

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Escuela de Posgrado



Bases metodológicas para la implementación de Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural de puentes en Perú

Tesis para obtener el grado académico de Maestra en Ingeniería Civil con mención
en Diagnóstico y Reparación de Construcciones Patrimoniales y Existentes que
presenta:

Karen Elena Huamancusi Huamaní

Asesor:

Dr. Rick Milton Delgadillo Ayala

Co-Asesor:

Dr. Sabino Nicola Tarque Ruiz

Lima, 2024


Informe de Similitud

Yo, Rick Milton Delgadillo Ayala, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis titulada(o) Bases Metodológicas para la Implementación de sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes en Perú, de la autora Karen Elena Huamancusi Huamani, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 20%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 18 de noviembre de 2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de investigación, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 18 de noviembre del 2024.

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Delgadillo Ayala Rick Milton	
DNI: 45763720	Firma 
ORCID: 0000-0002-9763-1938	

INVESTIGACIÓN PUBLICADA

Conference Paper:

Evento: 1° Latin American Workshop on Structural Health Monitoring LATAM-SHM 2023.

1° Latin-American Workshop on Structural Health Monitoring
LATAM-SHM 2023
December, 5-8 2023

IMPLEMENTATION OF METHODOLOGICAL AND NORMATIVE BASES BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AI) FOR BRIDGE HEALTH MONITORING IN PERU.

KAREN E. HUAMANCUSI^{*}, RICK M. DELGADILLO^{*}

^{*}Pontificia Universidad Católica del Perú, San Miguel Lima, 15088, Lima, Perú

^{*}e-mail: karen.huamancusih@pucp.edu.pe and rick.delgadillo@pucp.pe

Key words: bridge health monitoring (BHM), artificial intelligence (AI), bridge codes, damage detection, international standards, damage features.

Abstract. The deficient updating of Bridge Structural Health Monitoring (BHM) standards in Latin America has resulted in a deteriorated road network with low trafficability services and economic deficiency. Most bridges have suffered damage and collapse due to recurrent natural disasters, poor quality materials, inadequate structural calculations and the traditional approach to bridge inspection and maintenance. The majority of bridge collapses in Peru have generated a need to implement lineaments to help improve the monitoring of these infrastructures. In this sense, this research establishes the methodological bases using the BHM lineaments, since it shows a progressive technological advance in developed countries (Europe, Asia, USA). International standards (EUROCODE, JT/T 1037-2022, AASHTO) and research on bridge damage identification methods are compiled. Additionally, the types of devices that generate a quantity of data to be processed through the use of modern algorithms are described. For example, Artificial Intelligence (AI) is used for automation of solutions, correct location of sensors, early damage detection and decision making for maintenance and operation of bridges. In conclusion, these lineaments are selected according to the reality of the country, thus generating a vast database of research related to BHM to finally generate a guide of specifications that will serve for decision making for future bridge monitoring in Peru.

1 INTRODUCTION

Bridges are critical assets that provide safety, reliability and functionality to transportation networks[1] in order to interconnect cities and improve a country's economy. In addition, there are factors that accelerate structural deterioration such as [2, 3]: natural hazards that have left 449 bridges collapsed in 2017 in Peru as a result of the El Niño phenomenon. [4], man-made ones such as the collapse of Line 12 of the Mexico City Metro [5] and the natural behavior of the structure that characterizes vibrations or frequencies that serve to diagnose damage [6–9]. Therefore, recent studies worldwide focus on life cycle analysis encompassing the maintenance phase and implementation of bridge monitoring strategies. [10, 11]. Beside, BHM research defines the study of the structural health condition of bridges through modern devices, Big Data (BD) processing algorithms, decision making and solutions adding AI in the automation process. [12–14]. In [15] the BHM objectives are to detect, locate, quantify and diagnose damage. In [16] applies deep learning as an AI tool for monitoring arch and cable-stayed bridges

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por su amor incondicional, ser mi soporte, mis compañeros y amigos de vida. También por su apoyo para poder cumplir todos mis objetivos académicos y personales. Además, por impulsar en mí, el amor por los libros, el valor de la sabiduría y el aprendizaje.

Me gustaría expresar mi gratitud a mi asesor, Dr. Rick Milton Delgadillo Ayala, por su tiempo, orientación, enseñanzas, conocimientos aportados en el presente trabajo de investigación. Como también, incentivar y motivar a mejorar continuamente dentro del ámbito investigativo en la Ingeniería Civil.

Agradecer a mi co-asesor, Dr. Sabino Nicola Tarque Ruiz, por sus aportes, recomendaciones y soporte durante el desarrollo de este trabajo.

A todos los profesores del programa de maestría en Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Perú, por brindarme la enseñanza, conocimientos y experiencias académicas en la etapa de estudio del posgrado.

A mis compañeros de la maestría con los cuales he compartido experiencias académicas, profesionales con las que ayudaron a mejorar la calidad de mi tesis.

A mis compañeros del pregrado, colegas y amigos con quienes he compartido experiencias, informaciones y recomendaciones para mejorar la presente investigación.

“Climbing a rung of the ladder means sacrifice, love and affection”

KEHH



*Para Elena y Alfredo,
mis padres.*

RESUMEN

Los puentes son activos críticos de una red vial además generan desarrollo económico a un país. La causa más probable de daño estructural es por durabilidad, pero la existencia de fenómenos naturales e influencia humana ocasionan el incremento de daño severo provocando posibles colapsos. Actualmente el enfoque tradicional de monitoreo de las infraestructuras en el Perú, ha ocasionado resultados inexactos que afectan a la toma de decisiones para un adecuado mantenimiento de puentes. Por otro lado, el Monitoreo de la salud estructural de puentes (BHM) muestra un progresivo avance tecnológico a nivel mundial, sin dejar de lado su propio fin de analizar y determinar la integridad estructural. Por esta razón, la presente investigación establece las bases metodológicas del BHM aplicado a la realidad peruana. Para la realización de este estudio se enmarcaron dos ítems: (i) Detalles de la obtención de la data histórica se basa en la tipología de puentes, material constituido, condición geográfica, factores de daño y parámetros de entorno. (ii) Detalles del monitoreo tecnológico en donde se implementa el BHM mediante la recopilación lineamientos internacionales e investigaciones en tipos de instrumentación y posicionamiento de dispositivos de monitoreo, obtención y procesamiento de la data, métodos de identificación de daños, calibraciones y aplicación de la Inteligencia Artificial (IA) desde la ubicación de sensores hasta la toma de decisiones de posibles soluciones. A partir de ambas secciones se proponen lineamientos para aplicar el BHM mediante un plan de trabajo que es acorde a las normativas internacionales en monitoreo e IA. En conclusión, estos lineamientos sirven como una guía de especificaciones para la toma de decisiones de futuros monitoreos de puentes en el Perú.

ABSTRACT

Bridges are critical assets of a road network and also generate economic development for a country. The most probable cause of structural damage is durability, but the existence of natural phenomena and human influence cause an increase in severe damage leading to possible collapse. Currently, the traditional approach to infrastructure monitoring in Peru has led to inaccurate results that affect decision making for adequate bridge maintenance. On the other hand, Bridge Health Monitoring (BHM) shows a progressive technological advance worldwide, without leaving aside its own purpose of analyzing and determining structural integrity. For this reason, the present research establishes the methodological bases of BHM applied to the Peruvian reality. For the realization of this study, two items were framed: (i) Details of historical data collection based on bridge typology, constituted material, geographical condition, damage factors and environmental parameters. (ii) Details of technological monitoring where the BHM is implemented by compiling international guidelines and research on types of instrumentation and positioning of monitoring devices, data collection and processing, damage identification methods, calibrations and application of Artificial Intelligence (AI) from the location of sensors to the decision-making process of possible solutions. From both sections, guidelines are proposed to apply the BHM through a work plan that is in accordance with international standards in monitoring and AI. In conclusion, these guidelines serve as a guide of specifications for decision making for future bridge monitoring in Peru.

INDICE

Investigación publicada	3
Agradecimiento	4
Resumen	6
Abstract	7
Lista de tablas	12
Lista de figuras	14
Abreviaciones, acrónimos y símbolos	16
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	19
1.1. Introducción	20
1.2. Justificación	28
1.3. Objetivos y alcances	31
1.3.1. Objetivo principal	31
1.3.2. Objetivos específicos	31
1.3.3. Alcance	32
1.4. Metodología	32
1.5. Organización de la tesis	35
CAPÍTULO 2. ESTUDIO DE PUENTES EN EL PERÚ	39
2.1. Tipos de puentes en el Perú	41
2.1.1. Puente tipo viga	44
2.1.2. Puente armadura	45
2.1.3. Puente en arco	46

2.1.4.	Puente atirantado	47
2.1.5.	Puente en suspensión	47
2.2.	Factores de daños en los puentes del Perú	48
2.2.1.	Factores internos	51
2.2.2.	Factores externos	52
2.3.	Monitoreo de puentes nacionales	56
CAPÍTULO 3.	ESTUDIO DEL MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL	
	DE PUENTES E INTELIGENCIA ARTIFICIAL	61
3.1.	Importancia de Monitoreo de la Salud Estructural de puentes (BHM)	62
3.1.1.	Ciclo de vida de un puente	62
3.1.2.	Monitoreo de salud estructural en puentes a nivel mundial (BHM)	65
3.2.	Inteligencia artificial aplicado al monitoreo de puentes	71
3.3.	Estudio de normas internacionales con implementación del shm en puentes	72
CAPÍTULO 4.	MANUAL DE MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL	
	DE PUENTES EN EL PERÚ.	78
	PRESENTACIÓN	79
	INTRODUCCIÓN A LA GUÍA DE MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE	
	PUENTES	80
	ORGANIZACIÓN DE LA GUÍA	81
	SECCION I: OBTENCIÓN DE LA DATA HISTÓRICA	83
4.1.	ANTECEDENTES	84
4.2.	CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA	85
4.2.1.	Tipos de puentes	86
4.2.2.	Tipos de materiales	87

4.2.3.	Elementos de la estructura	91
4.3.	IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS Y PARAMETROS DE ENTORNO	93
4.3.1.	Factores de daño	93
4.3.2.	Efectos de factores de daños en materiales.	96
4.3.3.	Tipos de daños	99
4.3.4.	Estudio de parámetros de entorno	102
SECCION II: METODOLOGÍA BHM		105
4.4.	INSTRUMENTACIÓN PARA EL MONITOREO	106
4.4.1.	Instrumentación in situ	113
4.4.2.	Instrumentación on site	124
4.4.3.	Instrumentación remota de monitoreo	127
4.5.	POSICIONAMIENTO DE SENSORES	129
4.6.	ADQUISICIÓN, MANEJO Y PROCESAMIENTO DE DATOS	133
4.6.1.	Adquisición de datos (DAQ)	134
4.6.2.	Preprocesamiento de datos	136
4.6.3.	Exploración y transformación	137
4.6.4.	Características de la data	138
4.6.5.	Evolución e interpretación de datos	139
4.7.	SELECCIÓN DE MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS (MID)	141
4.8.	MÉTODOS DE SIMULACIÓN Y CALIBRACIONES	146
4.8.1.	Métodos de simulación numérica y tridimensionales	146
4.8.2.	Calibración de modelos simulados	147
4.9.	VERIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN DE LA ESTRUCTURA	148
4.9.1.	Parametrización de daño	148
4.9.2.	Posibles alertas	149
4.9.3.	Toma de decisiones	150

