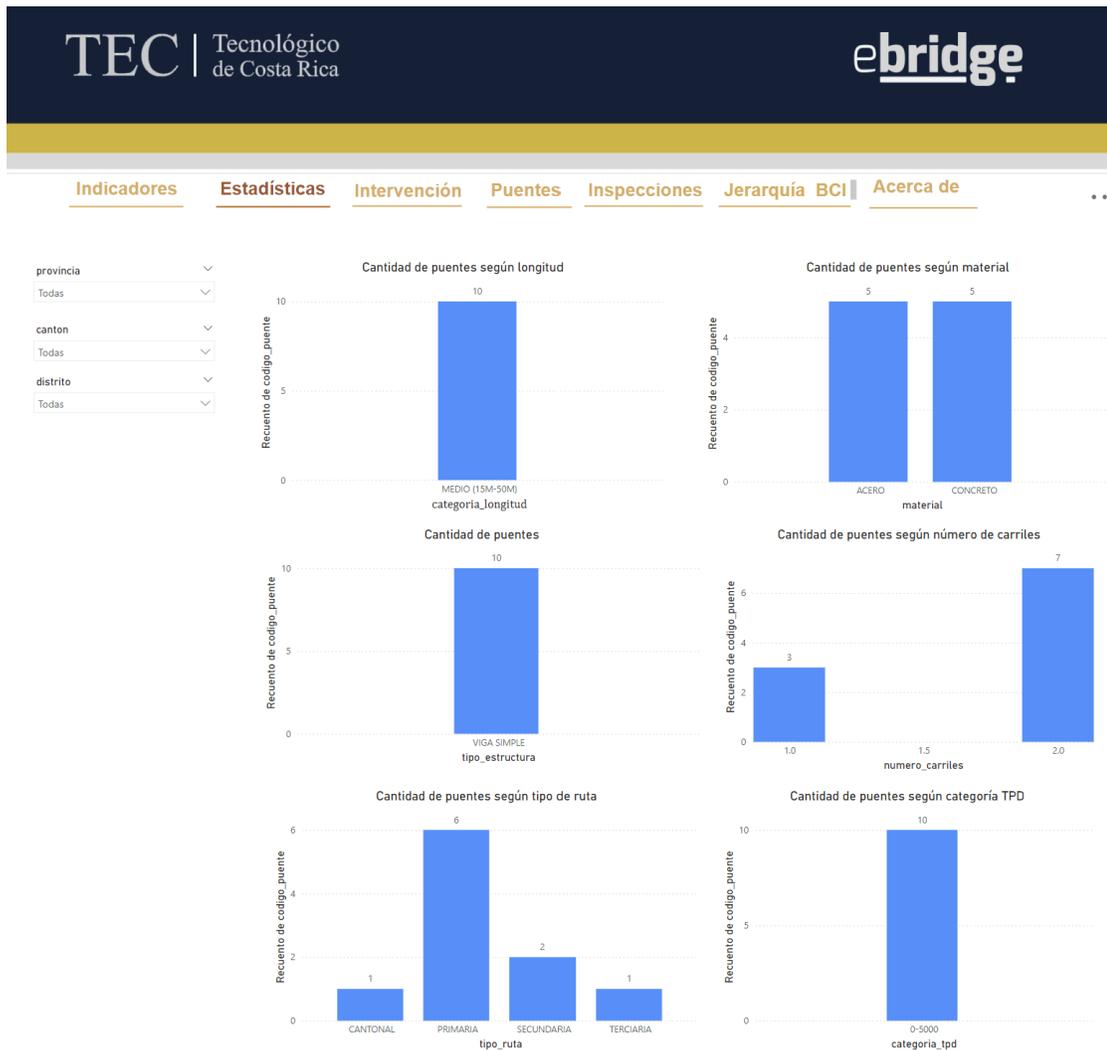


Figura 5.2: Visualizaciones de estadísticas.

5.2.3. Intervención

La página de intervención está conformada de la siguiente manera. La tabla muestra los costos preliminares y recomendación de intervención para cada uno de los puentes y los respectivos porcentajes. Por otro lado, los gráficos permiten visualizar la cantidad de puentes por recomendación y el costo de intervención para cada una de ellas. La figura 5.3 muestra la sección respectiva.

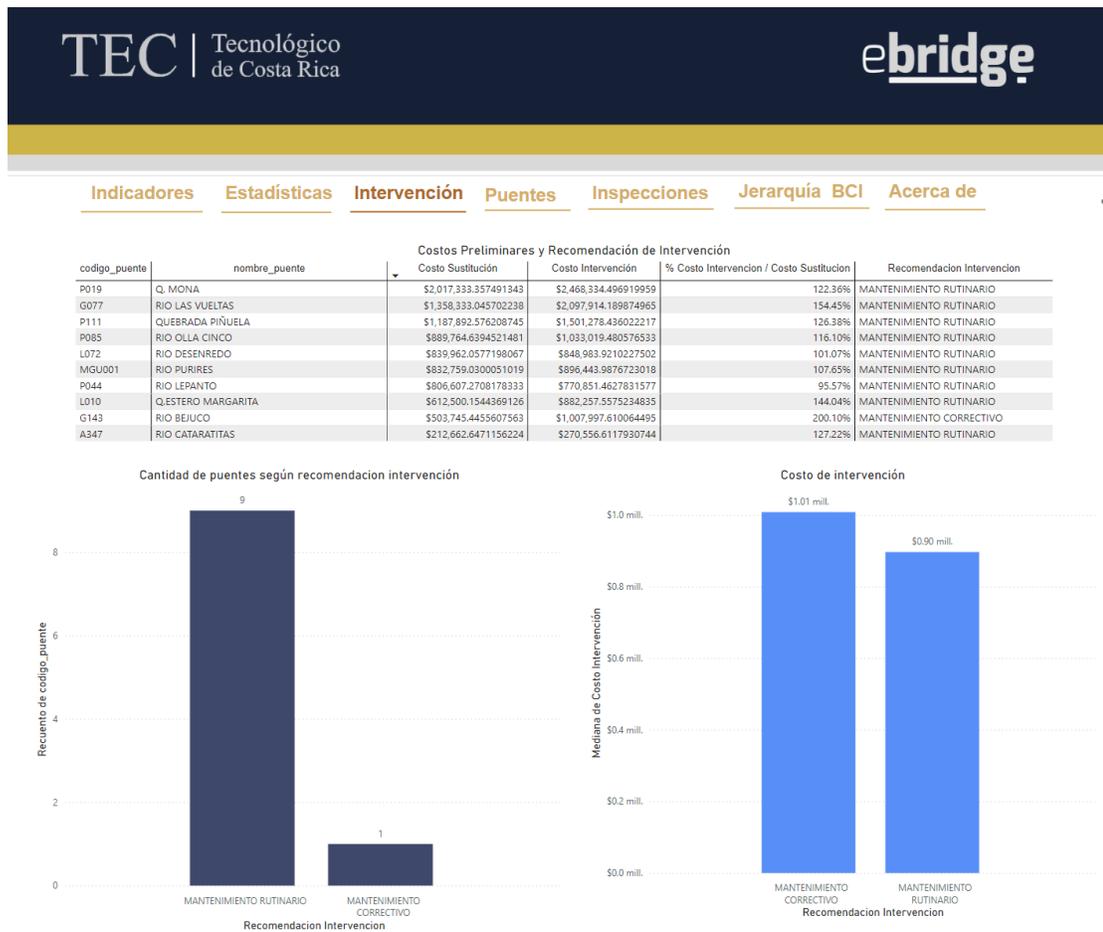


Figura 5.3: Visualizaciones de intervención.

5.2.4. Puentes

Esta visualización muestra la información más relevante para cada puente. Así como su ubicación por medio de un mapa y una fotografía del mismo. Cabe mencionar que la funcionalidad permite explorar un puente específico ya sea seleccionándolo de la tabla o bien del componente que se muestra a la izquierda. La figura 5.4 muestra la sección respectiva.



Figura 5.4: Visualizaciones de puentes.

5.2.5. Inspecciones

Esta página está constituida por una tabla y un gráfico de líneas. En la tabla se puede obtener información detallada de cada inspección y se puede acceder al reporte por medio del enlace en la última columna. El gráfico permite observar y comparar los diferentes valores que ha tenido un puente a lo largo del tiempo, por medio de las diferentes inspecciones que se han realizado. La gráfica se actualiza de acuerdo al puente seleccionado en la tabla o bien en base al filtro de los puentes mostrado a la izquierda. La figura 5.5 muestra la sección respectiva.

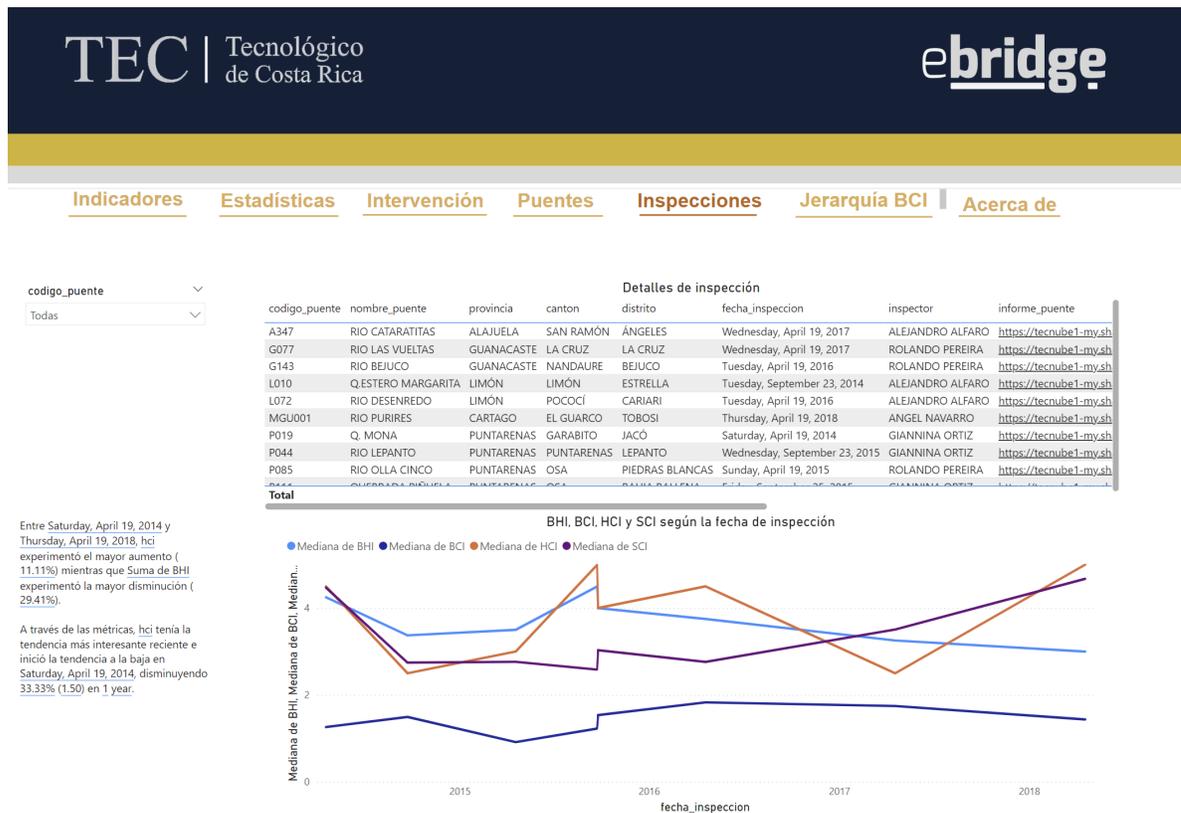


Figura 5.5: Visualizaciones de inspecciones.

5.2.6. Jerarquía de BCI

Esta visualización dinámica permite analizar y validar el cálculo del BCI hasta una profundidad de llegar al nivel de los pesos de indicadores que conceptualizan el índice. Los componentes de la interfaz permiten filtrar por puente, expandir los niveles del árbol en componentes, elementos y daños. Cabe mencionar que la página permite elegir una inspección específica mediante el filtro de la izquierda, llamado código de inspección. La figura 5.6 muestra la página donde fue integrada dicha figura, así como la visualización de la misma expandida hasta el último nivel, con los pesos ponderados de los indicadores.



Figura 5.6: Visualización de jerarquía BCI.

5.2.6.1. Visualización de pesos por componente

Esta gráfica permite la visualización de los pesos de los componentes del BCI en forma dinámica. También, Power BI facilita la configuración para mostrar mas datos al posicionarse sobre los componentes o niveles del árbol, en caso de que fuera requerido. La figura 5.7 muestra el ejemplo respectivo.

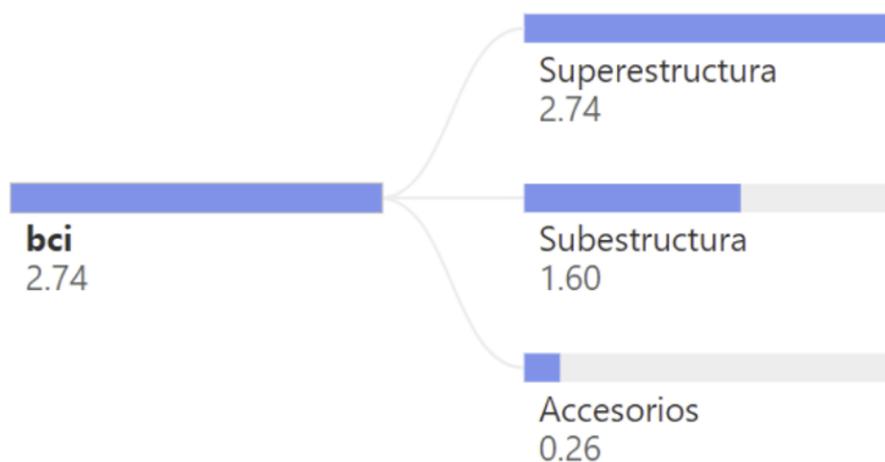


Figura 5.7: Visualización de componentes.

5.2.6.2. Visualización de pesos por elementos

La figura 5.8 muestra la visualización de los pesos de los elementos y componentes del BCI.

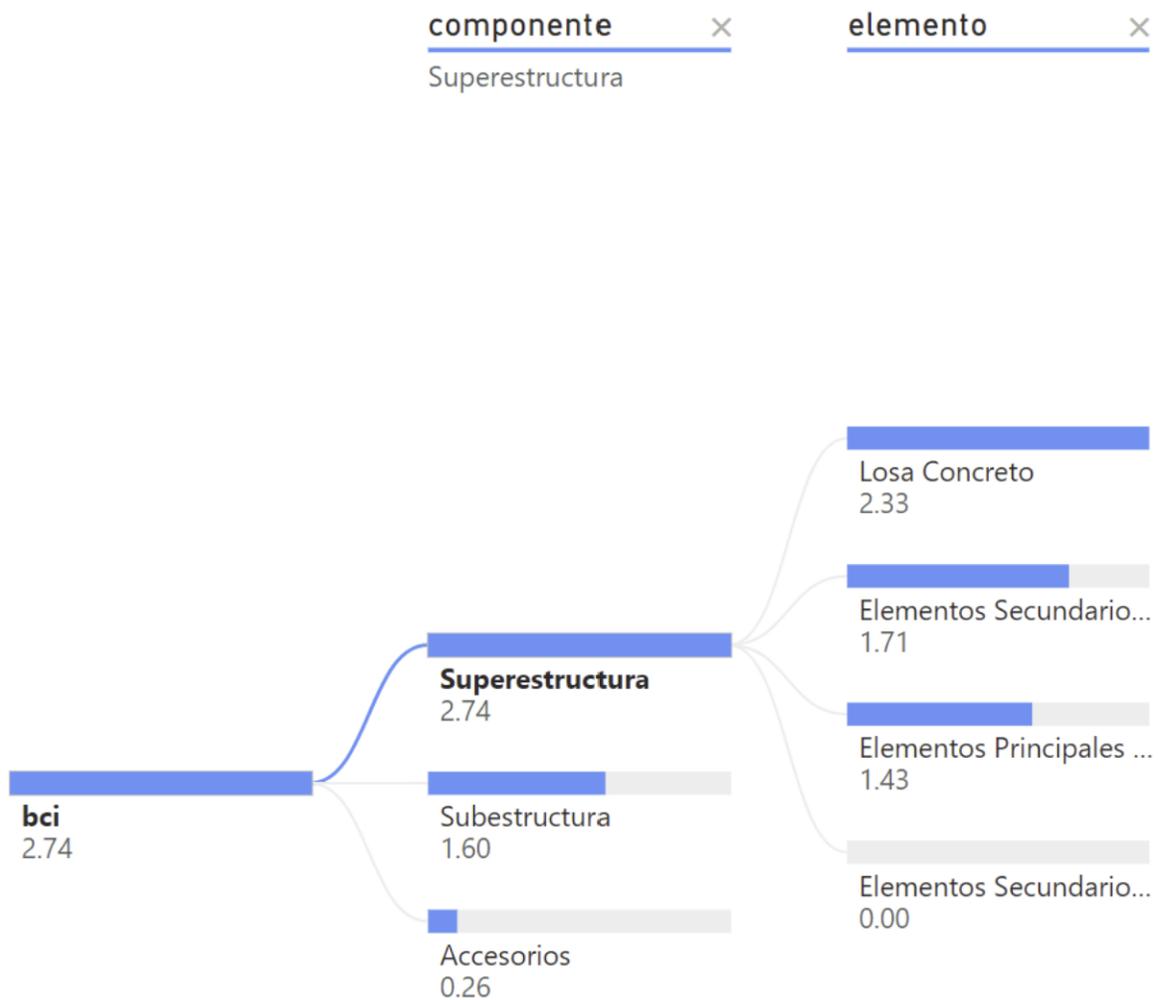


Figura 5.8: Visualización de elementos.