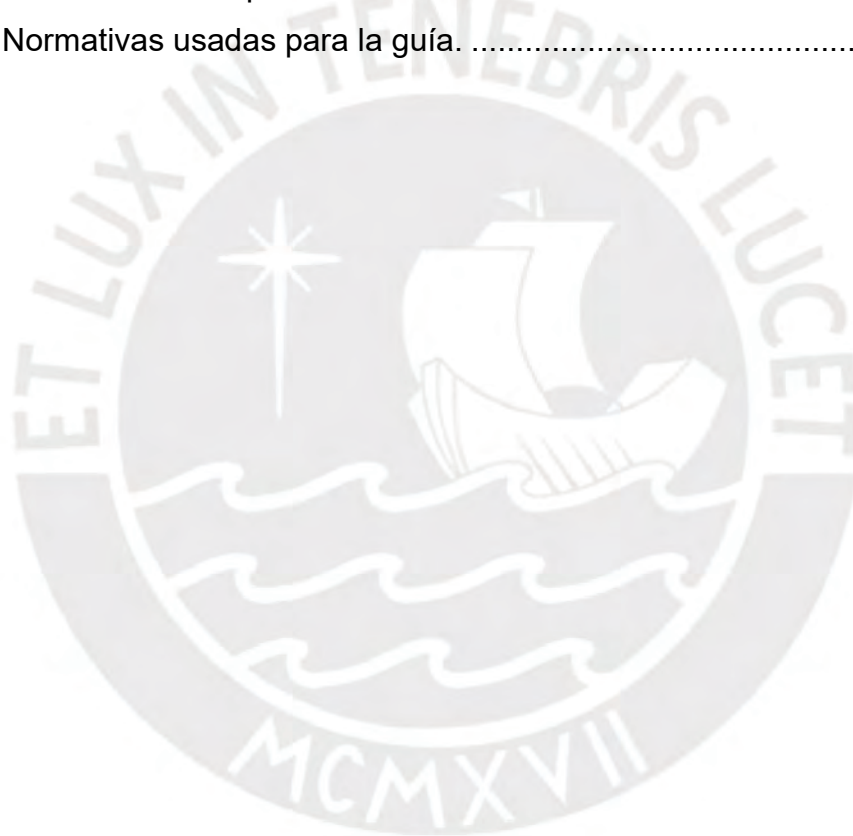
4.10. ALTERNATIVAS DE POSIBLES SOLUCIONES	151
<i>LINEAMIENTOS PARA EL PLAN DE MONITOREO TECNOLÓGICO</i>	154
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	164
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.	168
CONCLUSIONES	169
RECOMENDACIONES	170
TRABAJOS FUTUROS	171
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	172



LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Normativas en el monitoreo tradicional, BHM e IA.....	73
Tabla 2.	Niveles de información previos para BHM de puentes.	85
Tabla 3.	Tipos de materiales de acuerdo al tipo de puente	87
Tabla 4.	Normativas para las propiedades generales del concreto.	88
Tabla 5.	Normativas para las propiedades generales del acero.	89
Tabla 6.	Normativas para las propiedades generales de la piedra en la construcción.	90
Tabla 7.	Normativas para las propiedades generales del ladrillo en la construcción.	90
Tabla 8.	Normativas para las propiedades generales de la madera en la construcción.	90
Tabla 9.	Factores Internos de daño	95
Tabla 10.	Factores Externos de daño	96
Tabla 11.	Fallas probables en puentes según el tipo de material	97
Tabla 12.	Normativas para la evaluación de materiales.	97
Tabla 13.	Parámetros de daños global	102
Tabla 14.	Parámetros de daños global	103
Tabla 15.	Ensayos de acuerdo a la constitución de material.	107
Tabla 16.	Ventajas y Desventajas de técnicas de monitoreo.....	108
Tabla 17.	Combinación de técnica.....	110
Tabla 18.	Rendimiento de las técnicas de detección distribuida y cuasi distribuida. 116	
Tabla 19.	Características del sensor de aceleración	118
Tabla 20.	Características generales del GPS	119
Tabla 21.	Características generales de los sensores AE.....	120
Tabla 22.	Características generales de los sensores Strain Gauges	123
Tabla 23.	Características generales de los inclinómetros.....	123
Tabla 24.	Características de GNSS	127
Tabla 25.	Implementación de red de sensores para un BHM desde el mínimo, general y compleja aplicación.....	130
Tabla 26.	Investigaciones de técnicas para OPS.	131

Tabla 27.	Investigaciones de uso de sensores	131
Tabla 28.	Técnicas de procesamiento de señales	139
Tabla 29.	Métodos de Identificación de daños	141
Tabla 30.	Ventajas y desventajas de MID	142
Tabla 31.	MID aplicado a puentes casos aplicativos.	145
Tabla 32.	MID con técnicas y herramientas de procesamiento de datos	145
Tabla 33.	Aplicación de técnicas y herramientas de simulación numérica	147
Tabla 34.	Estados de daño y nivel de desempeño	149
Tabla 35.	Condición de puente global	150
Tabla 36.	Normativas de reparación de materiales	152
Tabla 37.	Normativas usadas para la guía.	165



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Crecimiento vial mundial.....	20
Figura 2.	Comportamiento económico mundial en las dos últimas décadas.....	21
Figura 3.	Problemática de América Latina	23
Figura 4.	Crecimiento Vial del Perú	24
Figura 5.	Fenómeno del niño del 2017.....	25
Figura 6.	Tipos de monitoreo.	27
Figura 7.	Problemática europea.....	29
Figura 8.	Puentes colapsados.....	30
Figura 9.	Procedimiento para la investigación.	35
Figura 10.	Contenido de la Guía Técnica	37
Figura 11.	Puentes viales del Perú.	41
Figura 12.	Esquema de tipos de puentes en el Perú	43
Figura 13.	Análisis de puentes en el Perú	44
Figura 14.	Puentes tipo viga en el Perú.....	45
Figura 15.	Puentes en armadura en el Perú.....	46
Figura 16.	Puentes en arco en el Perú	46
Figura 17.	Puentes atirantados en el Perú	47
Figura 18.	Puentes en suspensión en el Perú	48
Figura 19.	Parámetros de entorno en el Perú.....	49
Figura 20.	Puentes colapsados por factores de daño.....	50
Figura 21.	Consecuencia de factores internos	52
Figura 22.	Comportamiento del fenómeno del niño del Perú.....	53
Figura 23.	Reporte del fenómeno del Niño en el Perú.....	54
Figura 24.	Estudio del sismo y tsunami de 1940 en Perú.....	55
Figura 25.	Colapso de infraestructura vial por sismos en el Perú.....	56
Figura 26.	Estado de los puentes peruanos del 2018 al 2022.....	58
Figura 27.	Puentes monitoreados en el Perú.	59
Figura 28.	Línea cronológica de normativas referente a los puentes en el Perú	60
Figura 29.	Ciclo de vida de un puente.	64
Figura 30.	Puente Tacoma Narrows	66
Figura 31.	Enfoque del SHM.	68

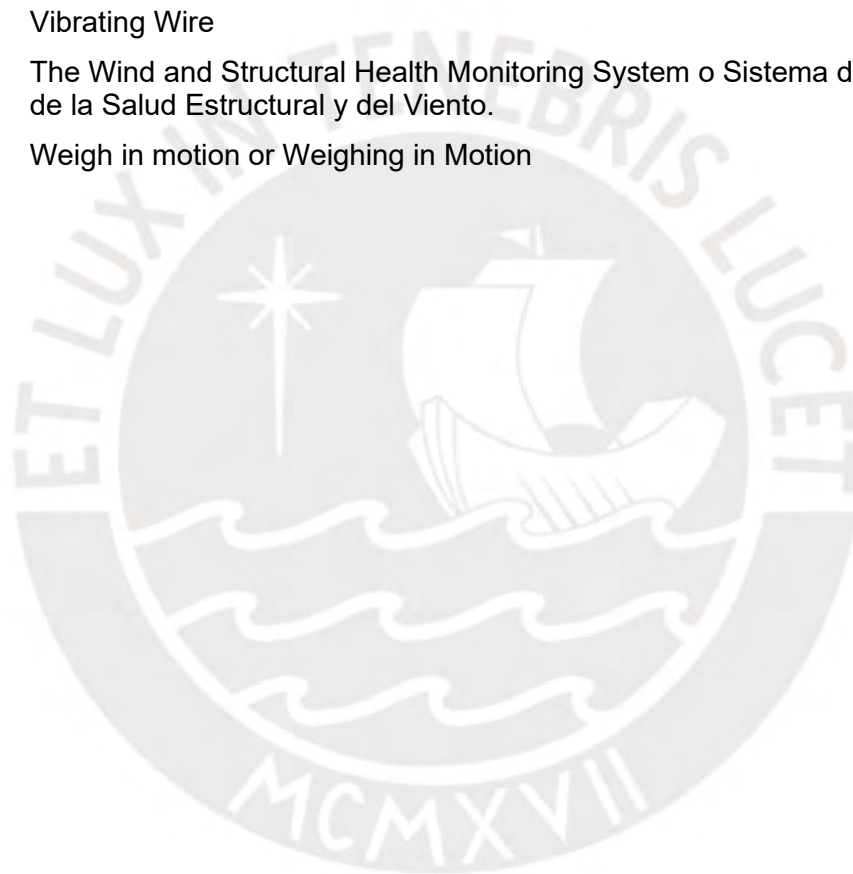
Figura 32.	Parámetros físicos que influyen el desempeño de un puente	69
Figura 33.	Normativas en monitoreo tradicional, tecnológico e IA.	73
Figura 34.	Idealización de BHM.....	81
Figura 35.	Estructuración de la guía	82
Figura 36.	Obtención de la Data Histórica	83
Figura 37.	Tipos de puentes según la guía BHM.....	87
Figura 38.	Elementos de un puente	92
Figura 39.	Estudio de los daños en puentes.....	93
Figura 40.	Factores de daños en el Perú.....	94
Figura 41.	Niveles de identificación de daño	100
Figura 42.	Metodología para el análisis de daño local.....	101
Figura 43.	Metodología BHM	106
Figura 44.	Lineamientos para escoger un adecuado instrumento	112
Figura 45.	Instrumentación in situ.....	113
Figura 46.	Sensor de Fibra Óptica	114
Figura 47.	Tipos de sensores de fibra óptica	115
Figura 48.	Instrumentación On Site	125
Figura 49.	Instrumentación remota de monitoreo	127
Figura 50.	Proceso de la minería de datos	134
Figura 51.	Sistema de adquisición de datos	135
Figura 52.	Pre- procesamiento de datos.....	136
Figura 53.	Proceso de transformación de la data	137
Figura 54.	Caracterización de la data	138
Figura 55.	Bibliografía usada para guía BHM.....	166