5.2.6.3. Visualización de pesos por daños

Como se ha mencionado, esta gráfica tipo árbol es dinámica y facilita expandir la visualización hasta mostrar el nivel de valores de los indicadores o daños, con sus respectivos elementos, componentes y toda la información de la jerarquía. La figura 5.9 muestra la visualización correspondiente.

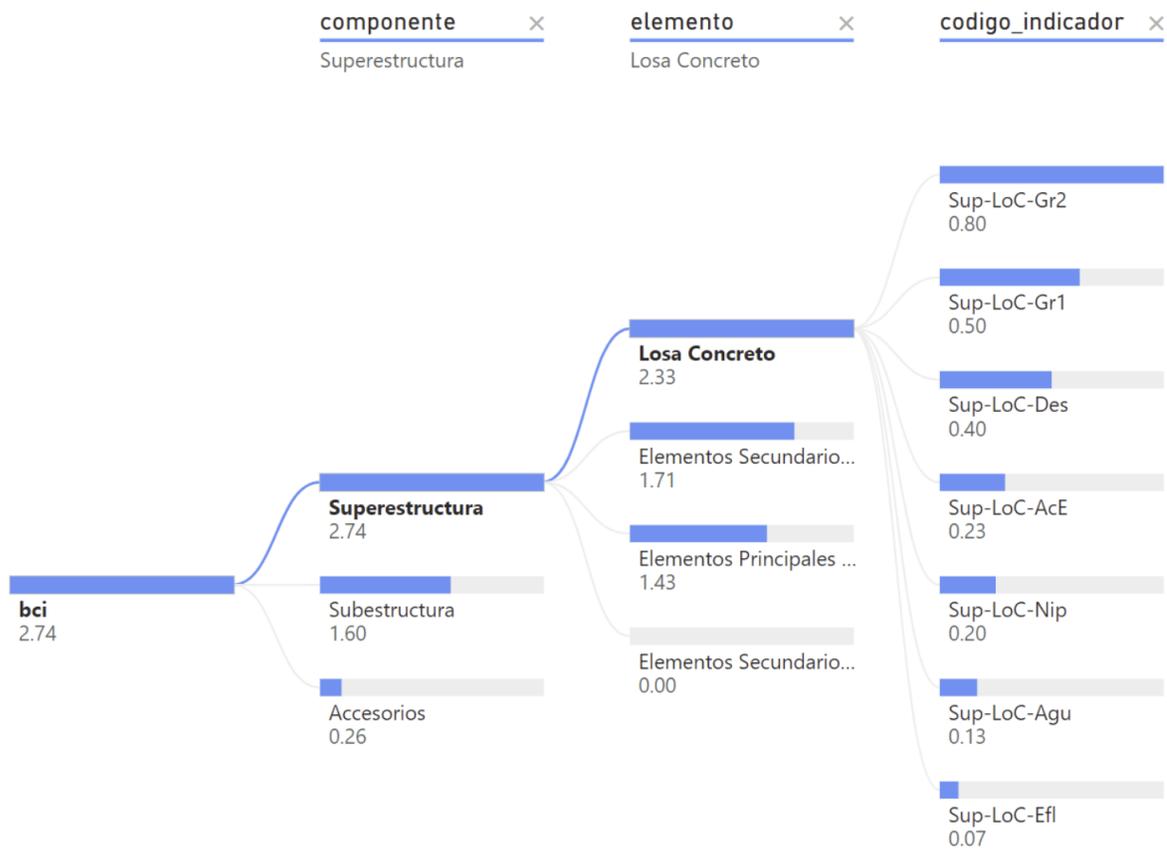


Figura 5.9: Visualización de daños.

5.3. Otras visualizaciones

Esta subsección describe ejemplos de otras gráficas importantes que se pueden obtener con facilidad del modelo dimensional propuesto y haciendo uso de Power BI.

Cabe mencionar que el modelo dimensional propuesto permite una amplia variedad de gráficas y visualizaciones de datos, por ejemplo, gráficas de los puentes a través del tiempo, o bien gráficas para ver el ranking de los puentes utilizando cualquiera de los índices definidos, entre otras. Posteriormente se muestran figuras de algunos de esos ejemplos.

5.3.1. Ranking de puentes por BHI

La figura 5.10 muestra un gráfico de barras con los puentes donde se visualiza el ranking de puentes por BHI.

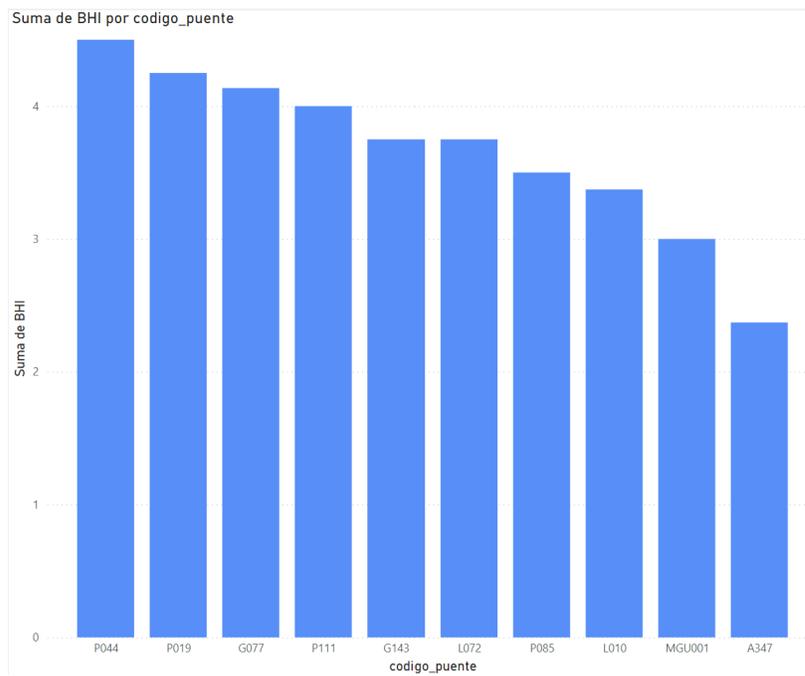


Figura 5.10: Visualización del ranking de puentes por BHI.

5.3.2. Ranking de puentes por BCI

La figura 5.11 muestra un gráfico de barras con los puentes donde se visualiza el ranking de puentes por BCI.

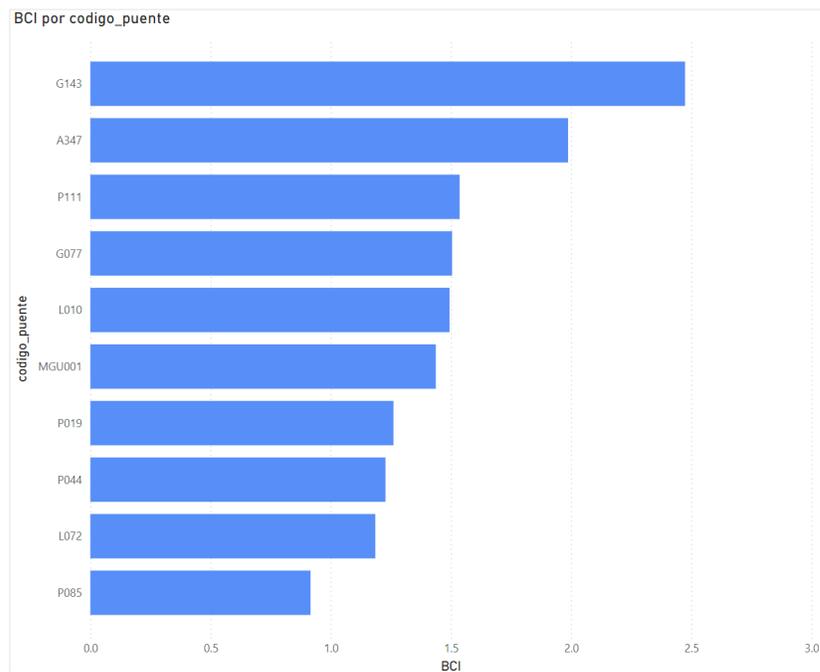


Figura 5.11: Visualización del ranking de puentes por BCI.

5.3.3. Gráfico pastel para mostrar BHI de puentes

La figura 5.12 muestra que es posible realizar otras gráficas de datos de los puentes, por ejemplo, en este caso un gráfico tipo pastel para visualizar el valor del BHI por puente.

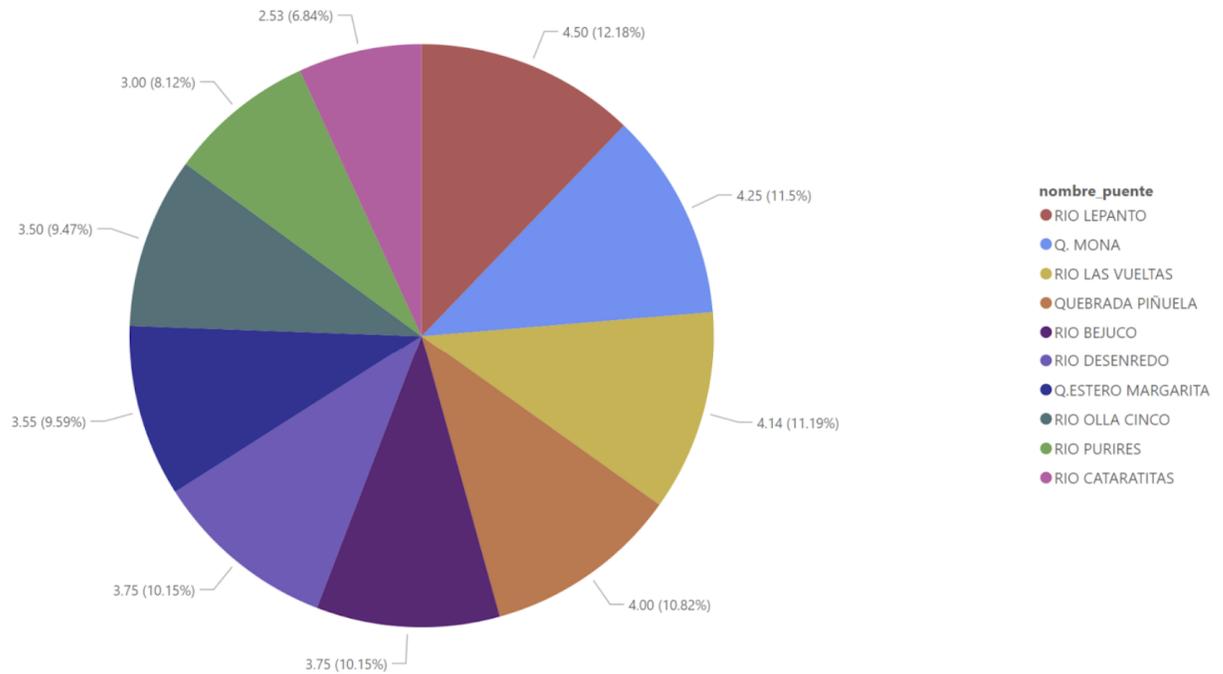


Figura 5.12: Gráfico pastel para mostrar BHI de puentes.

Capítulo 6

Validación y pruebas

Este capítulo describe la estrategia considerada para realizar la validación del modelo computacional propuesto incluyendo pruebas funcionales de la aplicación, evaluación de confiabilidad estadística y validación mediante criterio experto. En particular, el capítulo se divide en tres secciones principales: 1) evaluación funcional: comparativa para verificar la equivalencia de resultados generados por la versión anterior y la propuesta actual del sistema prototipo; 2) evaluación estadística: análisis estadístico usando Alpha de Cronbach para evaluar la confiabilidad de los daños o indicadores considerados en el cálculo del BCI; y 3) evaluación de criterio experto: evaluación por parte del grupo de investigación de e-Bridge.

6.1. Evaluación funcional de la herramienta

Esta subsección muestra la evidencia de pruebas al realizar la comparativa de las visualizaciones de información ofrecidas por la herramienta actual con respecto a la versión anterior de e-Bridge. Cabe mencionar que la versión actual hace uso del diseño dimensional tipo estrella de la propuesta (para más detalles de la herramienta ver sección 5.2).

6.1.1. Indicadores

A continuación se muestra la comparación de visualizaciones sobre indicadores en la página principal de la herramienta.

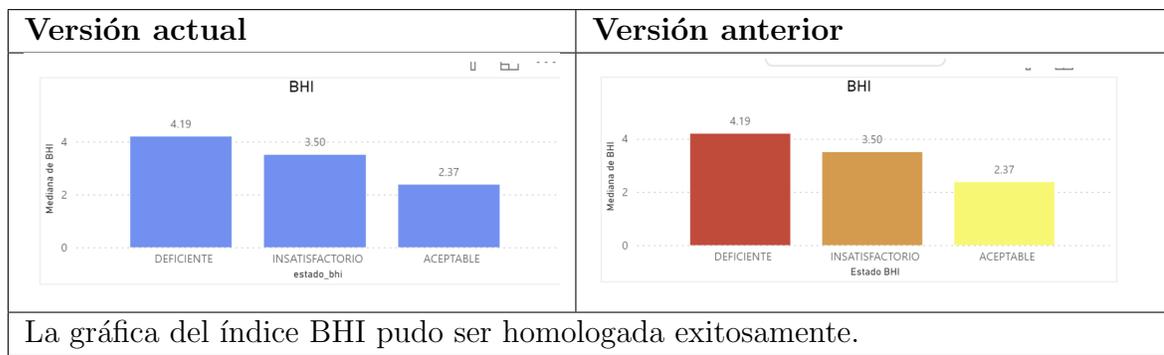
El cuadro 6.1 muestra la comparativa de la visualización de la información de índices de puentes.

Versión actual							Versión anterior						
BHI Puentes							BHI Puentes						
ranking	codigo_puente	nombre_puente	BHI	BCI	HCI	SCI	Ranking	Código Puente	Nombre Puente	BHI	BCI	HCI	SCI
1	P044	RIO LEPANTO	4.50	1.23	5.00	2.58	1	P044	RIO LEPANTO	4.50	1.23	5.00	2.58
2	P019	Q. MONA	4.25	1.26	4.50	4.47	2	P019	Q. MONA	4.25	1.26	4.50	4.47
3	G077	RIO LAS VUELTAS	4.14	1.51	3.00	4.27	3	G077	RIO LAS VUELTAS	4.14	1.51	3.00	4.27
4	P111	QUEBRADA PIÑUELA	4.00	1.54	4.00	3.03	4	P111	QUEBRADA PIÑUELA	4.00	1.54	4.00	3.03
5	G143	RIO BELUCO	3.75	2.47	4.50	3.21	5	G143	RIO BELUCO	3.75	2.47	4.50	3.21
5	L072	RIO DESENREDO	3.75	1.19	4.50	2.32	5	L072	RIO DESENREDO	3.75	1.19	4.50	2.32
7	P085	RIO OLLA CINCO	3.50	0.92	3.00	2.76	7	P085	RIO OLLA CINCO	3.50	1.35	3.00	2.94
8	L010	Q. ESTERO MARGARITA	3.37	1.49	2.50	2.75	8	L010	Q. ESTERO MARGARITA	3.37	1.49	2.50	2.75
9	MGU001	RIO PURIRES	3.00	1.44	5.00	4.67	9	MGU001	RIO PURIRES	3.00	1.44	5.00	4.67
10	A347	RIO CATARATITAS	2.37	1.99	2.00	2.74	10	A347	RIO CATARATITAS	2.37	1.99	2.00	2.74

La tabla de datos con los índices de puentes pudo ser homologada exitosamente.

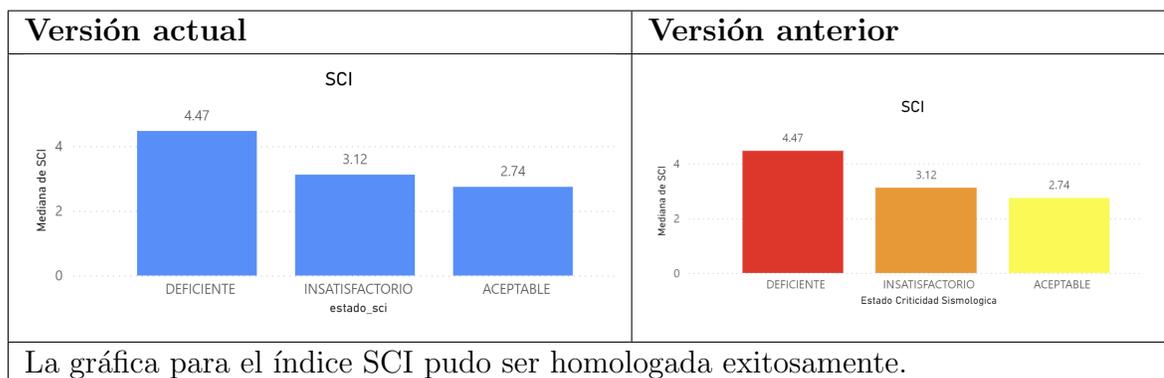
Cuadro 6.1: Comparativa de la tabla de índices

El cuadro 6.2 muestra la comparativa de la visualización del gráfico de BHI.



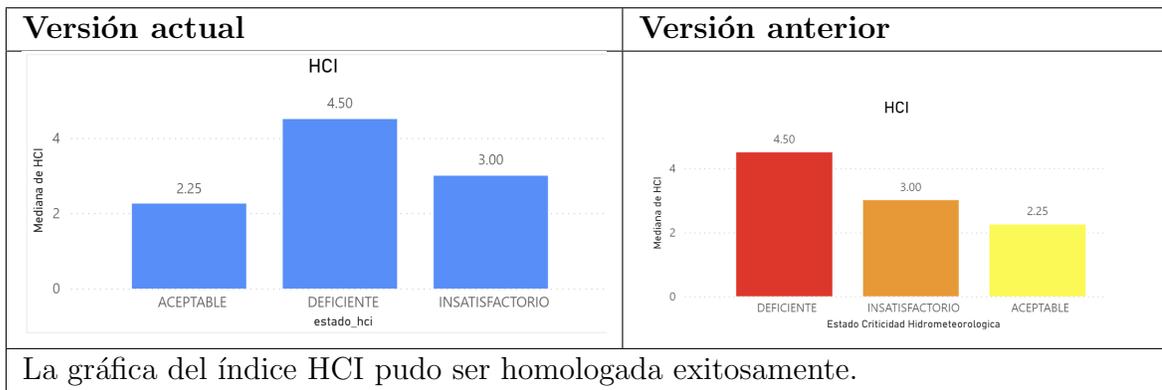
Cuadro 6.2: Comparativa del gráfico BHI

El cuadro 6.3 muestra la comparativa de la visualización del gráfico de SCI.



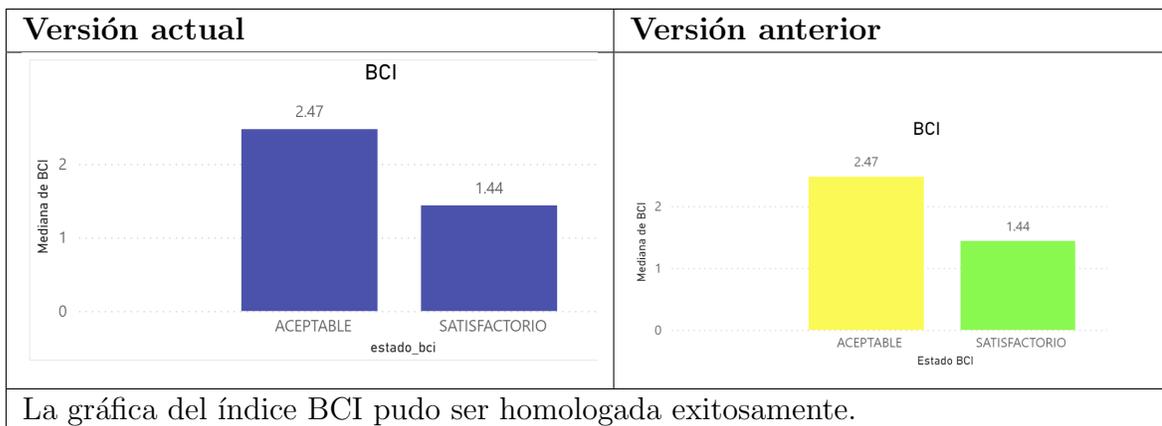
Cuadro 6.3: Comparativa del gráfico SCI

El cuadro 6.4 muestra la comparativa de la visualización del gráfico de HCI.



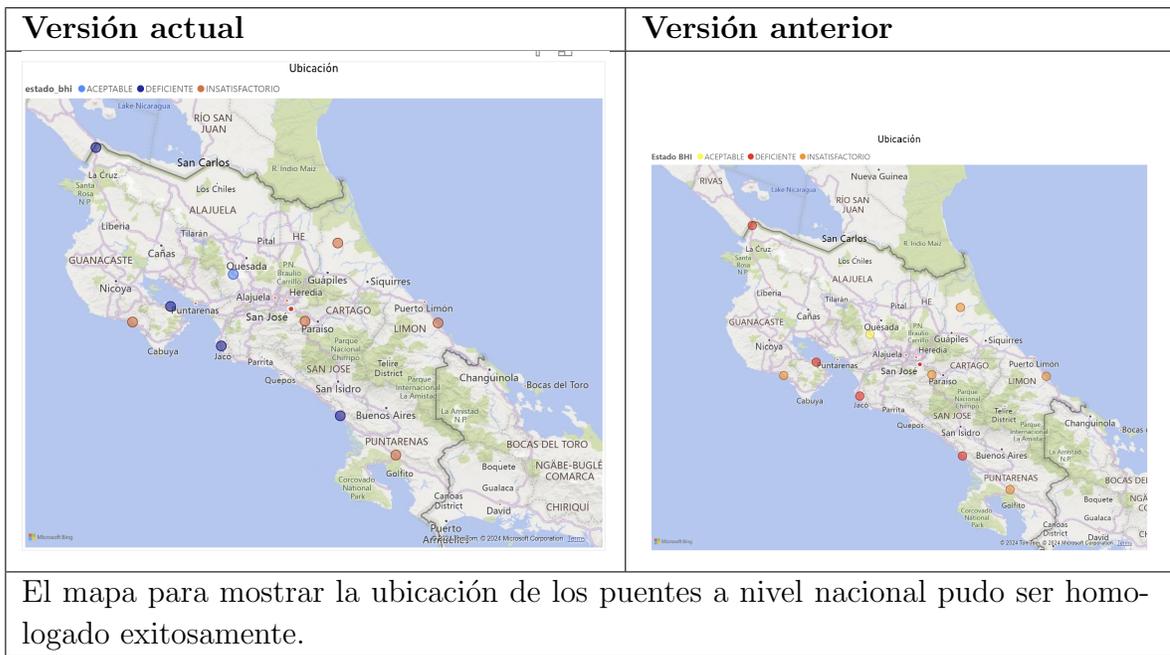
Cuadro 6.4: Comparativa del gráfico HCI

El cuadro 6.5 muestra la comparativa de la visualización del gráfico de BCI.



Cuadro 6.5: Comparativa del gráfico BCI

El cuadro 6.6 muestra la comparativa de la visualización del mapa de puentes en territorio nacional.

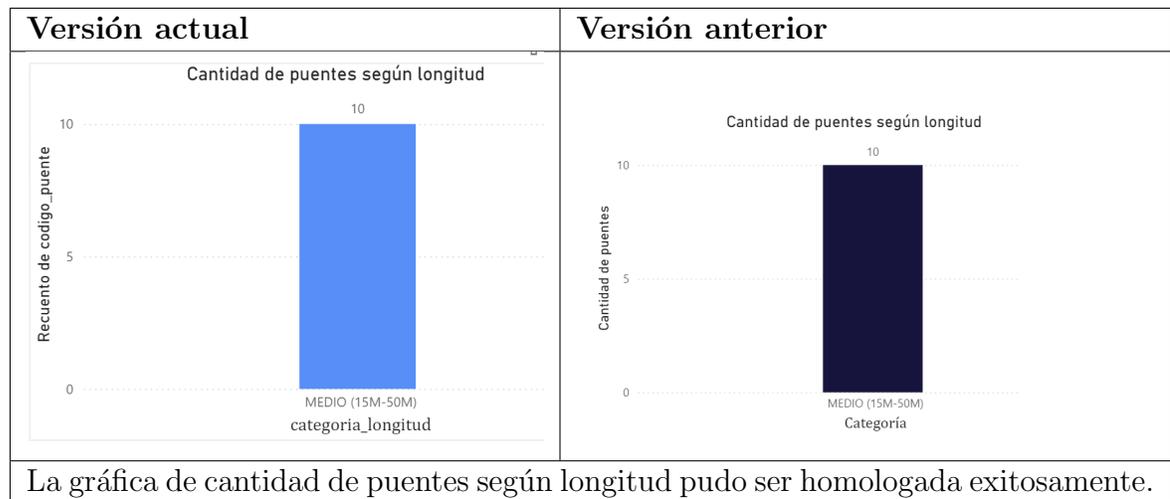


Cuadro 6.6: Comparativa del mapa de puentes

6.1.2. Estadísticas

A continuación se muestra la comparación de visualizaciones en la sección de estadísticas de la herramienta.

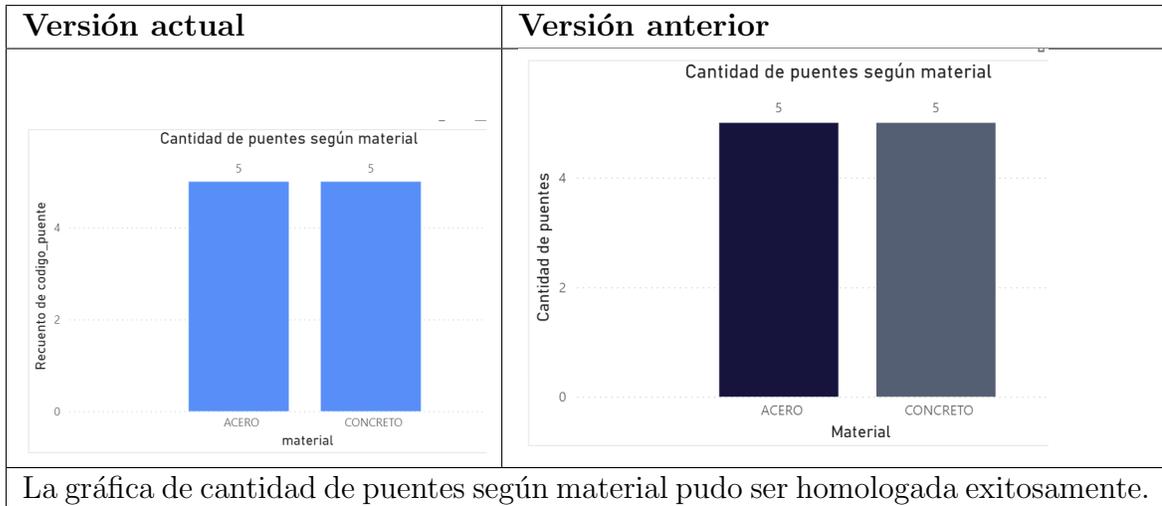
El cuadro 6.7 muestra la comparativa de la visualización del gráfico de cantidad de puentes según longitud.



Cuadro 6.7: Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según longitud

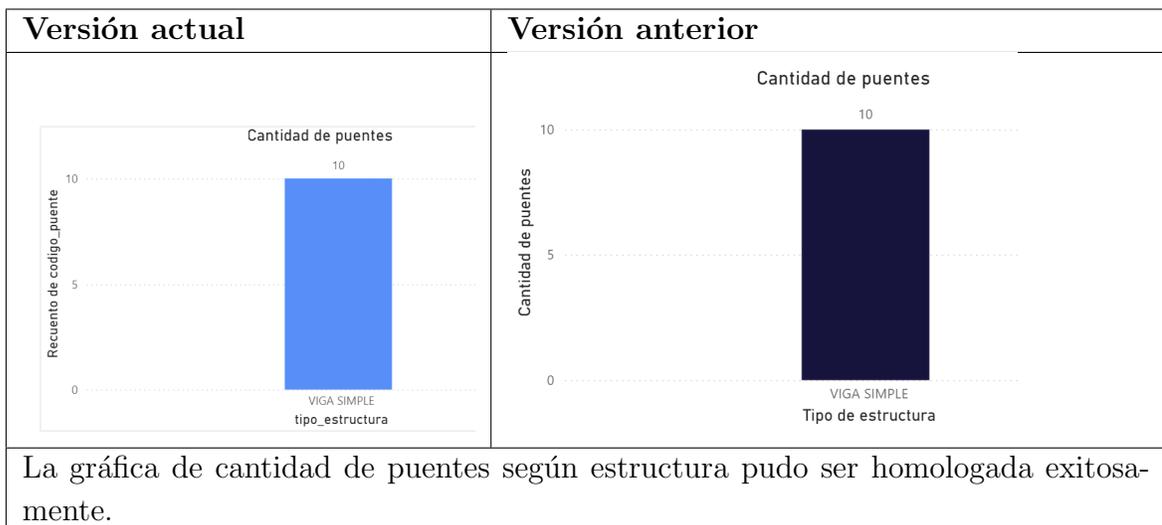
El cuadro 6.8 muestra la comparativa de la visualización del gráfico de cantidad de puentes

según material.



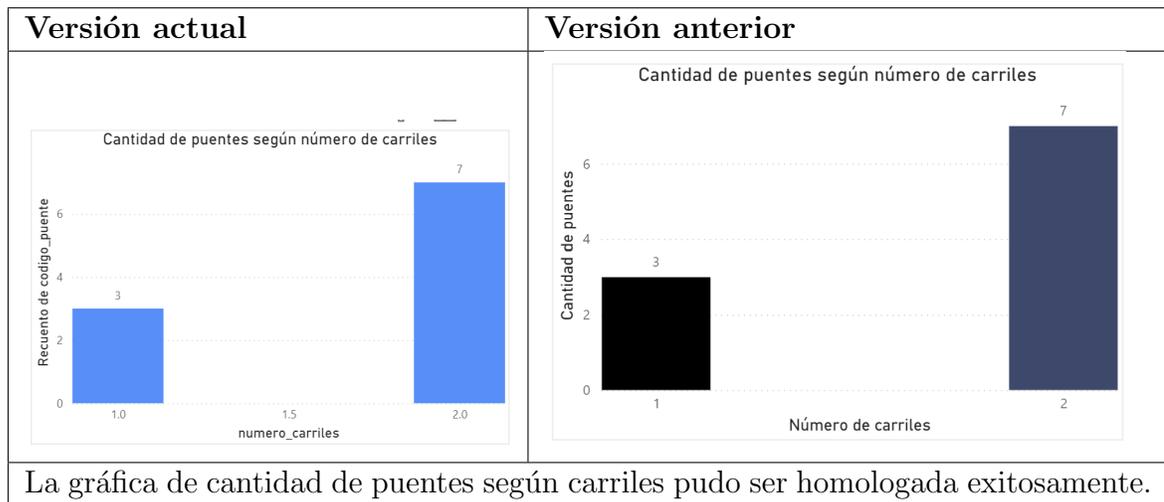
Cuadro 6.8: Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según material

El cuadro 6.9 muestra la comparativa de la visualización del gráfico de cantidad de puentes según estructura.