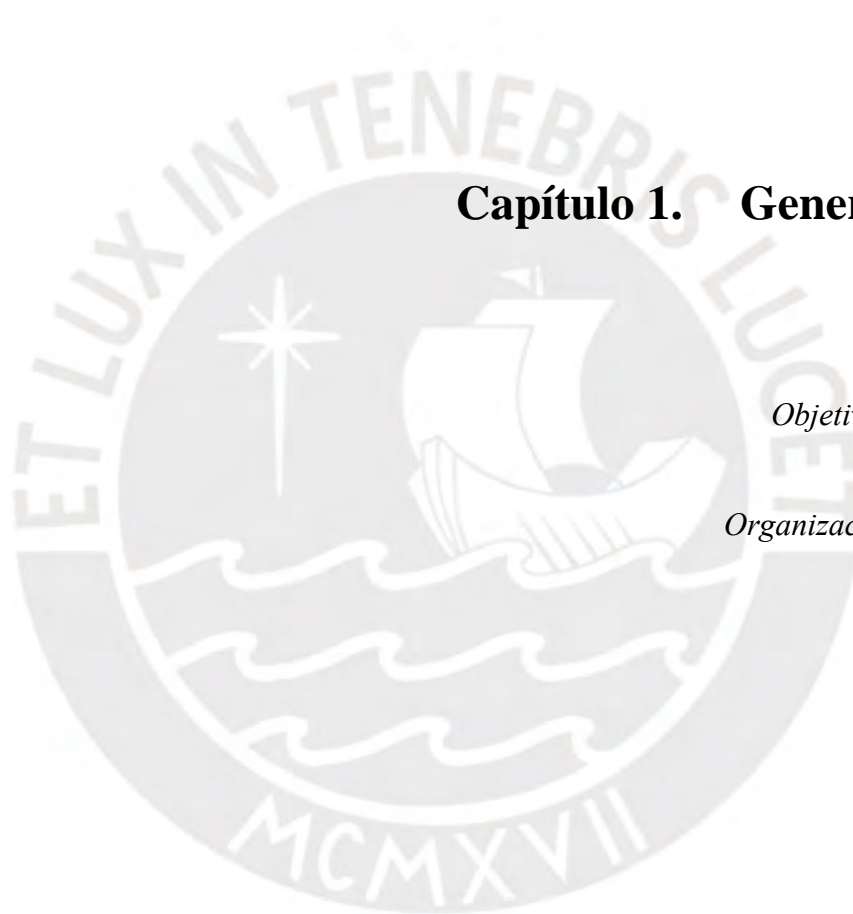
ABREVIACIONES, ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS.

AASHTO:	Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte o American Association of State Highway and Transportation Officials
ACI:	American Concrete Institute
ADC:	Analogue to Digital Converter
AE:	Acoustic Emission
AFRP:	Fibra de Polímero reforzado con Aramida
ANN:	Artificial Neural Network o Red Neuronal Artificial
AR:	Autoregressive Models o Modelo Autorregresivo
ASCE:	Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles
ASPRS:	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
ASTM:	Asociación Americana para el Ensayo de Materiales (American Society for Testing Materials)
BBN:	Redes de Creencias Bayesianas
BD:	Big Data o Grande Data
BHI:	bridge Health Index
BHM:	Bridge Health Monitoring System o Sistema de Monitoreo de Salud de Puentes
BMS:	Bridge Management System o Sistema de Gestión de Puentes
CA:	Concreto Armado
CAF:	Banco de Desarrollo de América Latina, antiguamente como Corporación Andina de Fomento
CALTRANS:	California Department of Transportation monitoring bridges
CEPAL:	Comisión Económica Para América Latina y el Caribe
CRFP:	Fibra de Polímero Reforzado de Carbono
DAQ:	Data Acquisition o Adquisidor de datos
DAS:	Data Acquisition System
DAU:	Data Acquisition Unit
DBN:	Dynamic Bayesian Network
DSP:	Digital Signal Processor
EC	EuroCode O Código Europeo
EMI	Electromecanic Interference o Interferencia Electromecánica
FBG:	Fibre Bragg Grating
FE:	Finite Element
FHWA:	Federal Highway Administration o Administración Federal de Carreteras
GFRP:	Fibra de Polímero Reforzado con Vidrio
GNSS:	Sistema Global de Navegación por Satélite

GPR:	Ground Penetrating Radar o Radar de penetración terrestre
GPS:	Global Positioning System
HCP:	Half-Cell Potential o Potencial de media celda
IA:	Artificial Intelligence o Inteligencia Artificial
IE:	Impact Echo o Eco Impacto
INDECI:	Instituto Nacional de Defensa Civil
IRT:	Infrared Thermography o Termografía infrarroja
ISO:	Organización Internacional de Normalización
IT:	Information technology o tecnología de la información
JICA:	Agencia Japonesa de Cooperación Internacional
LC:	Life Cycle o Ciclo de Vida
LCA:	Life Cycle Analysis o Análisis de Ciclo de Vida
LRFD:	Load and Resistance Factor Design o Diseño de Factor de Carga y Resistencia
LVDT:	Linear Variable Diferencial Transducers
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
ML:	Machine Learning o Aprendizaje Automático
MPI:	Maintenance Priority Index
MTC:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú
NBI:	National Bridge Inventory
NBIS:	National Bridge Inspection Standards
NDE / NDT:	Non-Destructive Evaluation / Non-Destructive Testing
NMR:	Imagen por resonancia magnética nuclear
OFS	Sensor de Fibra Óptica
OFDR:	Reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia
ONU:	Organización de Naciones Unidas
OSP:	Posicionamiento óptimo de sensores
OTDR:	reflectometría óptica en el dominio del tiempo
PCA:	Principal Component Analysis
PMBOK:	Project Management Body of Knowledge
PN:	Redes de Petri ó Petri Network
POF:	Plastic Optical Fibres
PROVIAS:	Proyecto Especial de Infraestructura de Transporte Nacional
PWRI:	Public Works Research Institute
RADAR:	Radio Detection Ans Ranging
RNE:	Reglamento Nacional de Edificaciones
SAEP:	Sistema de Administración de Estructuras y Puentes de Costa Rica

SCAP:	Sistema Computarizado de Administración de Puentes
SDD:	Structural Damage Detection o Detección de Daño Estructural
SENAMHI:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
Sev Ex:	Extensión de Gravedad para registrar la condición del elemento estructural
SHM:	Structural Health Monitoring o Monitoreo de Salud Estructura
SIAP:	Sistema de Administración de Puentes de México
SPR:	Statistical Pattern Recognition
UPE:	Ultrasonic Pulse Echo o Eco de Pulso Ultrasónico
TDR:	Reflectometría de dominio del tiempo
VI	Visual Inspection o Inspección Visual
VW:	Vibrating Wire
WASHMS:	The Wind and Structural Health Monitoring System o Sistema de Monitoreo de la Salud Estructural y del Viento.
WIM:	Weigh in motion or Weighing in Motion





Capítulo 1. Generalidades

Introducción

Justificación

Objetivos y alcances

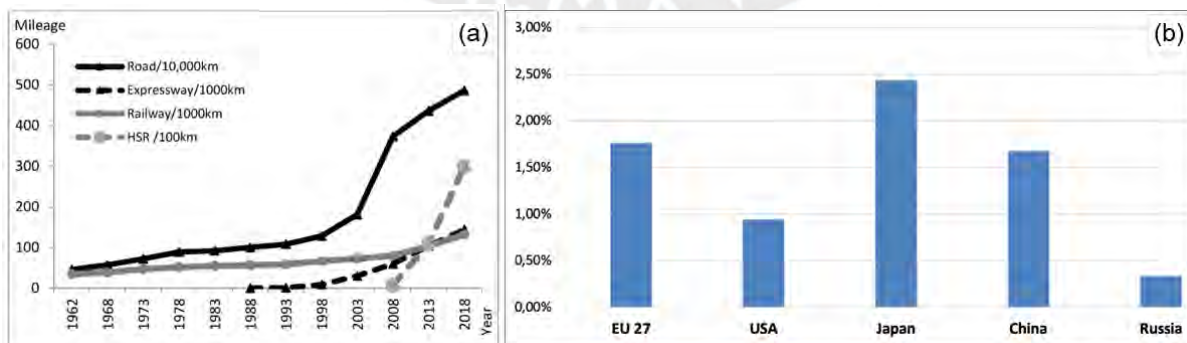
Metodología

Organización de la tesis

1.1. INTRODUCCIÓN

Un sistema de red vial genera el desarrollo económico, conecta ciudades y mejora la calidad de vida de las personas. El crecimiento vial mundial para el 2050 se proyecta a 25 millones de kilómetros (Km) lo que significa que se incrementará un 60% de la longitud total de carreteras existentes en el año 2010 (Laurance et al., 2014). A la vez reportes de países de mayor desarrollo económico revelan: China aumento un 24.6% de infraestructura vial desde el 2012 hasta el 2021 extendiéndose y diversificándose en carreteras, autovías, ferrocarriles y trenes de alta velocidad como se muestra en la **Figura 1 (a)** (Ke et al., 2020; The State Council Information Office The People's Republic of China., 2022). En cambio, Estados Unidos incrementó de 11 076 puentes del 2012 hasta el 2022 (U.S. Department of Transportation, 2021). Además, que se muestra en la **Figura 1 (b)** una comparativa entre países a nivel mundial dando a conocer a Japón como el más desarrollado en el ámbito vial (European Union Road Federation, 2023). Por ello, al seguir generando mayor crecimiento vial con la existencia de infraestructuras como puentes, túneles y carreteras también reflejan la necesidad de saber la condición en la que se encuentran mediante el monitoreo vial.

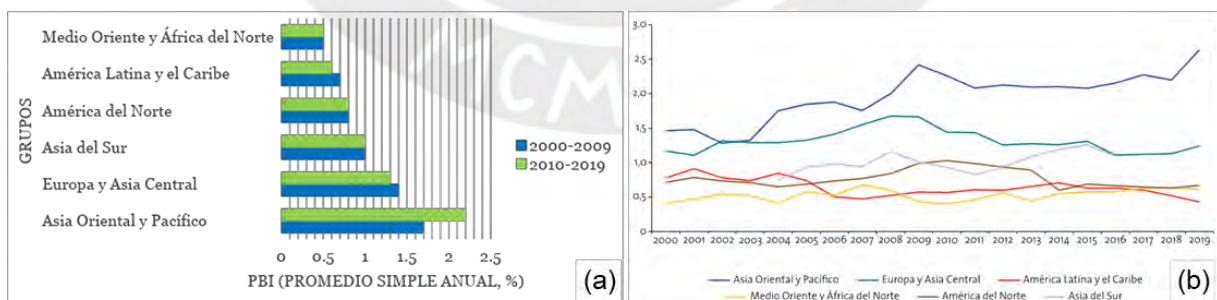
Figura 1. Crecimiento vial mundial



Nota. Para (a) Kilometrajes en carreteras, autovías, ferrocarriles y trenes de alta velocidad (Extraído de (Ke et al., 2020)) y (b) Densidad de autopistas y comparación entre la Unión Europea, Estados Unidos, Japón, Rusia y China, 2020 (km de autopista por km² de superficie terrestre)(Extraído de (European Union Road Federation, 2023))

Las infraestructuras de transportes varían a lo largo de los años y a la condición de la región en la que se proyecta la vía, puente, túnel, etc. De acuerdo a la Organización de Naciones Unidas (ONU) mediante la Comisión Económica Para América Latina y el Caribe (CEPAL) se conoce el comportamiento de la economía mundial del 2000 al 2019 mediante la distribución de 6 grupos de países como se puede observar en la **Figura 2 (a)**. Aunque la comparativa de los resultados de las dos últimas décadas es similar, en la se reconoce que hay un impacto de estudio en Europa y Asia central debido al decrecimiento constante en la última década (Lardé, 2021). Por otro lado, se observa en la **Figura 2 (b)** que la región de América Latina y el Caribe tiene poco avance en la inversión vial a diferencia de Asia Oriental. Se sabe que invertir en infraestructuras es una herramienta que produce el crecimiento y desarrollo económico (Banco de Desarrollo de América Latina, 2020), en el Perú crece la necesidad de tener mayor avance vial. Aunque a la larga puede verse afectada debido a la falta de monitoreo y mantenimiento de vías por ello existe la inquietud por mejorar e implementar el monitoreo de puentes al ser una de las infraestructuras de gran importancia dentro de la red vial.

Figura 2. Comportamiento económico mundial en las dos últimas décadas.

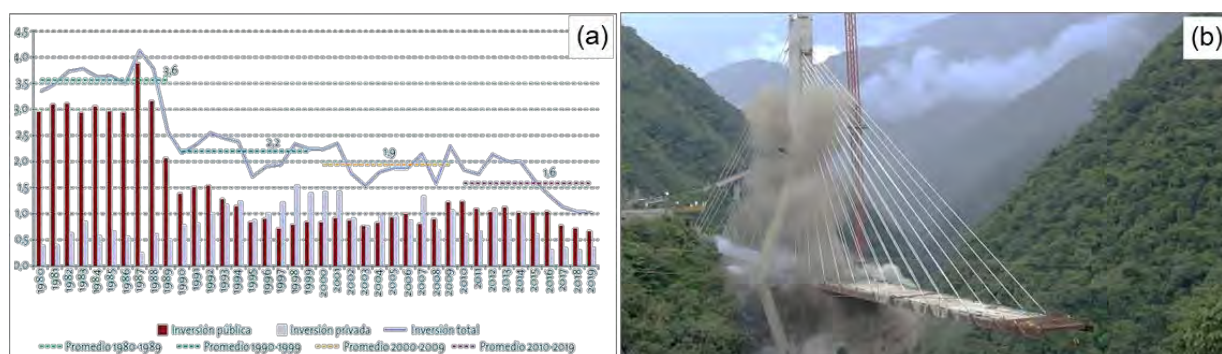


Nota. Para (a) Comparativa del PBI en porcentaje de los 6 grupos económicos y (b) Inversión en infraestructura de transporte por grupos de países, 2000-2019. (Extraídos de Lardé, 2021)

En cuanto a la experiencia latinoamericana, se observó limitaciones en el desarrollo tecnológico aplicado a la construcción de infraestructuras viales y en la

capacidad de profesionales que dirijan los proyectos. Según Sociedad de Ingenieros Civiles de Estados Unidos (ASCE) la implementación de estándares basados en liderazgo, rendimiento, resiliencia, innovación y análisis de costo de vida genera un desafío para los ingenieros civiles a lo largo de cada etapa de su carrera profesional (ASCE, 2022). El reporte del CEPAL dio a conocer una comparativa entre la inversión pública y privada de Latinoamérica en las cuatro últimas décadas como se muestra en la **Figura 3 (a)**. El decrecimiento constante de la inversión viene de la mano con la preocupación por el incremento de fenómenos naturales, la falta de monitoreo estructural y mantenimiento en los puentes que pueden traer consecuencias graves como colapsos, aunque las reiteradas mejoras en el crecimiento vial en América Latina se ven opacados por la falta de ética profesional. Es claro recordar el colapso del puente de Chirajara en Colombia como se observa en la **Figura 3 (b)** el cual tenía medidas de diseño de longitud total de 446 metros y 280 metros de altura el cual sucedió el 2018. Mediante el Tribunal de Arbitramento en la Cámara de Comercio de Bogotá se atribuyó la caída de la estructura al diseño que presentó la empresa constructora a causa de una falla de diseño estructural (Forbes Staff, 2020), además de las deficiencias en los elementos estructurales en una de las pilas del puente y en cuanto a la calidad de materiales fueron constatados por laboratorios de Colombia y Estados Unidos en el cual se superaron los parámetros mínimos requeridos (Concesionaria Vial de los Andes, 2018). Aunque dicho puente se encontraba en la fase de ejecución se da a notar el efecto de la mano del hombre ante la toma de decisiones, por ello, no solo los fenómenos naturales aquejan a los puentes sino también la intervención humana estudiándola como un factor de daño dentro del análisis del monitoreo de puentes.

Figura 3. Problemática de América Latina

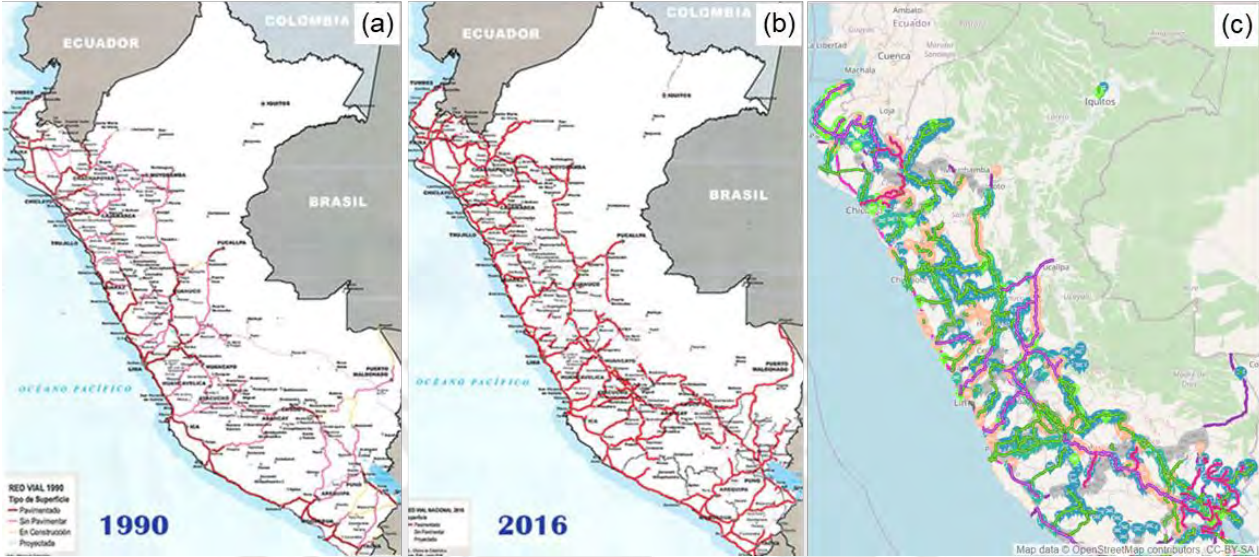


Nota. (a) América Latina: inversión en infraestructura de los sectores público y privado, según el sector de la infraestructura, 1980-2019 (Extraído de Lardé, 2021) (b) El puente que iba a unir Bogotá con Villavicencio después de desplomarse (Extraído de Forbes, 2020).

Dentro de la red vial existen diversos tipos de infraestructuras y obras de arte como los puentes que unen y conectan ciudades. No obstante, este tipo de infraestructuras debe atravesar accidentes geográficos, obstáculos naturales y artificiales. En el Perú, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) es el órgano rector responsable por el ciclo de vida de los puentes por ello estableció un manual de diseño de puentes (MTC, 2016) y la guía para la inspección de puentes (MTC, 2019a) la cual ya se encuentra en la segunda actualización siendo la primera publicada en el 2006 (MTC, 2006). Dichos reglamente sirven como base para la propuesta de proyectos de inversión pública y privada de creación, ampliación, mejoramiento y recuperación de puentes en el Perú. Además, los reportes muestran el incremento de 10 500 kilómetros viales desde 1990 hasta el 2016 como se muestra en la **Figura 4 (a) y (b)** (Redacción RPP, 2016). Para el 2022, el MTC rehabilitó y mejoró 1 440 kilómetros de la red vial finiquitando el año con 22 675 kilómetros de vías pavimentadas como se muestra en la **Figura 4 (c)** (Provías Nacional, 2022). Esto refleja un constante crecimiento vial cada año, pero al progresar también llega la preocupación de monitorear y mantener las

infraestructuras viales más vulnerables como los puentes. Por ello, se estudió la condición y factores de daño que aquejan a los puentes en el Perú.

Figura 4. Crecimiento Vial del Perú

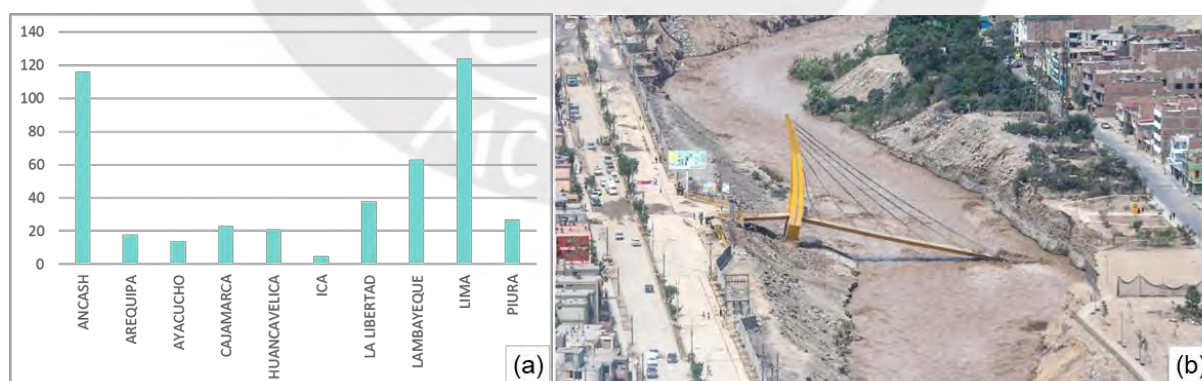


Nota. (a) Red vial del 1990 (Extraído de Redacción RPP, 2016) (b) Red vial del 2016 (Extraído de Redacción RPP, 2016) (c) Red de Vías Nacional 2023 (Adaptado en Provías Nacional, 2023)

Por otro lado, en el país existen diversos contextos geográficos, fenómenos naturales, condiciones climáticas y efectos sísmicos cuyas consecuencias generan daños estructurales en la red vial e inseguridad de transitabilidad de la población, por lo que es evidente el deterioro de los puentes. En adición, en el 2006 se reporta que numerosos puentes con más de cincuenta años de uso sufrieron demasiados deterioros a falta de mantenimiento más que por la cantidad de años de funcionamiento (MTC, 2006). Asimismo, se indagó sobre el reporte del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI) el cual mostró que desde 1578 hasta el 2017 ocurrió 44 veces el “Fenómeno El Niño”. Los resultados demostraron que 8 se describen como algo “extraordinario” por la intensidad con la que aconteció dicho fenómeno, inclusive el año 2017 se consideró parte de un “Extraordinario Fenómeno El Niño” en el cual se suscitaron 449 puentes destruidos por dicho fenómeno

(INDECI, 2017). En la **Figura 5 (a)** se observó la cantidad de puentes colapsados observando que Lima y Ancash fueron los dos departamentos con más cantidad de puentes colapsados. Recordando de la controversia generada por el caso del puente peatonal Solidaridad ubicado en el departamento de Lima como se muestra en la **Figura 5 (b)** uno de los estribos completamente desintegrado de la zona. Las causas del colapso de dicho puente fueron la baja calidad del suelo (material suelto), inadecuada conexión de la viga de acero con la viga de concreto y la falta de defensa ribereña en la zona cercana a la infraestructura (Salas, 2018). El colapso del puente solidaridad trajo perjuicio de hasta 5 millones de soles debido a la deficiente ejecución que según la Contraloría en dicha obra no se encontró la veracidad en los certificados de control de calidad en la construcción (Redacción RPP, 2018). Con estos resultados se llegó a la conclusión de que las causalidades de daños por factores externos en el Perú son aquejadas por medio de los fenómenos naturales, flujo de detritos, vientos intensos, sismos, terremotos, tsunamis, etc.