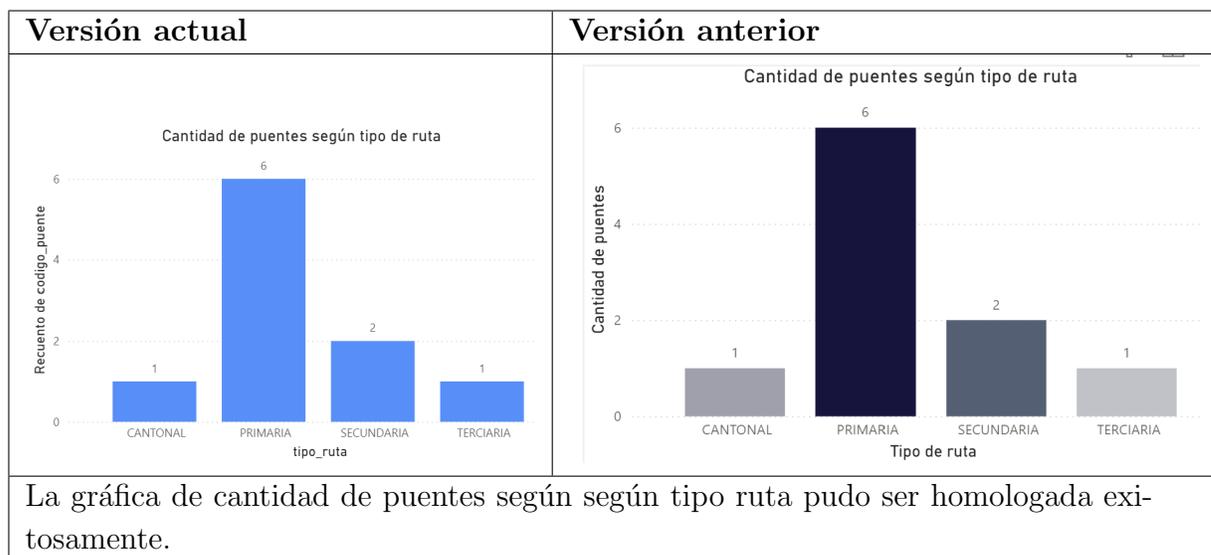
Cuadro 6.9: Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según estructura

El cuadro 6.10 muestra la comparativa de la visualización del gráfico de cantidad de puentes según número de carriles.



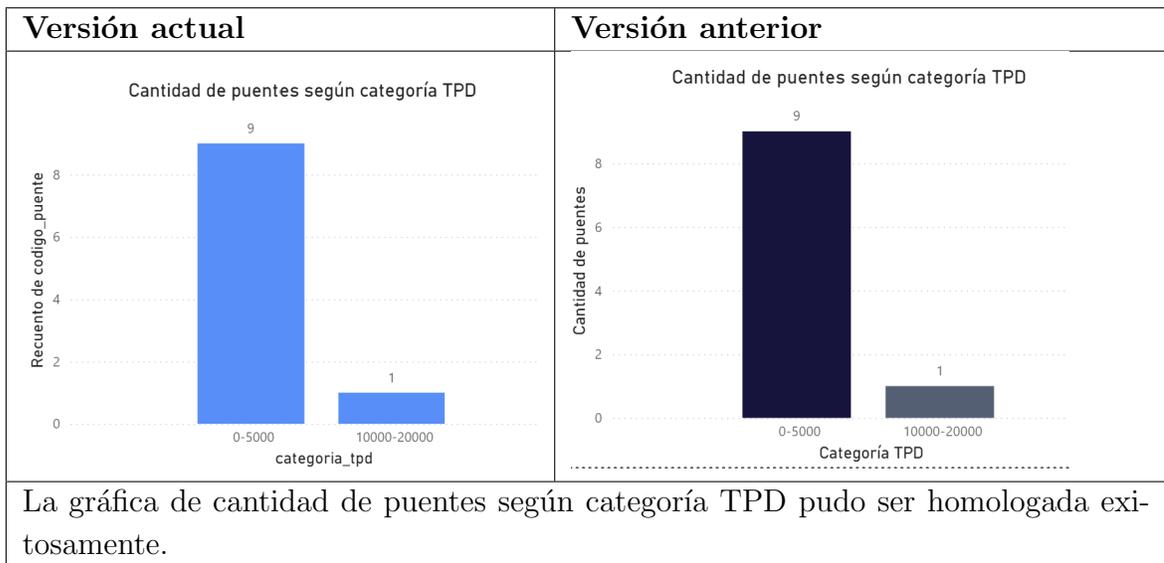
Cuadro 6.10: Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según carriles

El cuadro 6.11 muestra la comparativa de la visualización del gráfico de cantidad de puentes según tipo de ruta.



Cuadro 6.11: Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según tipo ruta

El cuadro 6.12 muestra la comparativa de la visualización del gráfico de cantidad de puentes según categoría TPD.



Cuadro 6.12: Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según categoría TPD

6.1.3. Intervención

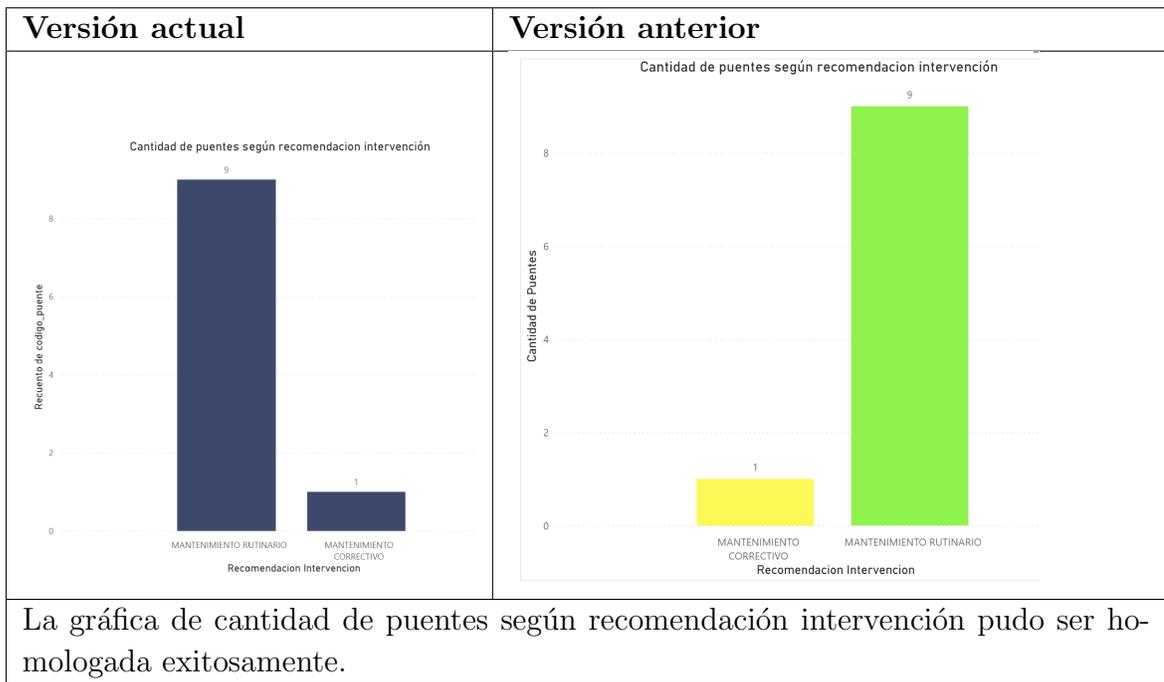
A continuación se muestra la comparación de las visualizaciones de la sección de intervención de la herramienta.

El cuadro 6.13 muestra la comparativa de la visualización del cuadro de costos preliminares y recomendación de intervención.

Versión actual	Versión anterior																																																																																																																														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Costos Preliminares y Recomendación de Intervención</th> </tr> <tr> <th>codigo_puente</th> <th>nombre_puente</th> <th>Costo Sustitución</th> <th>Costo Intervención</th> <th>% Costo Intervención / Costo Sustitución</th> <th>Recomendación Intervención</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P019</td> <td>Q. MONA</td> <td>\$2,017,333.357491343</td> <td>\$2,468,334.496919959</td> <td>122.36%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>G077</td> <td>RIO LAS VUELTAS</td> <td>\$1,358,333.045702238</td> <td>\$2,097,814.198874966</td> <td>154.45%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>P111</td> <td>QUEBRADA PIÑUELA</td> <td>\$1,187,892.576208745</td> <td>\$1,501,278.436022217</td> <td>126.38%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>P085</td> <td>RIO OLLA CINCO</td> <td>\$889,764.6394521481</td> <td>\$1,033,019.480576533</td> <td>116.10%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>L072</td> <td>RIO DESENREDO</td> <td>\$839,962.0577198067</td> <td>\$848,983.9210227502</td> <td>101.07%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>MGU001</td> <td>RIO PURIRES</td> <td>\$832,759.0300051019</td> <td>\$896,443.9876723018</td> <td>107.65%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>P044</td> <td>RIO LEPANTO</td> <td>\$606,607.2708178333</td> <td>\$770,651.4627831577</td> <td>95.57%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>L010</td> <td>QUESTERO MARGARITA</td> <td>\$612,500.1544369126</td> <td>\$882,257.5575234835</td> <td>144.04%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> </tbody> </table>	Costos Preliminares y Recomendación de Intervención						codigo_puente	nombre_puente	Costo Sustitución	Costo Intervención	% Costo Intervención / Costo Sustitución	Recomendación Intervención	P019	Q. MONA	\$2,017,333.357491343	\$2,468,334.496919959	122.36%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	G077	RIO LAS VUELTAS	\$1,358,333.045702238	\$2,097,814.198874966	154.45%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	P111	QUEBRADA PIÑUELA	\$1,187,892.576208745	\$1,501,278.436022217	126.38%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	P085	RIO OLLA CINCO	\$889,764.6394521481	\$1,033,019.480576533	116.10%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	L072	RIO DESENREDO	\$839,962.0577198067	\$848,983.9210227502	101.07%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	MGU001	RIO PURIRES	\$832,759.0300051019	\$896,443.9876723018	107.65%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	P044	RIO LEPANTO	\$606,607.2708178333	\$770,651.4627831577	95.57%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	L010	QUESTERO MARGARITA	\$612,500.1544369126	\$882,257.5575234835	144.04%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="6">Costos Preliminares y Recomendación de Intervención</th> </tr> <tr> <th>Código puente</th> <th>Nombre</th> <th>Costo Sustitución</th> <th>Costo Intervención</th> <th>%Intervención/Sustitución</th> <th>Recomendación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P019</td> <td>Q. MONA</td> <td>\$2,017,333.36</td> <td>\$134,727.61</td> <td>6.68%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>P044</td> <td>RIO LEPANTO</td> <td>\$805,607.27</td> <td>\$61,942.06</td> <td>7.68%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>MGU001</td> <td>RIO PURIRES</td> <td>\$832,767.12</td> <td>\$73,711.69</td> <td>8.85%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>P085</td> <td>RIO OLLA CINCO</td> <td>\$889,756.06</td> <td>\$79,217.77</td> <td>8.90%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>G077</td> <td>RIO LAS VUELTAS</td> <td>\$1,358,347.13</td> <td>\$166,209.22</td> <td>12.24%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>L010</td> <td>QUESTERO MARGARITA</td> <td>\$612,500.15</td> <td>\$81,811.65</td> <td>13.36%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>P111</td> <td>QUEBRADA PIÑUELA</td> <td>\$1,187,892.58</td> <td>\$161,851.35</td> <td>13.63%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>A347</td> <td>RIO CATARATITAS</td> <td>\$212,646.64</td> <td>\$44,589.75</td> <td>21.02%</td> <td>MANTENIMIENTO RUTINARIO</td> </tr> <tr> <td>G143</td> <td>RIO BEJUCO</td> <td>\$503,745.45</td> <td>\$168,191.79</td> <td>33.39%</td> <td>MANTENIMIENTO CORRECTIVO</td> </tr> </tbody> </table>	Costos Preliminares y Recomendación de Intervención						Código puente	Nombre	Costo Sustitución	Costo Intervención	%Intervención/Sustitución	Recomendación	P019	Q. MONA	\$2,017,333.36	\$134,727.61	6.68%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	P044	RIO LEPANTO	\$805,607.27	\$61,942.06	7.68%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	MGU001	RIO PURIRES	\$832,767.12	\$73,711.69	8.85%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	P085	RIO OLLA CINCO	\$889,756.06	\$79,217.77	8.90%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	G077	RIO LAS VUELTAS	\$1,358,347.13	\$166,209.22	12.24%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	L010	QUESTERO MARGARITA	\$612,500.15	\$81,811.65	13.36%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	P111	QUEBRADA PIÑUELA	\$1,187,892.58	\$161,851.35	13.63%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	A347	RIO CATARATITAS	\$212,646.64	\$44,589.75	21.02%	MANTENIMIENTO RUTINARIO	G143	RIO BEJUCO	\$503,745.45	\$168,191.79	33.39%	MANTENIMIENTO CORRECTIVO
Costos Preliminares y Recomendación de Intervención																																																																																																																															
codigo_puente	nombre_puente	Costo Sustitución	Costo Intervención	% Costo Intervención / Costo Sustitución	Recomendación Intervención																																																																																																																										
P019	Q. MONA	\$2,017,333.357491343	\$2,468,334.496919959	122.36%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
G077	RIO LAS VUELTAS	\$1,358,333.045702238	\$2,097,814.198874966	154.45%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
P111	QUEBRADA PIÑUELA	\$1,187,892.576208745	\$1,501,278.436022217	126.38%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
P085	RIO OLLA CINCO	\$889,764.6394521481	\$1,033,019.480576533	116.10%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
L072	RIO DESENREDO	\$839,962.0577198067	\$848,983.9210227502	101.07%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
MGU001	RIO PURIRES	\$832,759.0300051019	\$896,443.9876723018	107.65%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
P044	RIO LEPANTO	\$606,607.2708178333	\$770,651.4627831577	95.57%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
L010	QUESTERO MARGARITA	\$612,500.1544369126	\$882,257.5575234835	144.04%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
Costos Preliminares y Recomendación de Intervención																																																																																																																															
Código puente	Nombre	Costo Sustitución	Costo Intervención	%Intervención/Sustitución	Recomendación																																																																																																																										
P019	Q. MONA	\$2,017,333.36	\$134,727.61	6.68%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
P044	RIO LEPANTO	\$805,607.27	\$61,942.06	7.68%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
MGU001	RIO PURIRES	\$832,767.12	\$73,711.69	8.85%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
P085	RIO OLLA CINCO	\$889,756.06	\$79,217.77	8.90%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
G077	RIO LAS VUELTAS	\$1,358,347.13	\$166,209.22	12.24%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
L010	QUESTERO MARGARITA	\$612,500.15	\$81,811.65	13.36%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
P111	QUEBRADA PIÑUELA	\$1,187,892.58	\$161,851.35	13.63%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
A347	RIO CATARATITAS	\$212,646.64	\$44,589.75	21.02%	MANTENIMIENTO RUTINARIO																																																																																																																										
G143	RIO BEJUCO	\$503,745.45	\$168,191.79	33.39%	MANTENIMIENTO CORRECTIVO																																																																																																																										
<p>La tabla de costos preliminares y recomendación de intervención pudo ser homologada exitosamente.</p>																																																																																																																															

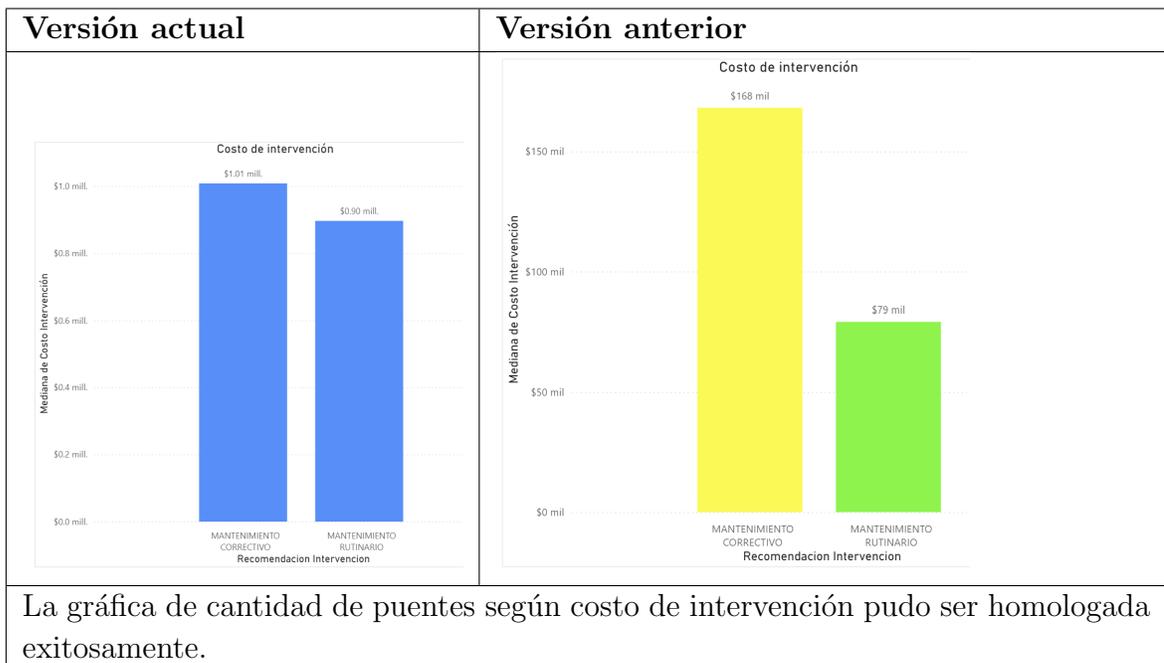
Cuadro 6.13: Comparativa de la tabla de costos preliminares y recomendación de intervención.

El cuadro 6.14 muestra la comparativa de la visualización del gráfico de cantidad de puentes según recomendación de intervención.



Cuadro 6.14: Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según recomendación de intervención.

El cuadro 6.15 muestra la comparativa de la visualización del gráfico de cantidad de puentes según costo de intervención.



Cuadro 6.15: Comparativa del gráfico de cantidad de puentes según costo de intervención.

6.1.4. Puentes

A continuación se muestra la comparación de las visualizaciones de la sección de puentes de la herramienta.

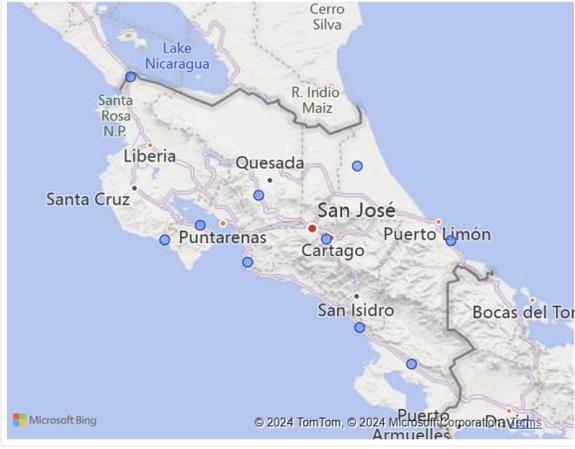
El cuadro 6.16 muestra la comparativa de la visualización del cuadro de información de puentes.

Versión actual							Versión anterior							
nombre_puente	material	tipo_estructura	numero_carriles	tipo_ruta	longitud_puente	tpd	Nombre	Material	Tipo de estructura	Número de ruta	Número de carriles	Tipo de ruta	Longitud del puente	TPD
Q. MONA	CONCRETO	VIGA SIMPLE	2.00	PRIMARIA	48.40	15,799.00	Q. MONA	CONCRETO	VIGA SIMPLE	34	2	PRIMARIA	48.40	15799
RIO LAS VUELTAS	ACERO	VIGA SIMPLE	2.00	PRIMARIA	45.73	2,213.00	Q. ESTERO MARGARITA	CONCRETO	VIGA SIMPLE	36	1	PRIMARIA	35.20	3123
RIO BEJUCO	ACERO	VIGA SIMPLE	1.00	SECUNDARIA	36.60	260.00	QUEBRADA PIÑUELA	CONCRETO	VIGA SIMPLE	34	2	PRIMARIA	28.50	3305
Q. ESTERO MARGARITA	CONCRETO	VIGA SIMPLE	1.00	PRIMARIA	35.20	3,123.00	RIO BEJUCO	ACERO	VIGA SIMPLE	160	1	SECUNDARIA	36.60	260
RIO OLLA CINCO	ACERO	VIGA SIMPLE	2.00	PRIMARIA	30.48	3,360.00	RIO CATARATITAS	ACERO	VIGA SIMPLE	702	1	TERCIARIA	15.45	3028
QUEBRADA PIÑUELA	CONCRETO	VIGA SIMPLE	2.00	PRIMARIA	28.50	3,305.00	RIO DESENREDO	CONCRETO	VIGA SIMPLE	247	2	SECUNDARIA	25.50	674
RIO DESENREDO	CONCRETO	VIGA SIMPLE	2.00	SECUNDARIA	25.50	674.00	RIO LAS VUELTAS	ACERO	VIGA SIMPLE	1	2	PRIMARIA	45.73	2213
RIO PURIRES	CONCRETO	VIGA SIMPLE	2.00	CANTONAL	21.80	800.00								

La tabla de información de puentes pudo ser homologada exitosamente.

Cuadro 6.16: Comparativa de la tabla de información de puentes.

El cuadro 6.17 muestra la comparativa de la visualización del mapa de ubicación de puentes en territorio nacional.

Versión actual	Versión anterior
<p>Ubicación</p> 	<p>Ubicación</p> 

La tabla y el mapa muestran que la ubicación del puente pudo ser homologada exitosamente.

Cuadro 6.17: Comparativa del mapa de la ubicación del puente.

6.1.5. Inspecciones

A continuación se muestra la comparación de las visualizaciones de la sección de inspecciones.

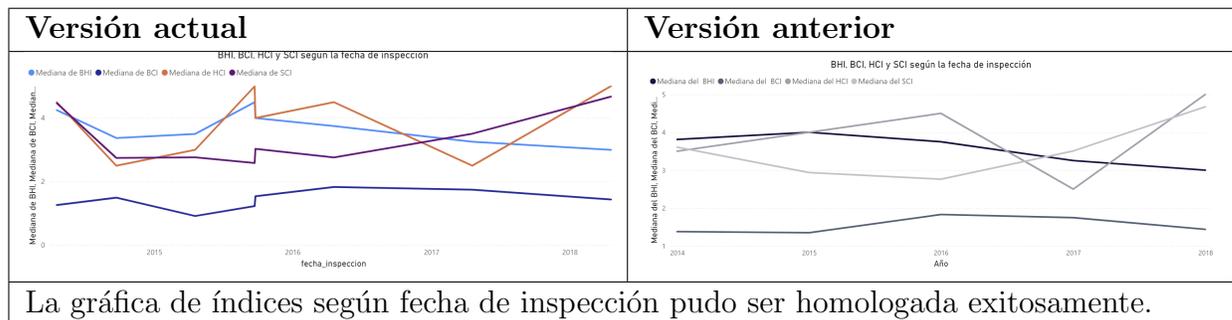
El cuadro 6.18 muestra la comparativa de la visualización del cuadro informativo de los puentes.

Versión actual								Versión anterior							
Detalles de inspección								Detalles de inspección							
codigo_puente	nombre_puente	provincia	canton	distrito	fecha_inspeccion	inspector	informe_puente	Código	Nombre puente	Provincia	Cantón	DISTRITO	Fecha de inspección	Inspector	Informe
A347	RIO CATARITAS	ALAJUELA	SAN RAMÓN	ÁNGELES	Wednesday, April 19, 2017	ALEJANDRO ALFARO	https://tecubel1-my.sharepoint.com/:wss/root?d=1	A347	RIO CATARITAS	ALAJUELA	SAN RAMÓN	ÁNGELES	10/23/2017	ALEJANDRO ALFARO	
G077	RIO LAS VUELTAS	GUANACASTE	LA CRUZ	LA CRUZ	Wednesday, April 19, 2017	ROLANDO PEREIRA	https://tecubel1-my.sharepoint.com/:wss/root?d=1	G077	RIO LAS VUELTAS	GUANACASTE	LA CRUZ	LA CRUZ	4/19/2017	ROLANDO PEREIRA	
G143	RIO BEJUCO	GUANACASTE	MANDAURE	BEJUCO	Tuesday, April 19, 2016	ROLANDO PEREIRA	https://tecubel1-my.sharepoint.com/:wss/root?d=1	G143	RIO BEJUCO	GUANACASTE	MANDAURE	BEJUCO	6/8/2016	ROLANDO PEREIRA	
L070	Q. ESTERO MARGARITA	LIMÓN	LIMÓN	ESTRELLA	Tuesday, September 23, 2014	ALEJANDRO ALFARO	https://tecubel1-my.sharepoint.com/:wss/root?d=1	L070	Q. ESTERO MARGARITA	LIMÓN	LIMÓN	ESTRELLA	10/26/2014	ALEJANDRO ALFARO	
L072	RIO DESENREDO	LIMÓN	POCOCI	CARIARI	Tuesday, April 19, 2016	ALEJANDRO ALFARO	https://tecubel1-my.sharepoint.com/:wss/root?d=1	L072	RIO DESENREDO	LIMÓN	POCOCI	CARIARI	11/1/2016	ALEJANDRO ALFARO	
MGU001	RIO PURIRES	CARTAGO	EL GUARCO	TOBOSI	Thursday, April 19, 2018	ANGEL NAVARRO	https://tecubel1-my.sharepoint.com/:wss/root?d=1	MGU001	RIO PURIRES	CARTAGO	EL GUARCO	TOBOSI	4/19/2018	ANGEL NAVARRO	
P019	Q. MONA	PUNTARENAS	GARABITO	JACÓ	Saturday, April 19, 2014	ANGEL NAVARRO	https://tecubel1-my.sharepoint.com/:wss/root?d=1	P019	Q. MONA	PUNTARENAS	GARABITO	JACÓ	8/25/2014	GIANNINA ORTIZ	
P044	RIO LEPANTO	PUNTARENAS	LEPANTO	LEPANTO	Wednesday, September 23, 2015	GIANNINA ORTIZ	https://tecubel1-my.sharepoint.com/:wss/root?d=1	P044	RIO LEPANTO	PUNTARENAS	PUNTARENAS	LEPANTO	9/23/2015	GIANNINA ORTIZ	
P085	RIO OLLA CINCO	PUNTARENAS	OSA	PIEDRAS BLANCAS	Sunday, April 19, 2015	ROLANDO PEREIRA	https://tecubel1-my.sharepoint.com/:wss/root?d=1	P085	RIO OLLA CINCO	PUNTARENAS	OSA	PIEDRAS BLANCAS	11/6/2015	ROLANDO PEREIRA	
P111	QUEBRADA PIÑUELA	PUNTARENAS	OSA	BAHIA BALLENA	Sunday, April 19, 2015	ROLANDO PEREIRA	https://tecubel1-my.sharepoint.com/:wss/root?d=1	P111	QUEBRADA PIÑUELA	PUNTARENAS	OSA	BAHIA BALLENA	9/25/2015	GIANNINA ORTIZ	

La tabla de información de puentes pudo ser homologada exitosamente.

Cuadro 6.18: Comparativa de la tabla de información de puentes.

El cuadro 6.19 muestra la comparativa de la visualización de la gráfica de índices según fecha de inspección.



La gráfica de índices según fecha de inspección pudo ser homologada exitosamente.

Cuadro 6.19: Comparativa de la gráfica de índices según fecha de inspección.

6.1.6. Resumen de resultados de la evaluación funcional

Como se evidenció anteriormente, la herramienta desarrollada arroja los mismos valores y resultados para todas las tablas y gráficas, lo que indica que la homologación de la funcionalidad se logró al 100 %. Esto, a su vez, indica que fue posible integrar completamente el modelo computacional propuesto en la investigación.

Es importante mencionar que las figuras presentan discrepancias en cuanto a tamaños, colores y detalles de la interfaz de usuario; sin embargo, esto no se considera relevante dentro de la propuesta actual. Además, cabe destacar que la herramienta de Power BI

permite una personalización flexible de la configuración de las visualizaciones, en caso de que se requiera alguna modificación.

6.2. Evaluación estadística

En esta subsección se realiza el análisis estadístico mediante el cálculo de Alfa de Cronbach [60] de los daños o indicadores utilizados para concebir el índice de condición estructural (BCI).

6.2.1. Consideraciones importantes

El Alfa de Cronbach fue introducido por primera vez por Lee J. Cronbach en 1951 y hoy en día es una herramienta ampliamente utilizada para evaluar la consistencia interna de una escala de múltiples ítem o de un cuestionario [61], en este caso la herramienta puede ser aplicada para evaluar los puentes y sus indicadores.

El valor de Alfa de Cronbach oscila entre 0 y 1, siendo 0 el valor más bajo posible y 1 el más alto. Un valor de 0 indica que no hay consistencia interna o confiabilidad en el cuestionario, mientras que un valor de 1 indica una consistencia interna perfecta [61]. Esta técnica se aplica a los indicadores dentro de cada grupo de indicadores (componentes) para determinar que todos los indicadores dentro de ese grupo son consistentes y tienden a medir efectivamente el criterio. A partir de los resultados, se espera que sea posible identificar indicadores que pueden eliminarse del cálculo del índice debido a que no muestran consistencia con los otros dentro del criterio, de manera que se pueda asegurar una mayor solidez y simplicidad en el proceso de cálculo. En [62] se utilizó esta técnica para medir la consistencia de indicadores en la aplicación de un índice bastante elaborado utilizado para ponderar una serie de criterios asociados a la experiencia de usuarios en sitios web. Dicho trabajo relacionado motivó la exploración de la aplicación de esa técnica para validar la consistencia de los indicadores que componen el índice de condición estructural de puentes utilizado en esta tesis.

El tamaño de la muestra recomendado según [63], una regla general es tener al menos 10 observaciones por ítem para determinar su confiabilidad. Esto significa que si tiene una escala con 10 ítem, debe apuntar a un tamaño de muestra mínimo de 100 observaciones para garantizar resultados confiables. Sin embargo, en [63] también se menciona que para una investigación preliminar, un tamaño de muestra más pequeño puede ser aceptable, donde el autor enfatiza que son preferibles muestras más grandes para llegar a conclusiones más definitivas. En esta investigación se pretende hacer el análisis y verificar si es posible obtener resultados confiables con las muestras actuales o si es necesario contar con más datos de puentes.

Respecto a la herramienta utilizada para realizar el análisis Alfa de Cronbach se integraron las bibliotecas Pingouin y Pandas de Python, además el método de cálculo utiliza por

defecto un intervalo de confianza de un 95 %.

A continuación se muestra el cuadro 6.20 para clasificar la consistencia según el valor de alfa.

Alfa de Cronbach	Consistencia interna
$\alpha \geq 0.9$	Excelente
$0.8 \leq \alpha < 0.9$	Buena
$0.7 \leq \alpha < 0.8$	Aceptable
$0.6 \leq \alpha < 0.7$	Cuestionable
$0.5 \leq \alpha < 0.6$	Pobre
$\alpha \leq 0.5$	Inaceptable

Cuadro 6.20: Clasificar la consistencia según el valor de alfa [61] .

La base de datos disponible actualmente contiene inspecciones de 10 puentes, sin embargo para el análisis de superestructuras y subestructuras no se pueden utilizar todos los datos pues existen indicadores que no se deben de considerar para todos los componentes, los mismo son identificados con valores de cero en la muestra, y la utilización de ceros en la muestra causaría problemas al calcular el valor del Alfa de Cronbach. El análisis se agrupa por componentes: accesorios, superestructuras y subestructuras, los resultados a continuación.

6.2.2. Accesorios

Para realizar el análisis en los accesorios se utiliza la muestra de 10 puentes (incluyendo los 4 tipos de puentes) con sus respectivos pesos y así evaluar la consistencia interna de los daños o indicadores para este grupo.

6.2.2.1. Análisis Alfa de Cronbach en daños

El análisis muestra un valor para Alfa de Cronbach de **0.2724913495** lo que indica que la consistencia interna es **inaceptable**.