Figura 5. Fenómeno del niño del 2017

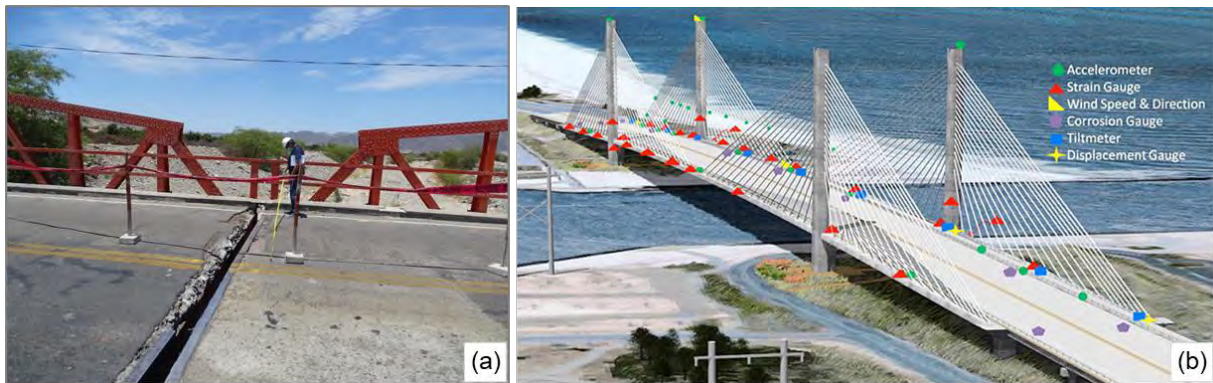


Nota. (a) Reporte de puentes destruidos por regiones más afectadas el 2017 (Adaptado de Instituto Nacional de Defensa Civil, 2017) (b) Puente solidaridad - Lima (Extraído de Redacción RPP, 2018)

Las consecuencias de los daños en los puentes generan un bajo, mediano y alto impacto en lo económico y social dentro de la región. Por ello, lo ideal es

maximizar la expectativa del tiempo de vida útil, minimizando la interrupción del tránsito y manteniendo los estándares de calidad y seguridad vial (Prendergast et al., 2018). Para conocer la condición de un puente se verifica mediante un adecuado monitoreo, además que se puede recrear diversos escenarios ante posibles causales (factores externos, factores por la mano del hombre, etc.) que generen peligro de colapso. En el país, el MTC realiza trabajos de monitoreo de manera tradicional mediante estudios visuales de la estructura del puente como se observa en la **Figura 6 (a)**. Dicho enfoque planteado genera mayores costos, recursos humanos, tiempo de estudio, ineficiencia, desconfianza hacia el criterio del inspector (Han et al., 2021) y en algunos casos daña las estructuras con ensayos invasivos lo que ocasiona susceptibilidad en los resultados obtenidos. Además, con la mejora de la tecnología, los esquemas tradicionales difícilmente cumplen los objetivos estructurales de integridad, seguridad y resiliencia ya que sus resultados solo detectan daños superficiales (An et al., 2019). En adición, el sistema de monitoreo de salud estructural (Structural Health Monitoring, SHM) de puentes propone un enfoque tecnológico como se muestra en la **Figura 6 (b)**. El puente atirantado Charles W. Cullen del río indio de 533 m. aplicó el uso de dispositivos como acelerómetros, sensores de deformación, inclinómetros, sensores de desplazamiento, anemómetros, sensores de cloruro los cuales son instrumentos para conocer la condición estructural por periodos de tiempo (Al-Khateeb et al., 2019). Al no aplicarlo en el país, generó descuido de las infraestructuras, incremento de inoperatividad y puentes colapsados por ello como primer paso es contar con los lineamientos actualizados con el sistema SHM.

Figura 6. Tipos de monitoreo.



Nota. (a) Monitoreo mediante flexómetros del puente de Palpa que presentan grietas y fisuras en un carril (La Opinión, 2022) (b) Disposición de sensores en el sistema SHM (Al-Khateeb et al., 2019).

El presente trabajo de investigación propone establecer las bases metodológicas para la implementación de la salud estructural de puentes en el Perú mediante sistemas de monitoreo aplicando dispositivos, métodos y algoritmos en función a la tipología de puentes. Por lo que es necesario resaltar la mejora de avances de un enfoque tradicional propuesto por el MTC; a un enfoque tecnológico, el cual ha tenido un avance significativo en las últimas décadas en el campo de la ingeniería como se muestra en la **Figura 6 (b)** (Cantero et al., 2019). Por tal motivo se propone lineamientos del SHM aplicado a puentes (Bridge Health Monitoring, BHM). La cual consiste registrar en cierto periodo de tiempo de operatividad el comportamiento de la infraestructura (Glisic & Inaudi, 2008) a través de la implementación de estrategias para identificación de daños estructurales. Estos pueden resultar en parámetros representativos que verifiquen la condición actual del puente (Wenzel, 2008). Adicionalmente se realiza la recopilación de la información por medio de sensores y la aplicación de técnicas de procesamiento de datos para observar el comportamiento estructural (An et al., 2019). Para que la recopilación de datos de los sensores pueda extraerse de manera instintiva se debe planificar un adecuado sistema de adquisición de datos que suele ser extensa (Big Data, BD).

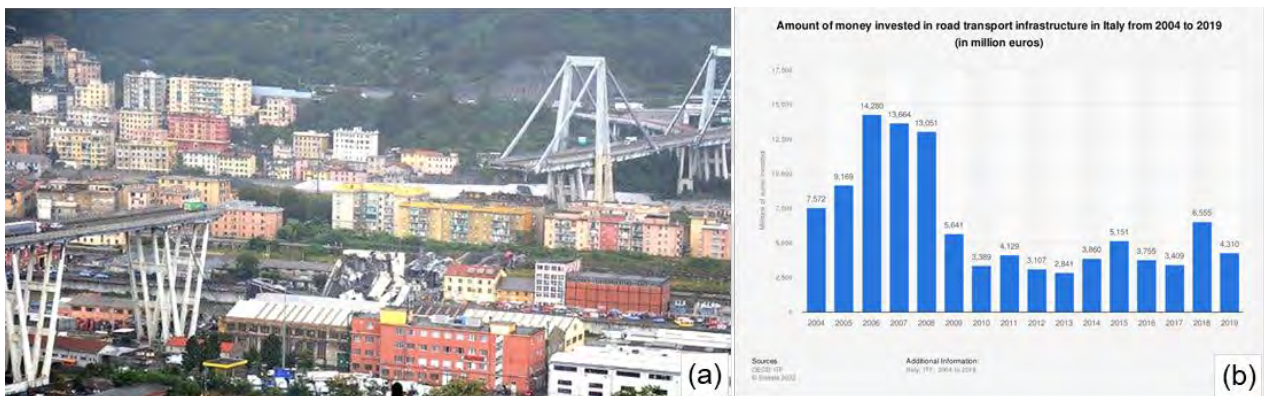
Por ello se propone un procesamiento y lectura automático mediante algoritmos que realicen la toma de decisiones. La Inteligencia Artificial (IA) es una de las propuestas a implementarse, ya que se obtiene un comportamiento inteligente de las máquinas virtuales o físicas adicionadas con el aprendizaje automático (Machine Learning, ML) (Sun et al., 2020). Por este método se ejecuta el procesamiento rápido y autónomo de los datos a la implementación del SHM. Los campos como el ML dentro de IA se crean mediante algoritmos cuyo fin es aprender el comportamiento de la estructura y además modelar en tiempo extraordinario considerando esta práctica un beneficio para la economía del país y la seguridad de la vida (Delgadillo, 2022). Por ello, en el presente trabajo de investigación se propuso lineamientos en base a la teoría, base de datos, investigación y resultados del BHM delimitados a la tipología de importancia de la realidad peruana.

1.2. JUSTIFICACIÓN

El monitoreo de puentes beneficia directamente a la economía y seguridad vial debido a la respuesta inmediata del mantenimiento que requiere ante la condición de respuesta estructural de dicha infraestructura. Según Svendsen et al. (2022) muchos puentes de Europa y EE.UU. presentan aumento en las cargas de tráfico, intensidad y han excedido su vida útil, afectado la seguridad vial. Un claro ejemplo es el puente Morandi en Italia como se puede observar en la **Figura 7 (a)**, cuyo colapso dio a reducir la incapacidad de predecir riesgos estructurales y meteorológicos que afectaron la seguridad vial (Villani, 2016). Dichos problemas se suscitaron debido al aumento de tráfico en las autopistas principales, la ineficiencia de cálculos para determinar la calidad de los materiales y el decrecimiento en la inversión de infraestructura vial en Italia en comparación con otros países de Europa (Moreno,

2018). Por ello, se investigó el comportamiento en la inversión de carreteras en el que se muestra en la **Figura 7 (b)** al 2006 como el año en el que más presupuesto en infraestructura vial se ejecutó (Statista Research Department, 2022). Además, se observó el aumento de inversión en el mantenimiento de puentes en el 2018 después del colapso del puente Morandi.

Figura 7. Problemática europea.



Nota. (a) Colapso del Puente Morandi en Génova – Italia (Extraído de Pianigiani et al., 2018) (b) Inversión en carreteras en Italia de 2004 a 2019 (Extraído de Statista Research Department, 2022).

La necesidad de invertir en el monitoreo de puentes es de prioridad. El presupuesto para el monitoreo y mantenimiento de puentes en Europa que cuenta con 4 409,8 miles de Km es más de 15 mil millones de euros invertidos en el 2019 (EU Road Federation, 2022). Caso contrario, en el Perú sucesos como los colapsos de los puentes que se muestran en la **Figura 8**: Río Blanco - Cusco ((La Razón, 2024)), el puente Kutinachaca – Ayacucho (Redacción RPP, 2022) y el puente Montalvo en Moquegua (Redacción EC, 2019) reflejan la necesidad de verificar el servicio de vida de las estructuras y las condiciones en las que se encuentran antes de que ocurra un siniestro. Además que muchas otras requieren un estudio a profundidad mediante sensores que generen una base de datos para la obtención de daños estructurales en un periodo de tiempo (Svendsen et al., 2022). Por ello se crea la necesidad de monitorear los puentes ante factores de daños externos e

internos mediante dispositivos tecnológicos que sean lo menos destructivos posibles.

Figura 8. Puentes colapsados.



Nota. (a) Puente Río Blanco (Extraído de La Razón, 2024) (b) Puente Kutinachaca – Ayacucho (Extraído de Redacción RPP, 2022) (c) Puente Montalvo – Moquegua (Extraído de Redacción EC, 2019)

El Perú, al ser un país con diversidad climática y compleja orografía genera diversos ecosistemas con controladores climáticos que forman fenómenos naturales como tormentas convectivas, fenómeno del niño, incremento de temperatura del aire, fallas geológicas, mayor humedad, bajas, medianas y elevadas precipitaciones (SENAMHI, 2020a). Estos generan flujo de detritos y socavaciones que son considerados los mayores problemas en el daño de la estructura de puentes. Los 449 puentes destruidos el año 2017 en el cual ocurrió el “Extraordinario Fenómeno El Niño” como se observó en la **Figura 5** (INDECI, 2017), son prueba de la necesidad de implementar y establecer metodologías de SHM de puentes en el país. Además, debido a la subducción de la placa de Nazca y la placa Sudamericana el territorio peruano es considerado como zona sísmica generando vulnerabilidad a la infraestructura vial en estudio.