6.2.2.2. Análisis si las variables son eliminadas

Debido a que el valor de alfa fue 0.27 para el grupo de accesorios y esto indica una consistencia interna inaceptable, se procede a realizar el análisis de si la variables (o daños) son eliminadas para evaluar si es posible mejorar la confiabilidad.

Al analizar el resultado, si las variables son eliminadas no se considera que sea posible mejorar la consistencia solamente eliminando indicadores, ya que para tener una consis-

tencia interna aceptable el alfa debería ser de al menos 0.7, y los resultados indican que no es posible llegar a ese valor. Además, el intervalo de confianza es muy amplio, lo que indica que puede haber un problema de precisión en el resultado.

6.2.3. Subestructura

Para el análisis de subestructuras se utilizan los datos de 4 puentes ya que solo los tipos 1 y 2 no contienen ceros en la muestra, los puentes tipo 3 y 4 se eliminaron porque tienen indicadores que no se utilizan por lo tanto en las inspecciones estas variables son puntaje de cero, y para el caso del análisis causaría problemas para que el resultado sea fiable.

6.2.3.1. Análisis Alfa de Cronbach en daños

Para el caso del análisis de subestructuras de puentes tipo 1 y 2 con datos de 4 puentes el resultado muestra que el valor del Alfa de Cronbach es **-0.5607091321** lo que indica que el análisis **no** da un resultado **fiable**.

Este resultado negativo podría darse por dos posibles razones: 1) porque hay problemas con la consistencia interna de los indicadores considerados para medir el constructo, 2) o bien es posible que la muestra de datos sea muy pequeña para poder obtener un valor alfa adecuado y por esta misma razón es probable que el intervalo de confianza sea amplio desde -6.094 a 0.963.

No se procede a realizar el análisis si las variables son eliminadas debido a que el valor de alfa no es fiable y además la muestra de datos ya es considerada muy pequeña.

6.2.4. Superestructura

Para el análisis de superestructuras se utilizan los datos de 5 puentes para los tipos 1 y 3 y se eliminan los daños correspondientes a elementos principales y secundarios de acero ya que no aplican y la muestra de datos contiene ceros. De forma similar se hace el análisis para 5 puentes de los tipo 2 y 4 y se eliminan los elementos principales y secundarios de concreto porque tienen indicadores que no se utilizan, por lo tanto en las inspecciones estas variables son puntaje de cero, y para el caso del análisis causaría problemas para que el resultado sea fiable.

6.2.4.1. Análisis Alfa de Cronbach en daños

Se realiza el análisis en dos grupos separados, primero se analizan los puentes tipo 1 y 3 y luego los puentes tipo 2 y 4.

6.2.4.1.1. Puentes tipo 1 y 3

Para el caso del análisis de superestructuras de puentes tipo 1 y 3 con datos de 5 puentes el resultado muestra que el valor del Alfa de Cronbach es **0.515503876**, lo que indica que la consistencia interna es **pobre**.

6.2.4.1.2. Puentes tipo 2 y 4

Para el caso del análisis de superestructuras para puentes tipo 2 y 4 con datos de 5 puentes el resultado muestra que el valor del Alfa de Cronbach es **0.922367126**, lo que indica que la consistencia interna es excelente. Además el intervalo de confianza es más reducido y va desde 0.78 a 0.99, lo que indica que el valor de alfa cuando mínimo puede ser **aceptable**.

6.2.4.2. Análisis si las variables son eliminadas

Para este análisis se toman en consideración solamente las superestructuras de los puentes tipo 1 y 3 ya que el grupo de puentes tipo 2 y 4 tuvo un valor alfa excelente. A continuación se muestra el resultado de evaluar si los indicadores (o daños) son eliminados.

Al eliminar 3 variables *Sup – LoC – Gr1*, *Sup – EPS – ES – Con – Gr1* y *Sup – EPS – EP – Con – Gr1* (respectivamente correspondientes a los indicadores losa de concreto, elementos secundarios de concreto, y elementos principales de concreto) se obtiene un resultado para el Alfa de Cronbach de **0.7350604491**, lo que indicaría que es suficiente para tener una consistencia interna **aceptable**.

6.2.5. Resumen de resultados del análisis

A manera de resumen en el cuadro 6.21 se muestran los resultados del análisis de Alfa de Cronbach, donde se consideran, tipo de puente, componente, el valor del alfa, y si las variables son eliminadas.

Tipo de puente	Componente	Consideraciones	Alfa de Cronbach	Si se eliminan variables
1,2,3,4	Accesorios	10 puentes	El valor es 0.27 y es inaceptable.	No se puede mejorar la consistencia para que sea aceptable solamente eliminando indicadores.
1,2	Subestructura	4 puentes, tipos 3 y 4 no considerados en el análisis porque martillo y pila contienen ceros en los datos.	El valor es -0.56 y no es fiable.	N/A, hay pocos datos para el análisis, el resultado del valor Alfa no es fiable.
1,3	Superestructura	5 puentes, no incluye elementos principales y secundarios de acero.	El valor es 0.51 y es pobre.	Eliminar 3 variables: losa de concreto y elementos principales y secundarios de concreto. Mejora el valor alfa a 0.73, lo que es suficiente para tener una consistencia interna aceptable.
2,4	Superestructura	5 puentes, no incluye elementos principales y secundarios de concreto.	El valor es 0.92 y es excelente.	N/A, la consistencia ya es excelente.

Cuadro 6.21: Resumen de resultados del análisis.

Como observación general se debe tratar de mejorar el Alfa de Cronbach, sin embargo, la recomendación es primero incrementar el tamaño de la base de datos a analizar, ya que en la literatura se recomienda al menos 30 observaciones, por lo que en el caso de la investigación actual se requiere cuando mínimo 30 puentes evaluados por inspectores y debidamente clasificados en los 4 tipos de puentes. Actualmente los resultados del análisis no son fiables debido que la mayor muestra de datos analizada ha sido de solamente 10 puentes, por esta razón es probable que los intervalos de confianza sean tan amplios y a

la vez la precisión de los cálculos del valor de Alfa de Cronbach no muestra resultados fiables.

Es importante resaltar que, la evaluación del constructo mediante una herramienta estadística, en este caso Alfa de Cronbach realmente puede ayudar a mejorar la consistencia y confiabilidad del índice. En este análisis el tamaño de la muestra es la principal limitante para la fiabilidad de los resultados del valor de Alfa. Cabe mencionar que el resultado de superestructura de puentes tipo 2 y 4, pese a que el análisis mostró un valor alfa de 0.92 lo cual se califica como excelente, según [64] podría indicar redundancia excesiva entre los ítem. Por lo tanto, se recomienda al grupo e-Bridge considerar la necesidad de disponer de más datos para obtener resultados más confiables en el análisis.

6.3. Evaluación con expertos

Esta subsección realiza la evaluación por medio de la opinión de expertos del grupo de investigadores e-Bridge con el fin de validar el resultado final de la investigación, incluyendo el diseño dimensional propuesto y la herramienta de visualizaciones.

Para medir la completitud y utilidad de la herramienta se realizó la presentación del prototipo a un grupo focal con 4 personas expertas en el tema de puentes, donde se muestran todas las funcionalidades y detalles. Luego se aplicó un instrumento tipo encuesta para obtener retroalimentación de los participantes. El diseño de los ítem de la encuesta se muestra a continuación.

6.3.1. Diseño de la encuesta

Los ítem definidos buscan evaluar la utilidad del producto final de la investigación en base a la opinión de expertos del grupo de investigación e-Bridge. La encuesta es evaluada del 1 al 5, donde los valores significan: 1) muy malo 2) malo 3) regular 4) bueno 5) excelente. A continuación se citan los ítem:

1. Correctitud funcional del prototipo: Evalúe si el prototipo cumple con las funciones que se esperaban, considerando su precisión y eficacia.
2. Nivel de mejora del prototipo con respecto a la versión anterior: Indique en qué medida considera que el prototipo actual ha mejorado en comparación con su versión previa.
3. Percepción del tiempo de respuesta de la aplicación: Proporcione su percepción sobre la rapidez de la aplicación, especialmente en cuanto a la carga de datos y la respuesta a acciones del usuario.

4. Visualizaciones intuitivas y fáciles de interpretar: Opine sobre la facilidad con la que puede interpretar las visualizaciones ofrecidas por la herramienta, y si estas son claras y comprensibles.
5. Innovación del modelo computacional desarrollado: Valore la novedad y originalidad del modelo computacional desarrollado, en términos de su aporte a la tecnología existente.
6. El modelo computacional propuesto apoya efectivamente la evaluación del índice de salud de puentes: Evalúe la efectividad del modelo computacional para apoyar la evaluación del estado de salud de los puentes.
7. Utilidad de la herramienta para instituciones relacionadas con la gestión de puentes: Evalúe si considera la herramienta práctica y útil para las instituciones encargadas del mantenimiento y gestión de puentes.
8. Importancia del Funcionalidad prototipo de Alfa de Cronbach para mejorar la confiabilidad del índice: Refleje la relevancia del uso del análisis de Alfa de Cronbach en la mejora de la confiabilidad de los índices de evaluación de puentes mencionados en la investigación.
9. Oportunidad para otras investigaciones o publicaciones: Opine sobre si la herramienta o los resultados generados en la investigación ofrecen oportunidades para futuras investigaciones o publicaciones en el campo.

6.3.2. Resultado de la encuesta

En la figura 6.1 se muestra el resultado de la encuesta, donde los ítem 1, 3 y 8 tienen una puntuación de un 75 % excelente y un 25 % bueno y corresponden respectivamente a la correctitud funcional del prototipo, la percepción del tiempo de respuesta de la aplicación, y la importancia del análisis estadístico de Alfa de Cronbach para mejorar la confiabilidad del índice. Por otra parte los restantes ítem fueron calificados con el 100 % excelente.

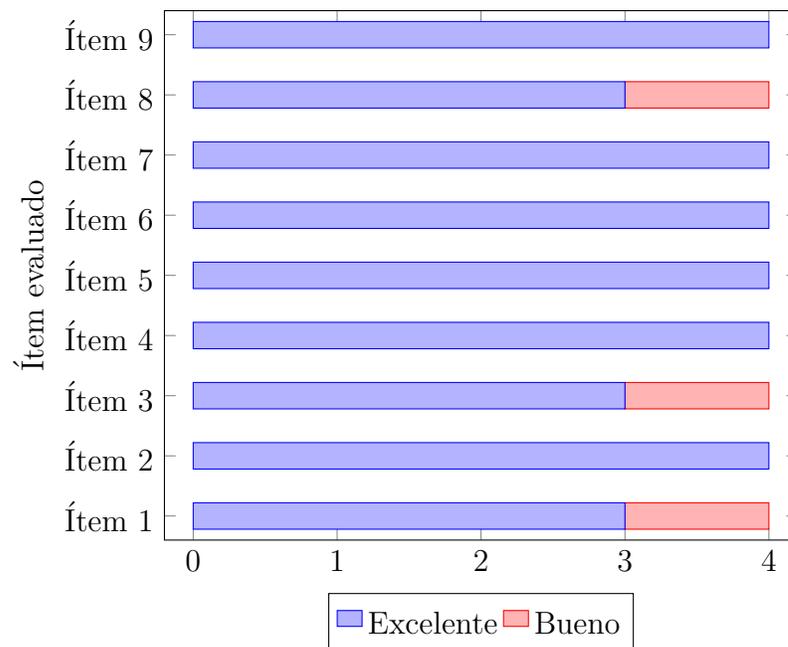


Figura 6.1: Resultados de la encuesta.

Los resultados obtenidos indican que la utilidad del producto final de la investigación es en general excelente, proporcionando entregables de valor para el grupo de investigación de e-Bridge. Además, se confirma que el modelo computacional propuesto apoya de manera efectiva la evaluación del índice de salud estructural (BHI) específico para las condiciones de los puentes en Costa Rica.

Capítulo 7

Conclusiones

Este capítulo recopila las conclusiones obtenidas al concluir la investigación, estructuradas en subsecciones que cubren desde el análisis del método de cálculo del índice y el diseño del modelo, hasta el desarrollo y la validación de la herramienta. Además, se incluyen apartados dedicados al trabajo futuro y comentarios finales sobre la propuesta.

7.1. Conclusiones sobre el análisis del método de cálculo del índice de salud

Estas conclusiones corresponden al capítulo 3 de análisis del método de cálculo del Índice de Salud Estructural de Puentes (BHI), que describe la conceptualización del índice.

- Como se muestra en el marco teórico, ya se cuenta con una serie de publicaciones y documentación elaborada por el grupo e-Bridge que han permitido conceptualizar el Índice de Salud Estructural de Puentes (BHI), así como las categorías, procesos y subíndices (BCI, SCI, HCI) necesarios para concebirlo. El enfoque de este capítulo 3 ha sido consolidar una sección que resuma y describa en detalle cómo fue concebido y diseñado el índice.
- Este capítulo también muestra las jerarquías consideradas para BHI y BCI, donde se diagraman los 12 indicadores considerados para el Índice de Salud Estructural de Puentes y los 72 indicadores contemplados en el Índice de Condición Estructural.
- Se finaliza con la explicación detallada de las formulas para calcular los subíndices de riesgo hidrométrico y sísmico, mencionados en distintas secciones del documento como HCI y SCI.

7.2. Conclusiones sobre el diseño del modelo de cálculo del índice de salud

Estas conclusiones corresponden al capítulo 4 del diseño del modelo de cálculo del Índice de Salud Estructural de Puentes (BHI), que describe la propuesta de arquitectura, el modelo dimensional y los diseños de algoritmos para conseguir los cálculos de los índices.

- En el capítulo 4 se describe una propuesta de arquitectura de data warehousing en relación con la infraestructura requerida para crear y hospedar el artefacto en la nube, ver sección 4.1.
- En esta investigación se creó una propuesta de diseño de modelado dimensional con diferencias significativas respecto a la versión anterior de e-Bridge BHI. Dichas modificaciones importantes se detallan en la sección 4.3.3.
- El pipeline o proceso de extracción, limpieza y carga de datos (comúnmente llamado ETL) es un prototipo realizado con una cuenta de Azure Data Factory. En la investigación actual, solo se propone el diseño de un ETL que incluye, como principal actividad o funcionalidad, el desarrollo de una Azure Functions en Python. El pseudocódigo está adjunto en el apéndice A.
- La base de datos y el pipeline pueden ser fácilmente migrados a otras tecnologías. El modelo dimensional de Power BI no está acoplado a una tecnología específica. Aunque en la investigación se mencionan PostgreSQL para el desarrollo del modelo y Python para la elaboración del ETL con la Azure Functions, las prácticas aplicadas al modelado y diseño facilitan la implementación en otras tecnologías.
- De este capítulo 4 se destaca como innovadora la aplicación de inteligencia de negocios para dar solución a un problema que originalmente no se había tratado con una herramienta similar. Cabe mencionar que el uso de computación en la nube para diseñar la arquitectura de BI, resolver el procesamiento complejo del ETL mediante una Azure Functions y hospedar el modelo dimensional son aspectos novedosos que se mencionaron.
- Los datos de inspecciones no se detallan en el documento debido a su gran volumen. Sin embargo, toda la información utilizada y los recursos generados para crear la propuesta han sido documentados y están a disposición del grupo e-Bridge en sus repositorios.
- En este capítulo se encuentra también una serie de diagramas creados para dar solución detallada a los algoritmos que permiten calcular el índice BHI y los subíndices necesarios.

7.3. Conclusiones sobre desarrollo de la herramienta

Estas conclusiones corresponden al capítulo 5 del desarrollo de la herramienta, que describe el prototipo realizado.

- El enfoque principal de esta herramienta fue integrar el modelo dimensional a una herramienta previamente desarrollada en Power BI por el grupo de investigación e-Bridge. El principal reto en este capítulo 5 fue homologar todas las visualizaciones de la herramienta anterior. Cabe mencionar que fue necesario invertir trabajo en la reescritura de medidas y columnas calculadas mediante el uso de DAX para poder obtener los cálculos de los distintos índices. Para más detalle, ver sección 5.1.
- Una de las principales novedades en este capítulo fue la creación de nuevas visualizaciones, como por ejemplo la jerarquía del BCI, que permite ver en forma de árbol cómo se originó el BCI, explorando los valores en forma dinámica por componentes, elementos e indicadores.
- El desempeño de la aplicación en relación a los cálculos realizados en el lenguaje DAX de Power BI no puede ser evaluado debido a la escasa cantidad de datos de puentes disponibles. Sin embargo, en la implementación del modelo dimensional se aplican buenas practicas de diseño siguiendo reglas de data warehousing de Kimball, y en los DAX mas complejos se aplican técnicas para evitar el filtrado innecesario de tablas. Actualmente, se cuenta con 10 inspecciones válidas de puentes, lo cual no presenta problemas para las visualizaciones de la herramienta.

7.4. Conclusiones sobre validación y pruebas

Estas conclusiones corresponden al capítulo 6 de validación y pruebas.

- En este capítulo se valida la funcionalidad y completitud de la investigación mediante una subsección que evidencia la homologación de todas las visualizaciones de la herramienta, logrando así una implementación completa del alcance planeado.
- Respecto a la subsección del análisis estadístico para la evaluación de la fiabilidad de los indicadores o daños, se aplicó el Alfa de Cronbach únicamente a los cálculos del Índice de Condición Estructural de Puentes (BCI). Esto se debe a que el patrón de los datos no permitió incluir el análisis del Índice de Salud de Puentes (BHI) ni considerar los indicadores relacionados con los riesgos hidrometeorológicos y sísmicos.
- Los resultados del análisis del Alfa de Cronbach no se consideran fiables debido al tamaño reducido de la muestra de datos, ya que actualmente solo se dispone de 10 puentes para los cuatro tipos considerados. Este detalle se presenta en el resumen

del análisis de evaluación estadística en la sección 6.2.5. Se recomienda realizar el análisis con al menos 30 puentes para cada tipo, ya que 30 es la muestra mínima recomendada para obtener resultados fiables en el análisis del Alfa de Cronbach.

- El capítulo 6 concluye con un resumen del análisis del Alfa de Cronbach, que incluye una tabla con los detalles de los resultados y consideraciones, así como comentarios generales, disponible en la sección 6.2.5.
- Es importante destacar que una de las validaciones más significativas es la validación por expertos. Esta, se llevó a cabo mediante una presentación a un grupo focal conformado por cuatro investigadores del grupo e-Bridge. Al finalizar, se realizó una encuesta para certificar el valor de los entregables de la investigación, descrita en la sección 6.3.

7.5. Trabajo futuro

Esta subsección contiene la descripción de posible trabajo futuro que ha sido excluido del alcance de la investigación actual de tesis.

- **Integración de datos de riesgo hidrometeorológico y sísmico con la jerarquía:** Una mejora significativa al modelo propuesto sería ajustar y armonizar los datos de riesgo hidrometeorológico y sísmico con el patrón de datos estructurales. Esta integración permitiría una visualización completa de la jerarquía del Índice de Salud Estructural de Puentes (BHI), similar a la jerarquía del cálculo del Índice de Condición Estructural de Puentes (BCI), pero incluyendo todos los indicadores relevantes en la visualización.
- **Uso de tecnologías avanzadas para el manejo y análisis de datos:** Con la diversidad de tecnologías disponibles actualmente, se podría considerar una nueva propuesta para el análisis de datos que emplee bases de datos NoSQL y soluciones en la nube. Este enfoque, aunque es costoso debido al almacenamiento y procesamiento en la nube, ofrece una alternativa al modelado dimensional tradicional y podría proporcionar mayor flexibilidad y escalabilidad. Sin embargo, es crucial tener en cuenta que se aparta de los estándares tecnológicos y herramientas utilizadas por el grupo de investigación e-Bridge.
- **Control de históricos de archivos de inspección:** Una mejora funcional viable para la herramienta desarrollada sería la implementación de un sistema de control de históricos o versiones para los archivos de inspección. Esta funcionalidad facilitaría la actualización y recarga de datos, permitiendo la eliminación de datos duplicados y la corrección de errores mediante la recarga del archivo de inspección original.
- **Extensión del proceso de cargas de datos:** En la propuesta actual, no se contempla la creación de procesos de extracción, transformación y carga de datos

(ETL) para las tablas de información de puentes, dimensión tiempo y dimensión de pesos de indicadores, dado que estas tablas pueden ser cargadas fácilmente mediante scripts SQL. Estos scripts se incluyen como parte de los entregables de la propuesta.

- **Continuidad del Azure Functions:** En la propuesta actual, se desarrolló el diseño de una Azure Functions para realizar el proceso de extracción, transformación y carga de los datos de inspecciones (ETL) utilizando Python. Como trabajo futuro, completar y perfeccionar este aplicativo es una tarea crucial para lograr la automatización completa de la herramienta. Este desarrollo permitirá optimizar el procesamiento de datos y asegurar una mayor eficiencia en la gestión de información. Ver sección 4.2.3 y apéndices.
- **Ampliación del análisis estadístico:** En la propuesta actual, se realizó el análisis estadístico solamente para los indicadores y componentes consideradas para calcular el BCI, una vez que se obtengan muestras de datos más grandes es posible considerar realizar el análisis sobre todos los componentes utilizados para concebir el BHI.
- **Ejecución de pruebas de estrés en la herramienta y el modelo dimensional:** Las pruebas de estrés no se incluyeron en este trabajo de tesis debido a la limitada cantidad de datos de puentes disponibles. Para futuras investigaciones, una vez que se disponga de un volumen adecuado de datos, se recomienda realizar pruebas de desempeño con grandes cantidades de datos. Estas pruebas permitirán evaluar no solo la robustez y eficiencia del modelo dimensional desarrollado en Power BI, sino también la aplicación de técnicas avanzadas para la optimización de bases de datos. Entre las técnicas que podrían explorarse están la indexación avanzada, caching de consultas, segmentación de tablas, por mencionar algunas.

7.6. Comentarios finales

Esta subsección contiene comentarios finales que muestran cómo se alcanzaron con éxito los objetivos planteados, demostrando la validez y utilidad del modelo computacional propuesto para apoyar el cálculo del Índice de Salud Estructural de Puentes en Costa Rica.

- El modelo computacional, también referido como modelo dimensional o modelo de inteligencia de negocios, fue diseñado en el capítulo 4 e integrado exitosamente con la herramienta en el capítulo 5. Esto confirma el cumplimiento del objetivo general de diseñar un modelo que apoye el cálculo del índice de salud estructural de puentes.
- En el capítulo 3 se realizó un exhaustivo resumen de artículos y documentación sobre métodos para calcular los distintos subíndices que componen el Índice de Salud Estructural de Puentes (BHI). Este análisis permitió cumplir el objetivo específico de analizar el método propuesto para el cálculo del índice.

- El capítulo 4 presentó el diseño de los algoritmos necesarios para calcular los subíndices del BHI, representados a través de diagramas. Esto permitió cumplir el objetivo específico de diseñar el algoritmo y el modelo de datos que respaldan el cálculo del índice.
- En el capítulo 5, se describe el desarrollo de una nueva versión de la herramienta que integra el modelo dimensional y realiza cálculos de diversos índices (BHI, BCI, HCI, SCI) utilizando DAX en Power BI. Este desarrollo evidenció el cumplimiento del objetivo específico de crear un prototipo de herramienta para apoyar el cálculo del índice.
- El capítulo 6 documenta la homologación completa de la funcionalidad de la herramienta y la integración exitosa del modelo dimensional. El análisis estadístico realizado permitió una primera versión del análisis de fiabilidad de los componentes e indicadores del Índice de Condición Estructural de Puentes (BCI), mostrando su utilidad para futuras investigaciones del grupo e-Bridge. Además, la evaluación realizada por expertos validó el valor del artefacto para el grupo de investigación, cumpliendo así con el objetivo específico de validar el prototipo desarrollado.
- Finalmente, el modelo de inteligencia de negocios, la herramienta desarrollada y sus resultados permitió apoyar efectivamente la evaluación del Índice de Salud Estructural de Puentes (BHI). La presentación de la herramienta y sus entregables al grupo de investigación e-Bridge evidenció el cumplimiento de la hipótesis planteada, demostrando que el modelo computacional propuesto es eficaz para la evaluación de un índice de salud estructural específico para las condiciones de los puentes en Costa Rica.

Bibliografía

- [1] A. R. Hevner, S. T. March, J. Park y S. Ram, «Design Science In Information System Research,» *Management Information Systems Quarterly*, vol. 28, págs. 75-105, mar. de 2004. DOI: [10.2307/25148625](https://doi.org/10.2307/25148625).
- [2] G. Ortiz Quesada, «Inventario de puentes en rutas nacionales de Costa Rica,» TEC, inf. téc., 2019, Informe presentado a Conavi y MOPT, disponible en el Tecnológico de Costa Rica. dirección: <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2019/07/18/tecnologico-presento-informe-estado-puentes-pais>.
- [3] G. Ortiz, «e-Bridge: Predicción remota de fallas en puentes,» TEC, Informe técnico, ene. de 2013. dirección: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga_tec/article/view/695.
- [4] C. Garita y G. Ortiz, «e-Bridge 3.0: A Strategic Approach to Structural Health Monitoring of Bridges in Costa Rica,» en *ICT for Promoting Human Development and Protecting the Environment*, F. Mata y A. Pont, eds., ép. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 481, Springer International Publishing, 2016, págs. 205-210, ISBN: 978-3-319-44447-5. DOI: [10.1007/978-3-319-44447-5_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-44447-5_19).
- [5] M. P. Limongelli, A. Orcesi y A. Vidovic, *The Indicator Readiness Level for the classification of Research Performance Indicators for road bridges*. CRC Press, 2018, págs. 1779-1786, ISBN: 9781315228914.
- [6] B. Glisic y D. Inaudi, *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. John Wiley y Sons, nov. de 2007, págs. 1-262, ISBN: 9780470061428. DOI: [10.1002/9780470517819](https://doi.org/10.1002/9780470517819).
- [7] G. Ortiz, C. Garita y A. Navarro, «Propuesta de un índice de salud estructural para puentes (BHI) para Costa Rica,» TEC, inf. téc., 2020.
- [8] G. Ortiz y C. Garita, «The e-Bridge 2.0 Approach for SHM of Bridges in Costa Rica,» en *Proceedings of the Tenth International Workshop on Structural Health Monitoring*, International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Stanford University, California, 2015. DOI: [10.12783/SHM2015/205](https://doi.org/10.12783/SHM2015/205).

- [9] C. Garita y G. Ortiz, «Towards a Workflow Management Approach for Health Monitoring of Bridges,» en *Collaborative Systems for Smart Networked Environments*, L. M. Camarinha-Matos y H. Afsarmanesh, eds., ép. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 434, Amsterdam, The Netherlands: Springer, oct. de 2014, págs. 489-497, ISBN: 978-3-662-44744-4. DOI: [10.1007/978-3-662-44745-1_49](https://doi.org/10.1007/978-3-662-44745-1_49).
- [10] J. Hooks y D. Frangopol, *LTBP bridge performance primer U.S. Bridge Conditions and Long-Term Bridge Performance*, Rutgers University. Center for Advanced Infrastructure and Transportation, 2013. dirección: <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/26946>.
- [11] C. Garita y G. Ortiz, «Development of a Business Intelligence Prototype for Bridge Health Monitoring,» en *IEEE International Conference on Information Systems and Computer Science (INCISCOS)*, IEEE, Quito, Ecuador, nov. de 2018, págs. 337-342, ISBN: 978-1-5386-7612-7. DOI: [10.1109/INCISCOS.2018.00055](https://doi.org/10.1109/INCISCOS.2018.00055).
- [12] K. Schwab. «The Global Competitiveness Report.» (2019), dirección: <https://www.weforum.org/publications/global-competitiveness-report-2019>.
- [13] J. U. Venegas. «Estado de puentes del país genera preocupación a especialistas.» (oct. de 2018), dirección: <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2018/10/19/estado-puentes-pais-genera-preocupacion-especialistas>.
- [14] A. Obando y C. Garita, «Diseño General de una Red Inalámbrica para Monitoreo de Salud de Puentes,» en *Proceedings of the XXXIV Convención IEEE de Estudiantes de Centroamérica y Panamá (CONESCAPAN XXXIV)*, In Convención IEEE de Estudiantes de Centroamérica y Panamá - CONESCAPAN XXXIV, number 655, San Salvador, El Salvador, sep. de 2015.
- [15] A. Ruiz-Barquero, C. Garita y G. Ortiz, «Collaborative Sensors Networks for Structural Health Monitoring of Bridges in Costa Rica,» en *Proceedings of the 2020 46th Latin American Computing Conference, CLEI 2020*, XLVI Conferencia Latinoamericana de Informática - CLEI, Ecuador, Institute of Electrical y Electronics Engineers Inc., oct. de 2020, págs. 417-426, ISBN: 9780738130644. DOI: [10.1109/CLEI52000.2020.00055](https://doi.org/10.1109/CLEI52000.2020.00055).
- [16] A. Ruiz-Barquero, «Diseño de redes de sensores colaborativas para monitorización de salud estructural de puentes,» Tesis de maestría., TEC, Cartago, Costa Rica, sep. de 2019. dirección: <https://hdl.handle.net/2238/10700>.
- [17] P. Malhotra, Y. Singh, P. Anand, D. Bangotra, P. Singh y W.-C. Hong, «Internet of Things: Evolution, Concerns and Security Challenges,» *Sensors*, vol. 21, pág. 1809, mar. de 2021. DOI: [10.3390/s21051809](https://doi.org/10.3390/s21051809).
- [18] R. V. Rao, S. Khatir y T. Cuong-Le, eds., *Recent Advances in Structural Health Monitoring and Engineering Structures*, ép. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer Singapore, 2023, ISBN: 978-981-97-0399-9. DOI: [10.1007/978-981-97-0399-9](https://doi.org/10.1007/978-981-97-0399-9).

- [19] Y. Adu-Gyamfi, S. Chase, A. Aktan y Minaie, «Synthesis of National and International Methodologies Used for Bridge Health Indices,» Federal Highway Administration, Washington, DC, inf. téc., jun. de 2016. DOI: [10.13140/RG.2.1.1558.1683](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1558.1683).
- [20] C. Zhang, «A Comparison among Three Bridge Performance Measures for Allocating Funds,» Tesis de mtría., The Ohio State University, Columbus, OH, USA, 2018. dirección: http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osu1525735529560811.
- [21] M. P. Limongelli, E. Chatzi y A. Anžlin, «Condition Assessment of Roadway Bridges: From Performance Parameters to Performance Goals,» *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, vol. 13, págs. 345-356, dic. de 2018. DOI: [10.7250/bjrbe.2018-13.421](https://doi.org/10.7250/bjrbe.2018-13.421).
- [22] O. Giannina, C. Garita, A. Navarro, G. Paez y A. Alfaro, «Propuesta de un índice de salud estructural para puentes (BHI) para Costa Rica - Documento OE-03- Aplicación índice,» TEC, Informe técnico, jun. de 2021.
- [23] C. Garita, «Enfoques de integración de información para sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes,» *Tecnología en Marcha*, vol. 29, pág. 96, abr. de 2016. DOI: [10.18845/tm.v29i1.2542](https://doi.org/10.18845/tm.v29i1.2542).
- [24] H. Wenzel, R. Veit-Egerer y P. Furtner, «Standardization of vibration based condition indicators for structural health monitoring and life cycle engineering,» en *Life-Cycle of Structural Systems: Design, Assessment, Maintenance and Management*, nov. de 2014. DOI: [10.1201/b17618-14](https://doi.org/10.1201/b17618-14).
- [25] R. Kimball y M. Ross, *The Data Warehouse Toolkit: The Definitive Guide to Dimensional Modeling*, 3.^a ed. Wiley Publishing, 2013, ISBN: 1118530802.
- [26] Data-warehouse-guide, *Data warehouse architecture traditional vs cloud*, Accesado: 14.04.2023. dirección: <https://panoply.io/data-warehouse-guide/data-warehouse-architecture-traditional-vs-cloud/>.
- [27] AWS, *Data Warehouse System Architecture*, Accesado: 14.04.2023. dirección: https://docs.aws.amazon.com/redshift/latest/dg/c_high_level_system_architecture.html.
- [28] Google, *An Inside Look at Google BigQuery*, Accesado: 14.04.2023, 2021. dirección: <https://cloud.google.com/files/BigQueryTechnicalWP.pdf>.
- [29] C. Howson, *Successful Business Intelligence - Unlock the Value of BI And Big Data*. McGraw Hill Professional, 2014.
- [30] UNIR, *7 herramientas de Business Intelligence indispensables*, 2020. dirección: <https://www.unir.net/ingenieria/revista/herramientas-business-intelligence/>.
- [31] Tableau, *Tableau Business Intelligence Tool*, 2021. dirección: <https://www.tableau.com>.
- [32] SAP, *SAP Business Analytics Solutions And BI Tools*, 2021. dirección: <https://www.sap.com/products/analytics.html>.