Por ello implementar un SHM en puentes en el Perú constituye un aporte a la seguridad vial del país debido a que ayuda a identificar los puentes de mayor vulnerabilidad estructural como también estimar el comportamiento de la infraestructura frente a sismos, desastres naturales, etc. Asimismo, el enfoque y las

nuevas técnicas del SHM para puentes (BHM) tienen resultados positivos a través de la automatización del proceso de evaluación estructural con tiempos cortos para la obtención de datos (Liu et al., 2017). En adición, el enfoque tradicional es el punto de inicio del monitoreo para la aplicación de nuevas tecnologías, por ejemplo, se obtiene data real mediante los sensores con el fin de predecir la vida útil restante de las infraestructuras (An et al., 2019). Por ello, esta metodología amplía el campo de estudio en el ciclo de vida útil, condición estructural, gestión de la toma de decisiones ante desastres de los puentes y monitoreo estructural asegurando el crecimiento vial y económico del Perú.

1.3. OBJETIVOS Y ALCANCES

1.3.1. Objetivo principal.

Establecer las bases metodológicas mediante sistemas de monitoreo de salud estructural aplicando dispositivos, métodos y algoritmos en función a la tipología de puentes en el Perú.

1.3.2. Objetivos específicos.

- ❖ Definir la tipología de puentes existentes en el Perú.
- ❖ Identificar las causas de los problemas estructurales existente de los puentes en el Perú de acuerdo a diferentes reportes.
- ❖ Recopilar los métodos apropiados para la identificación de daños de acuerdo a su tipología y característica de factores de diseño.
- ❖ Implementar lineamientos con las nuevas tecnologías BHM aplicado a la Inteligencia Artificial (IA) para la ubicación se sensores, adquisición de datos, el procesamiento y la toma de decisiones en el monitoreo de puentes.

1.3.3. Alcances.

Se abarca en 5 tipos de puentes manteniendo la condición geográfica, factores y causales de daños, condiciones geográficas, parámetros entorno, etc. Proponiendo el enfoque BHM a la realidad peruana con lineamientos aplicados a nivel mundial, parámetros usados en las normas internacionales (EUROCODIGO, AASHTO y JT/T 1037-2022) y las nuevas tecnologías desarrolladas en el campo de la Inteligencia artificial (IA) para la automatización de detección, localización, cuantificación y diagnóstico de daños en los puentes.

1.4. METODOLOGÍA

La investigación de enfoque cualitativo se efectúa de manera descriptiva y correlacional con técnicas de recolección de la información: la observación, la investigación bibliográfica, investigación de ensayos de laboratorio e instrumentos y clasificación de información. Los cuales generan un panorama amplio de la investigación para realizar conceptos, definiciones, significados, ejemplos, ilustraciones en relacionar a la información obtenida.

En la primera parte de la investigación se recopila la literatura del monitoreo estructural de puentes a nivel nacional e internacional, los orígenes del BHM con el origen del caso del colapso del puente Tacoma Narrow en Estados Unidos (Song et al., 2022) y como en la actualidad se implementan nuevas tecnologías dentro de la metodología (Cremona & Santos, 2018; Mishra et al., 2022; Sun et al., 2020).

En la segunda parte, se investigó y propuso las tipologías de puentes que delimitan el estudio y factores de daño. Una investigación tomó la importancia de los métodos de identificación de daños y el avance del SHM del 2011 al 2017 (An et al., 2019). Mientras que la realidad peruana muestra la clasificación de acuerdo a su

objetivo de uso (MTC, 2016). Por ello, en esta sección se propuso 5 tipos de puentes: puentes de vigas, puentes de armadura, puentes de arco, puentes atirantados y puentes colgantes. Además, se investigó los requisitos mínimos de diseño, características de la estructura, diseño y estudios previos de ingeniería aplicadas al país. Otro objetivo dentro del estudio fue la identificación de los factores de daño que perjudiquen la condición estructural de los puentes. Finalmente, se analizó la actual Guía de Monitoreo de Puentes del Perú y los resultados obtenidos mediante diferentes investigaciones aplicadas con la guía.

Para la tercera parte, se definió el SHM como un proceso de análisis y determinación de la integridad estructural evaluando el motivo del daño que presenta la estructura (Chang et al., 2003). Ampliando las terminologías se propuso el uso del BHM como un avance del SHM aplicado a puentes, por ello su aplicación requiere el conocimiento de equipos de monitoreo que detecten daños en los componentes estructurales (Calvert et al., 2021). También se estudió las condiciones existentes y el pronóstico de comportamiento estructural de los puentes teniendo en cuenta las cargas de viento, tráfico, desplazamiento, peso, impacto, vibraciones o sismo (Seguel, 2019). Por este motivo se definen un orden de componentes principales para el SHM como los conocimientos fundamentales (identificación de la salud del puente), necesidades tecnológicas (sensores y aplicación de la IA) y retos socio-organizacionales (toma de decisiones) (Ahlborn et al., 2010). Por ello se implementan las tecnologías de detección de daños mediante dispositivos que generan datos y la descripción de las posiciones de los sensores para la optimización de los resultados de la Big Data (grande cantidad de datos o BD) para el cual se realiza el procesamiento aplicando la IA.

Para la cuarta parte, se estudia las normas internacionales como por ejemplo el AASHTO en el cual da una serie de procedimientos para la evaluación de puentes mediante el análisis estático y dinámico con modelamiento numérico de la estructura (Moses, 2020). Otra norma internacional importante a revisar es el EUROCODE (EC) del cual a través de una investigación se realizó la evaluación de puente mediante el parámetro de amenaza a fatiga que se tiene en EC 1-2 (Veit-Egerer et al., 2009). Otros países que tengan intervención en el monitoreo de puentes como China (Moreu et al., 2018), Japón (Ministry of Land, Infrastructure, Transport, 2019), Italia (Ministero de lle Infrastrutture e dei Trasporti, 2020), etc. Además, se adiciona la importancia de parámetros de uso que pueden contener la guía se revisa el Reglamento Nacional de Edificaciones E.030. Diseño sismorresistente para medidas de diseño, análisis de la estructura de los puentes, identificación de tipos de cargas y tipos de comportamientos estructurales para la fase de diseño (VIVIENDA, 2019b), las cuales se utilizarán como parámetros generales ya que estas medidas están adaptadas a la realidad peruana. También se adiciona al estudio la guía de Inspección de puentes del 2006 y 2019 en el cual describe el monitoreo tradicional además del uso de formatos que ayudan a la obtención de información básica de la estructura (MTC, 2006), el manual de puentes del 2019 para definir la geometría de la tipología de puentes y su estructura (MTC, 2019a).

En la quinta parte de la investigación se propuso lineamientos de BHM con el estudio del puente y la tipificación a través de una propuesta de monitoreo visual. Después se creó una data de instrumentación de monitoreo y recomendaciones de localización de sensores u otros dispositivos, para seguir con la adquisición, manejo y procesamiento de datos mediante la implementación de métodos de identificación de daños y algoritmos. Adicionalmente, se propuso un resumen de la aplicación de

acuerdo a casos de estudio de métodos numéricos, parámetros modales u otros algoritmos de uso. Además, se describió la verificación de la condición estructural, emitir alertas y alternativas de posibles soluciones de acuerdo a normativas internacionales e investigaciones que aplicaron el SHM y BHM.

Finalmente, en la sexta parte se analiza la guía propuesta con los lineamientos BHM de la quinta parte, define las dificultades al momento de aplicarlo en un caso de estudio, compara y extrae las normativas internacionales.

Figura 9. Procedimiento para la investigación.



1.5. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

Los reportes del Perú reflejan la falta de mantenimiento y el desconocimiento de las estructuras actuales existentes, por ello un adecuado sistema de monitoreo puede generar mejoras en la calidad de la infraestructura vial. El presente trabajo de investigación desarrolló la implementación de sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes en el Perú mediante una Guía Técnica. Se propuso el siguiente esquema para la tesis que guarda relación con la metodología de la investigación de la **Figura 9**:

Capítulo 1: Generalidades.

En este capítulo se introdujo y justificó el tema general del trabajo de investigación, además se definieron los objetivos, alcances, la metodología y se esquematiza el contenido.

Capítulo 2: Estudio de puentes en el Perú.

En este capítulo se observó la problemática peruana para limitar el alcance de estudio mediante la tipología de puentes, materiales, factores de daños, patologías, el estudio del monitoreo actual en el Perú y la normativa actual.

Capítulo 3: Estudio del BHM y IA.

En este capítulo se plantean tres ítems:

- a. Importancia del monitoreo de la salud estructural de puentes:** En esta sección se estudió y recopiló la información de metodologías SHM y BHM desde el inicio y el avance de la tecnología de uso de sensores.
- b. La Inteligencia Artificial aplicado a los puentes:** En esta sección se estudia la aplicación de la IA dentro del procesamiento de datos de los sensores y la automatización mediante el aprendizaje automático (ML).
- c. Estudio de normativas internacionales:** En esta sección se definen que guías, normativas, estudios, etc. proponen parámetros y métodos en monitoreo tradicional, monitoreo tecnología e inteligencia artificial.

Capítulo 4: Guía Técnica.

En este capítulo, se propone la base técnica de toda la investigación como se muestra en la **Figura 10** el esquema general de la guía técnica, además se dividen dos secciones y un ítem:

- a. **Obtención de la data histórica:** En esta sección se obtiene la recopilación de datos del puente a estudiar que servirán como antecedentes para posteriores monitoreos.
- b. **Monitoreo tecnológico:** en esta sección se proponen los dispositivos de uso de acuerdo a los tipos de puentes, condiciones climáticas y otros fines de estudio. Además, la propuesta general de estudio del BHM.
- **Plan de monitoreo tecnológico:** en esta sección se proponen los lineamientos para la aplicación del BHM e IA con referencia a las dos secciones propuestas, las normativas nacionales e internacionales.

Figura 10. Contenido de la Guía Técnica



Nota: Elaboración Propia

Capítulo 5: Análisis de resultados.

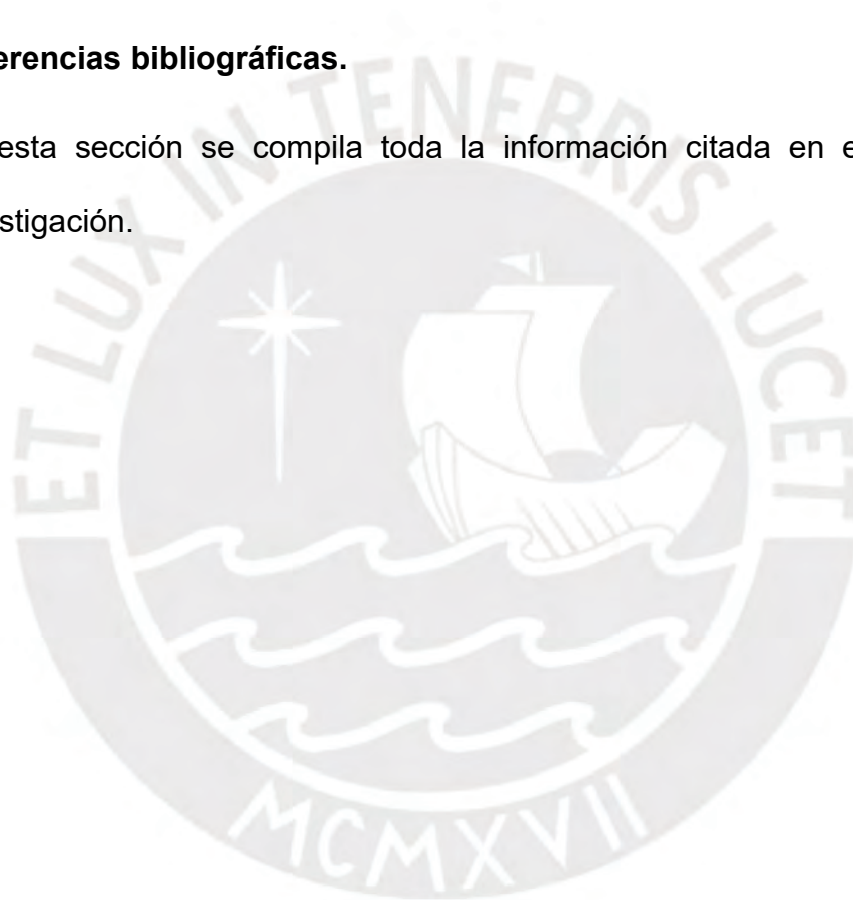
En este capítulo, se analiza la base técnica de toda la investigación, en el aporte de normativas dentro de la guía.

Capítulo 6: Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

En este capítulo se describe las conclusiones, recomendaciones y propuesta de trabajos futuros.

Referencias bibliográficas.

En esta sección se compila toda la información citada en el trabajo de investigación.

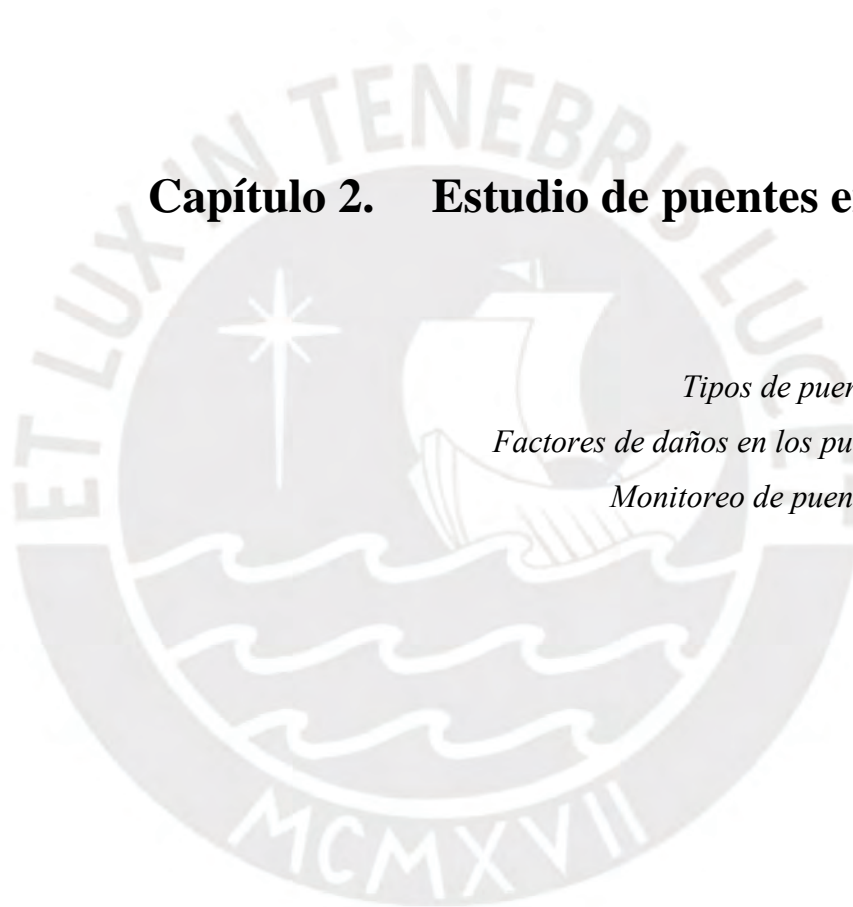


Capítulo 2. Estudio de puentes en el Perú

Tipos de puentes en el Perú

Factores de daños en los puentes del Perú

Monitoreo de puentes nacionales



El aumento de puentes colapsados en el Perú debido a las acciones de la naturaleza, del hombre y la baja operatividad de puentes ocasiona inestabilidad económica e inseguridad vial. En este capítulo se especifica el alcance de la investigación en el marco teórico de la problemática nacional referida a tipos de puentes, factores de daño, tipos de patologías y estudios de normativas nacionales con referente a monitoreos en puentes en el país. Se hace un recuento de la información de los reportes de instituciones como el INDECI, CONTRALORIA, MTC, PROVIAS e investigaciones referentes al monitoreo de puentes peruanos.

En la primera sección, se propone un estudio de la realidad peruana debido a la importancia del desarrollo vial que se acrecienta en los últimos años como se observa en la **Figura 4** y reportes de frecuentes colapsos como se observa en la **Figura 8**, por ello es importante conocer la tipología de puente tanto para la delimitación del estudio como para la planificación de la guía de monitoreo propuesta. En el país, se cuenta con el manual de puentes (MTC, 2016) y monitoreo (MTC, 2019a), con los cuales se tipifica el tipo de material, sistemas de construcción y elementos estructurales importantes para la primera sección de la guía.

En la segunda sección se describió los causales o factores de daños más relevantes y las consecuencias de daños suscitados a través de los reportes de entidades nacionales como el SENAMHI e INDECI. Los factores externos e internos son causales de daño mediante las fuerzas estáticas y dinámicas actuantes en la estructura de los puentes. Existen tres agentes importantes: la intervención humana, que involucra a ambos tipos de factores como sobrecarga, impactos y choques; agentes ambientales, como el fenómeno del niño, sismos, vientos, intensas lluvias, etc.; acciones estructurales los cuales afectan a las propiedades físicas y mecánicas de los materiales.

Finalmente, se estudió el actual monitoreo de puentes en el Perú, tanto la guía de inspección del 2006 y 2019, además las diferentes investigaciones realizadas definiendo el enfoque del monitoreo aplicado si este es tecnológico o tradicional. Adicionalmente se analizó la metodología del Sistema Computarizado de Administración de Puentes (SCAP) el cual actualmente es utilizado para el monitoreo de puentes nacionales.

2.1. TIPOS DE PUENTES EN EL PERÚ

A lo largo de la investigación, el término “tipología” puede verse variablemente confundido debido a diversas clasificaciones propuestas en el Perú por las entidades nacionales mediante los manuales y guías publicados con anterioridad. Por otro lado, en los últimos años, la construcción de infraestructuras viales observadas en la **Figura 11** como el puente de Nanay (tipo atirantado de longitud principal de 242 metros), puente Continental (tipo suspensión de longitud principal de 320 metros) y puente Maranura (tipo arco de longitud 420 metros) muestra la relevancia tanto a nivel tecnológico del proceso constructivo, diseños, material de puentes y objetivo de uso.

Figura 11. Puentes viales del Perú.

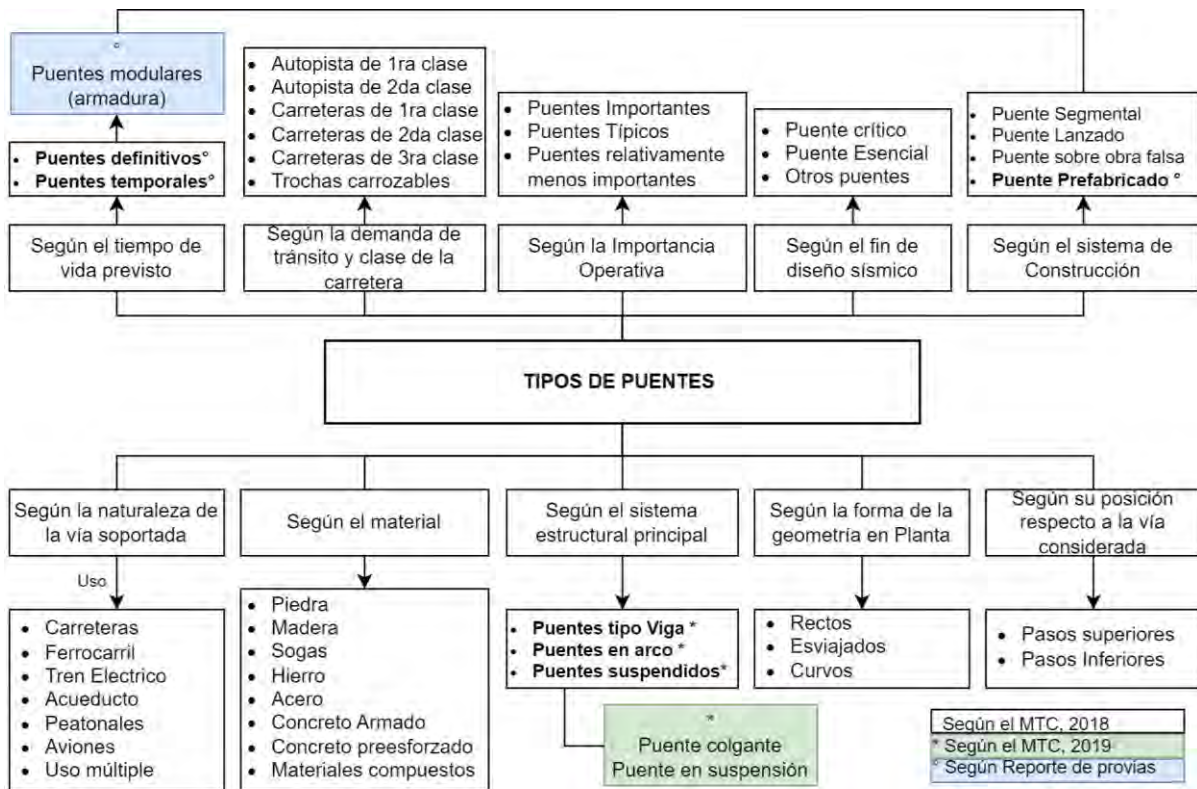


Nota. (a) Puente Nanay – Loreto (Extraído de La República, 2023) (b) Puente Continental – Madre de Dios (Extraído de Construcción Y Vivienda, 2021) (c) Puente Maranura – Cusco 202 m (Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2021)

En el Perú, existen puentes con materiales de rápido desgaste con gran aporte histórico como el puente en suspensión Tinkuqchaka - Ayacucho que viene

renovándose cada cierto tiempo (Valdez & Vivanco, 2021). También, existen puentes de concreto armado como se mostraron en la anterior figura y puentes de armadura implementados en caso de colapsos por desastres naturales. Por ello se estudia los tipos de puente acorde a las normativas existentes en el Perú. Según lo propuesto por el Manual de puentes del Perú aprobado por el RD N°19-2018-MTC/14 como se observa en la **Figura 12** con clasificación de 10 tipos de características de acuerdo al objetivo de uso o funcionalidad (MTC, 2018). Por otro lado, la guía de inspección comenta a más detalles sobre el ítem “según el sistema estructural principal” como se observa en el cuadro verde de la **Figura 12**, subdividiendo a los puentes colgantes en puentes atirantados y de suspensión (MTC, 2019a) con un sistema estructural de cables. Además, plantea otras tipologías como a porticados, reticulados y de alcantarilla las cuales, de acuerdo al sistema estructural, material o geometría podrían asemejarse a alguna de las clasificaciones de la **Figura 12**. Adicionalmente, reportes de Proyecto Especial de Infraestructura de Transporte Nacional del 2018 al 2022 definen su estructuración “según el tiempo de vida previsto” encuadro azul de la **Figura 12**, en el cual muestran a los puentes definitivos y modulares por el tiempo de vida útil. Estos influyen indirectamente a los puentes prefabricados de uso en caso de desastres naturales (PROVIAS, 2022) que la mayor parte de ellos se quedan de manera permanente. Dichas estructuras son mayormente caracterizadas por ser de tipo armadura por ello se le da la relevancia de estudiarla como una tipología más de la guía.