- [33] H. Vantara, *Pentaho Visualization BI Tool*, 2021. dirección: <https://www.hitachivantara.com/en-us/solutions/data-management/data-engineering-business-intelligence.html>.
- [34] Oracle, *Oracle Business Intelligence*, 2021. dirección: <https://www.oracle.com/business-analytics/business-intelligence/>.
- [35] Microsoft. «Power BI.» Accesado: 14.04.2024. (2024), dirección: www.microsoft.com/en-us/power-platform/products/power-bi.
- [36] Gartner, *Gartner Magic Quadrant for Analytics and Business Intelligence Platforms*, 2021. dirección: <https://www.gartner.com/en/documents/2020/3980852-magic-quadrant-for-meeting-solutions>.
- [37] G. Ortiz-Quesada, C. Garita-Rodríguez, A. Navarro-Mora y G. Paez, «Propuesta de un índice de salud estructural para puentes (BHI) para Costa Rica - Documento OE-01-Comparación de metodologías,» TEC, Informe técnico, 2020.
- [38] G. Ortiz, C. Garita, A. Navarro-Mora y G. Paez, «Propuesta de un índice de salud estructural para puentes (BHI) para Costa Rica - Documento OE-02-Desarrollo índice,» TEC, Informe técnico, 2021.
- [39] G. Ortiz-Quesada, C. Garita-Rodríguez, A. Navarro y G. Paez, «Indicators for Bridge Actions Prioritization,» *Tecnología en marcha*, 2021. DOI: [10.18845/tm.v34i3.5120](https://doi.org/10.18845/tm.v34i3.5120).
- [40] C. Garita y G. Ortiz, «A Business Intelligence Approach to Prioritize Bridge Maintenance Activities,» 2022, 10th European Workshop on Structural Health Monitoring - EWSHM 2022, Palermo, Italy. DOI: [10.12783/shm2021/36245](https://doi.org/10.12783/shm2021/36245).
- [41] C. Garita, G. Ortiz y J. Mora-Mora, «Análisis de requerimientos para un sistema nacional de monitoreo de puentes,» *Revista Tecnología en Marcha*, vol. 31, oct. de 2018. DOI: [10.18845/tm.v31i4.3965](https://doi.org/10.18845/tm.v31i4.3965).
- [42] M. C. Abarca, A. R. Barquero, C. Garita y G. Ortiz, *Preliminary Design of a Low-cost Water Level Monitoring System for Bridges*, 2018. DOI: [10.1109/CONCAPAN.2018.8596666](https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2018.8596666).
- [43] C. Garita y G. Ortiz, «The e-Bridge Project Approach for SHM of Bridges in Costa Rica: Maintenance Bridge Tools,» 2017, 7th Workshop on Civil Structural Health Monitoring - CSHM-7 2017, Medellín, Colombia, 2017, pp. 187-193.
- [44] M. Gutiérrez y C. Garita, *Prototype development of a wireless embedded system for bridge monitoring*, 2017. DOI: [10.1109/CONCAPAN.2017.8278482](https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2017.8278482).
- [45] C. Garita y G. Ortiz, *Integrando Información Estratégica para Monitoreo de Puentes Nacionales*, III Jornadas Costarricenses de Investigación en Computación e Informática, 2017. dirección: <http://hdl.handle.net/2238/13119>.

- [46] O. Giannina, G. Cesar, A. Navarro-Mora, G. Paez-González y A. Alfaro-Acuña, «Diseño de un índice de salud estructural de puentes para priorización de intervenciones técnicas en Costa Rica,» *Revista Tecnología en Marcha*, n.º 2, págs. 144-154, abr. de 2024. DOI: [10.18845/tm.v37i2.6718](https://doi.org/10.18845/tm.v37i2.6718). dirección: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/6718.
- [47] R. Cespedes-Deliyore, A. Ruiz-Barquero, C. Garita y G. Ortiz, «General Design of a Power-Saving Strategy for a Collaborative Wireless Sensor Network,» en *2022 IEEE 40th Central America and Panama Convention (CONCAPAN)*, 2022, págs. 1-6. DOI: [10.1109/CONCAPAN48024.2022.9997731](https://doi.org/10.1109/CONCAPAN48024.2022.9997731).
- [48] R. S. Cespedes-Deliyore, «Design of a power-saving strategy for a collaborative wireless sensor network of multi-core embedded systems,» Tesis de mtría., TEC, Cartago, Costa Rica, sep. de 2022. dirección: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/14071>.
- [49] MOPT. «Manual de Inspección de Puentes.» (2007), dirección: <https://www.scribd.com/doc/193801531/Manual-de-Inspeccion-de-Puentes-MOPT>.
- [50] H. Linstone y M. Turoff, «The Delphi Method: Techniques and Applications,» *Technometrics*, vol. 18, ene. de 1975. DOI: [10.2307/3150755](https://doi.org/10.2307/3150755).
- [51] e-Bridge, «Documentación del desarrollo de la herramienta prototipo de apoyo a cálculo del índice BHI - Version 1.0,» TEC, inf. téc., 2021.
- [52] Microsoft. «Azure Microsoft.» Accesado: 14.04.2024. (2024), dirección: <https://azure.microsoft.com>.
- [53] M. Ross. «Reglas esenciales del modelado dimensional.» (2009), dirección: <https://datawarehouse.es/2009/los-10-mandamientos-de-kimball.html>.
- [54] PostgreSQL-Global-Development-Group. «Postgresql.org.» Accesado: 14.04.2024. (2024), dirección: www.postgresql.org.
- [55] Free-Software-Foundation. «pgAdmin.org.» Accesado: 14.04.2024. (2024), dirección: www.pgadmin.org.
- [56] Microsoft. «Azure Data Factory.» Accesado: 14.04.2024. (2024), dirección: <https://azure.microsoft.com/en-us/products/data-factory>.
- [57] Microsoft-Corporation. «Azure Functions.» Accesado: 14.04.2024. (2024), dirección: <https://azure.microsoft.com/en-us/products/functions>.
- [58] Python-Software-Foundation. «Python.org.» Accesado: 14.04.2024. (2024), dirección: www.python.org.
- [59] Microsoft. «DAX.» Accesado: 25.04.2024. (2024), dirección: <https://learn.microsoft.com/en-us/dax>.
- [60] L. Cronbach, «Coefficient alpha and the internal structure of tests,» *Psychometrika*, vol. 16, págs. 297-334, sep. de 1951. DOI: [10.1007/BF02310555](https://doi.org/10.1007/BF02310555).
- [61] uedufy. «uedufy.» Accesado: 1.06.2024. (2024), dirección: <https://uedufy.com/how-to-calculate-cronbachs-alpha-in-excel/>.

-
- [62] D. Zamora y J. C. Barahona, «Índice de Experiencia Pública Digital,» INCAE, inf. téc., 2019, pág. 492.
- [63] D. Frías-Navarro, «Apuntes de estimación de la fiabilidad de consistencia interna de los ítems de un instrumento de medida,» Universidad de Valencia. España, inf. téc., 2022. dirección: <https://www.uv.es/friasnav/AlfaCronbach.pdf>.
- [64] J. M. Cortina, «What is coefficient alpha? An examination of theory and applications,» *Journal of Applied Psychology*, vol. 78, n.º 1, págs. 98-104, 1993. DOI: [10.1037/0021-9010.78.1.98](https://doi.org/10.1037/0021-9010.78.1.98).

Apéndice A

Azure Functions para ETL de inspecciones

A.1. Pseudocódigo en Python para ETL de procesamiento de inspecciones

Pseudocódigo en Python para crear la Azure Functions, el objetivo del código es ejemplificar la obtención del archivo de inspecciones, mostrar que es posible ejecutar un pipeline desde Azure Data Factory y realizar el procesamiento necesario, así como la limpieza y carga de datos en las tablas del modelo de BI. Una Azure Functions es una aplicación de tipo actividad en un lenguaje seleccionado que regresa estados, se retorna un código de estado 200 para denotar que el aplicativo ha procesado los datos exitosamente, en caso contrario se retorna del código 500 para el caso de error.

```
import logging
import azure.functions as func
import pandas as pd
from azure.storage.blob import BlobServiceClient

def procesarInspecciones(req: func.HttpRequest) -> func.HttpResponse:
    logging.info('La funcion procesarInspecciones proceso una solicitud HTTP.')

    # Conexion al almacen de archivos de azure
    blob_connection_string = "storageconstring"

    # Direccion del archivo Excel
    file_path = "dataloaf/inspecciones.xls"

    # Conexion a la base de datos
    sql_connection_string = "sqlconstring"
```

```
try:
    # Conectarse a Azure Storage Blob
    blob_service_client =
        BlobServiceClient.from_connection_string(blob_connection_string)
    blob_client =
        blob_service_client.get_blob_client(container="fileload",
            blob=file_path)

    # Descargar el archivo Excel del almacen de azure
    with open("inspecciones.xlsx", "wb") as download_file:
        download_file.write(blob_client.download_blob().readall())

    # Leer el archivo
    df = pd.read_excel("inspecciones.xlsx")

    # Realizar transformacion y limpieza de datos
    # Insertar en tabla hechos inspecciones
    # Insertar en tabla riesgo sismico
    # Insertar en tabla riesgo hidrometeorologico
    # Sincronizar tabla de hechos calculos indices
    # Conectar base de datos postgresql y Azure para ejecutar sentencias
    sql

    # Una vez que la inversion de datos este completa enviar mensaje de
    # procesado exitosamente
    return func.HttpResponse("Datos procesados exitosamente.",
        status_code=200)

    # En caso contrario enviar mensaje de error
except Exception as e:
    logging.error(f"Ocurrio un error: {e}")
    return func.HttpResponse(f"Ocurrio un error: {e}", status_code=500)
```

Código A.1: Pseudocódigo en Python para procesamiento de inspecciones

A.2. Repositorio con los fuentes para crear una Azure Functions

Para clonar los fuentes con los objetos para crear una Azure Functions, utilizar el [Repositorio de GitHub](#).

Apéndice B

Script para crear el modelo tipo estrella

B.1. Script sql para crear las tablas de hechos y dimensiones

Script sql, la ejecución de este script permite crear el modelo dimensional tipo estrella en un motor de bases de datos PostgreSQL.

```
--Drop all tables
DROP TABLE IF EXISTS
    dimIndicadorPeso,dimInformacionPuente,hechosCalculosIndices,dimRiesgoSismico,
dimRiesgoHidrometeorologico,dimTiempo,hechosInspecciones;

CREATE TABLE dimTiempo (
    id serial PRIMARY KEY,
    ano numeric
);
comment on column dimTiempo.id is 'Identificador de la tabla';
comment on column dimTiempo.ano is 'Columna para el ano de la inspeccion';

CREATE TABLE dimIndicadorPeso (
    id serial PRIMARY KEY,
    componente VARCHAR(100),
    elemento VARCHAR(100),
    codigo_indicador VARCHAR(100),
    nombre VARCHAR(100),
    peso numeric,
    tipo_puente numeric
);
```

```
CREATE TABLE dimInformacionPuenete (  
    id serial PRIMARY KEY,  
    codigo_puenete VARCHAR(100),  
    nombre_puenete VARCHAR(100),  
    inspector VARCHAR(100),  
    tipo_puenete numeric,  
    material VARCHAR(100),  
    tipo_estructura VARCHAR(100),  
    n_superestructura numeric,  
    provincia VARCHAR(100),  
    canton VARCHAR(100),  
    distrito VARCHAR(100),  
    fecha_inspeccion date,  
    tipo_ruta VARCHAR(100),  
    numero_ruta numeric,  
    tpd numeric,  
    longitud_puenete numeric,  
    numero_carriles numeric,  
    codigo_inspeccion VARCHAR(100),  
    longitud numeric,  
    latitud numeric,  
    fotografia VARCHAR(1000),  
    ancho_puenete numeric,  
    tipo_costo VARCHAR(50),  
    informe_puenete VARCHAR(1000),  
    area numeric,  
    categoria_longitud VARCHAR(50),  
    categoria_tpd VARCHAR(50),  
    importancia_socioeconomica numeric,  
    costo_metro_cuadrado numeric,  
    descripcion VARCHAR(200)  
);
```

```
CREATE TABLE dimRiesgoSismico (  
    id serial PRIMARY KEY,  
    codigo_inspeccion VARCHAR(100),  
    angulo numeric,  
    asiento numeric,  
    ca numeric,  
    fac_Imp_CS numeric,  
    fallas boolean,  
    long_Sup numeric,  
    suelo VARCHAR(100),  
    zon_Sis numeric  
);
```

```
comment on column dimRiesgoSismico.id is 'Identificador de la tabla';
comment on column dimRiesgoSismico.codigo_inspeccion is 'Identificador unico
    para cada inspeccion, se compone del codigo de inspeccion y el numero de
    superestructura';
comment on column dimRiesgoSismico.angulo is 'Angulo de sesgo';
comment on column dimRiesgoSismico.asiento is 'Ancho de asiento';
comment on column dimRiesgoSismico.ca is 'Aceleracion pico efectiva';
comment on column dimRiesgoSismico.fac_imp_cs is 'Factor de importancia';
comment on column dimRiesgoSismico.fallas is 'Columna booleana para determinar
    si existen fallas cercanas';
comment on column dimRiesgoSismico.long_sup is 'Longitud de la
    superestructura';
comment on column dimRiesgoSismico.suelo is 'Tipo de suelo';
comment on column dimRiesgoSismico.zon_Sis is 'Zona amenaza sismica';
```

```
CREATE TABLE dimRiesgoHidrometeorologico (
    id serial PRIMARY KEY,
    codigo_inspeccion VARCHAR(100),
    an_aba numeric,
    an_arri numeric,
    ang_ata numeric,
    inundable boolean,
    li_inf numeric
);
```

```
comment on column dimRiesgoHidrometeorologico.id is 'Identificador de la
    tabla';
comment on column dimRiesgoHidrometeorologico.codigo_inspeccion is
    'Identificador unico para cada inspeccion, se compone del codigo de
    inspeccion y el numero de superestructura';
comment on column dimRiesgoHidrometeorologico.an_aba is 'Ancho de aguas abajo';
comment on column dimRiesgoHidrometeorologico.an_arri is 'Ancho de aguas
    arriba';
comment on column dimRiesgoHidrometeorologico.ang_ata is 'Angulo de ataque';
comment on column dimRiesgoHidrometeorologico.inundable is 'Columna booleana
    para determinar si la zona es inundable';
comment on column dimRiesgoHidrometeorologico.li_inf is 'Altura libre
    inferior';
```

```
CREATE TABLE dimCostos(
    id serial PRIMARY KEY,
    costos_id integer
);
```

```
CREATE TABLE hechosCalculosIndices(
    id serial PRIMARY KEY,
```

```
tiempo_id integer,
informacion_puente_id integer,
riesgo_sismico_id integer,
riesgo_hidrometeorologico_id integer,
costos_id integer,
FOREIGN KEY(tiempo_id) REFERENCES dimTiempo(id),
FOREIGN KEY(informacion_puente_id) REFERENCES dimInformacionPuente(id),
FOREIGN KEY(riesgo_sismico_id) REFERENCES dimRiesgoSismico(id),
FOREIGN KEY(riesgo_hidrometeorologico_id) REFERENCES
    dimRiesgoHidrometeorologico(id),
FOREIGN KEY(costos_id) REFERENCES dimCostos(id)
);

CREATE TABLE hechosInspecciones (
    id serial PRIMARY KEY,
    codigo_indicador VARCHAR(100),
    codigo_inspeccion VARCHAR(100),
    peso numeric,
    informacion_puente_id integer,
    tiempo_id integer,
    indicador_id integer,
    calculos_indices_id integer,
FOREIGN KEY(informacion_puente_id) REFERENCES dimInformacionPuente(id),
FOREIGN KEY(tiempo_id) REFERENCES dimTiempo(id),
FOREIGN KEY(indicador_id) REFERENCES dimIndicadorPeso(id),
FOREIGN KEY(calculos_indices_id) REFERENCES hechosCalculosIndices(id)
);
```

Código B.1: Script sql para crear el modelo de datos tipo estrella