Figura 12. Esquema de tipos de puentes en el Perú

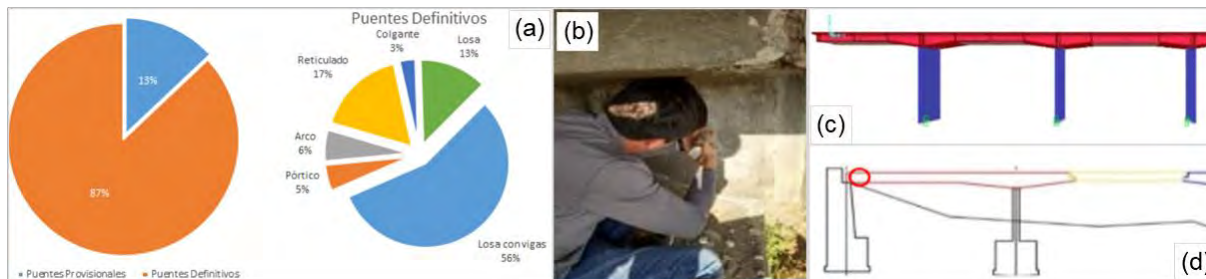


Nota. Según el Manual de Puentes del Perú (Adaptado de MTC, 2018, 2019; PROVIAS, 2022)

Investigaciones recientes muestran que los puentes tipo viga losa, colgantes, reticulados, arco y pórticos son de mayor demanda existente en el país, otro estudio analiza los materiales con propiedades que perduren a lo largo de los años entre los tipos propuestos en la **Figura 12** y los más comunes existentes de acuerdo a la **Figura 13 (a)** en la que muestra un reporte de tipos de puentes mayores a 100 metros de luz (Velazco, 2022). Por otro lado, los estudios de monitoreo de puentes más usados son los métodos numéricos e inspección visual planteada por el MTC (Bardales, 2012; Salcedo, 2021). Mientras que otras investigaciones han mejorado la aplicación de esta, implementando instrumentos o etapas del SHM para mejorar la metodología de monitoreo como se muestra en la **Figura 13 (b), (c) y (d)** (Calla, 2020; Escudero et al., 2022; Flores, 2020; León et al., 2022; Palomino, 2022). En ambos casos los puentes a monitorear más tradicionales fueron los puentes tipo

viga, atirantados y arco esto refleja un margen de antecedentes para la implementación de una guía.

Figura 13. Análisis de puentes en el Perú



Nota. (a) Estadística de puentes en el Perú (Velazco, 2022) (b) Ensayo de compresión no destructivo in situ esclerómetro del puente Moche (c) Análisis Numérico del puente Moche (d) Ubicación de punto de ensayos (Escudero et al., 2022)

Los detalles de la caracterización a la estructura esta detallado en el Manual de Puentes del 2019. Tiene una relación de elementos codificados en su **Anexo III: “Toma de datos de la Inspección”**, por ello se debe realizar una tipología de puentes enmarcando y delimitando de acuerdo al tipo de puente. Estudios recientes de aplicación del monitoreo de la salud estructural de puentes con los métodos de identificación de daño y el tipo de materiales comúnmente usados son los menos usados en el monitoreo de puentes en el Perú. Finalmente, con lo descrito anteriormente se plantea la implementación de bases para los puentes tipo viga, armadura, arco, atirantados y en suspensión.

2.1.1. Puente tipo viga

Para los tipos de puentes en viga se observa en la **Figura 12** los objetivos según su uso de vía soportada abarca al vehicular, ferroviario y peatonal cuyas características clásicas de materiales son en mayor cantidad el concreto armado, concreto pre-esforzado y materiales compuestos de la clasificación del manual de puentes del Perú (MTC, 2018). En el país, los puentes tipo viga tienen finalidad de uso para carreteras, trenes eléctricos y peatones. Además, de acuerdo a la funcionalidad, el

nivel de importancia y material, estos puentes pueden ser monitoreados con un plan de acción adecuado. Por lo general, es importante usar concreto, acero de refuerzo y acero estructural en la ejecución de este tipo de puentes. Muestra de ello son los puentes mostrados en la **Figura 14**, cuyas finalidades para el uso de carreteras como el puente Venados de 350 metros de longitud, trenes ferroviarios como el puente del metro de Lima y el de uso peatonal como el puente ubicado en la Costa Verde de Lima; son considerados como referentes del desarrollo económico y tecnológico en el país.

Figura 14. Puentes tipo viga en el Perú



Nota. (a) Puente Venados – Piura de 350 m. (Extraído de Samayca Ingenieros, 2021). (b) Puente del metro de Lima (Linea 1 del Metro de Lima, 2019). (c) Puente peatonal de la Costa Verde de Lima. (Extraído de Perú21, 2021)

2.1.2. Puente armadura

Para los tipos de puentes armadura, según PROVIAS registra un mayor porcentaje de puentes modulares y definitivos constituidos netamente por acero y en otros casos por la combinación de la losa de concreto y tijerales de acero. En la **Figura 13 (a)** se pudo observar que el 13% de puentes con luces mayores a 100 m son de tipo provisional o modular. En dichos casos, como se muestra en la **Figura 15 (b)** se utilizan puentes como el Bailey o Acrow con secciones de paneles prefabricados que requieren el ensamblaje inmediato como solución ante un colapso de un puente definitivo. Mientras que otros puentes como se muestra en la **Figura 15 (a)** cuyas propiedades de acero, sección tipo viga losa y longitud de puente la caracterizan de un tipo definitivo.

Figura 15. Puentes en armadura en el Perú



Nota. (a) Puente Pachitea – Huánuco de longitud total 356 m (Extraído de CESMA, 2016). (b) Puente Bailey – Virú de 112 m de longitud (Extraído de MTC, 2019b)

2.1.3. Puente en arco

Para los tipos de puentes en arco se observa en la **Figura 12**, tipos de materiales con características clásicas de concreto armado, concreto pre-esforzado y materiales compuestos como piedra, ladrillo, soga, etc (MTC, 2018). En la **Figura 16** se muestran los diferentes tipos de materiales utilizados: Caso del puente Maranura con un arco de concreto armado en la parte inferior de la losa. Por otro lado, el puente Bolognesi tiene la característica mampostería a base de sillar en arco antiguo, este puede colapsar ante un sismo fuerte ya que ni tiene la capacidad de soportar deformaciones por el tipo de unidad estructural que lleva (UCSP, 2021). En cuanto al puente Ñaña, consta de tres arcos metálicos paralelos conectando los distritos de Chaclacayo y Lurigancho – Chosica (Perú Construye, 2018a).

Figura 16. Puentes en arco en el Perú



Nota. (a) Puente Maranura – Cusco de 202 m. (Extraído de MTC, 2021) (b) Puente Bolognesi – Arequipa de 484 m (Extraído de UCSP, 2021) (c) Puente Ñaña - Lima de 70 m. (Extraído de Perú Construye, 2018)

2.1.4. Puente atirantado

El puente más largo del Perú es del tipo atirantado, el puente Nanay el cual consta de 2,283 m de longitud total aporta valor económico y tecnológico con pilares de concreto armado, losa de acero y concreto, tirantes de acero. Las características del puente Bellavista y Atumpampa son similares a la de Nanay como se muestra en la **Figura 17**, aunque la arquitectura varíe, la funcionalidad y el sistema estructural mantienen por ello la característica peculiar de estos puentes es usar tanto concreto armado para los pilares y losa además el uso del acero en tirantes que conectan dichos elementos estructurales.

Figura 17. Puentes atirantados en el Perú



Nota. (a) Puente Nanay – Loreto Longitud principal 2300.5 m. (La República, 2023) (b) Puente Bellavista – San Martín 320 m (Construcción y Vivienda, 2021b). (c) Puente Atumpampa– San Martín 74 m. (Construcción y Vivienda, 2016).

2.1.5. Puente en suspensión

Los puentes atirantados y en suspensión se encuentra en una sola categoría (MTC, 2018), pero debido a la funcionalidad y comportamiento estructural estos se proponen como dos tipos de puentes para la guía propuesta. Las características de estos puentes es tener pilares de acero y concreto armado con un sistema de cables de acero suspendiendo a la losa mediante estos. En el Perú, contamos puentes de gran envergadura como se muestra en la **Figura 18**, el puente Continental de 723 m de longitud ubicado en Madre de Dios y el puente Perené de 102 m de longitud ubicado en Junín.

Figura 18. Puentes en suspensión en el Perú



Nota. (a) Puente Perené – Junín 102 m. (Perú Construye, 2018b) (b) Puente Continental – Madre de Dios, Longitud Principal 723 m. (Construcción y Vivienda, 2021a).

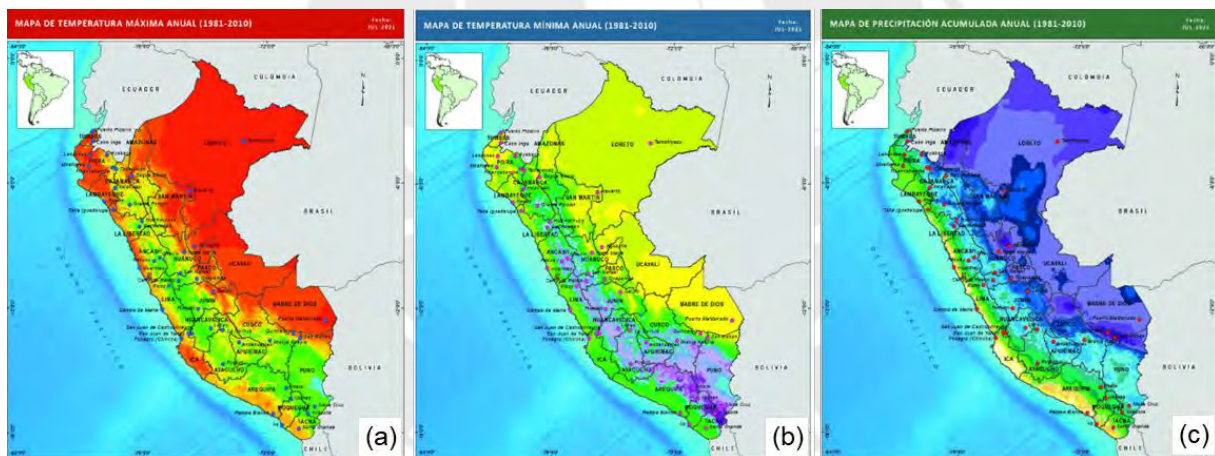
Finalmente, se proponen los puentes tipo viga, armadura, arco, atirantado y en suspensión dentro de los alcances e investigaciones recientes planteadas con metodologías de monitoreo, características en materiales y sistemas constructivos. Por lo cual, dentro de la guía propuesta se recopilan estos métodos de identificación de daños, uso de sensores, procesamiento de datos y otras tecnologías desarrolladas en la IA de acuerdo al material de uso. Para ello, se constituyen los materiales de concreto (concreto armado, concreto pre-esforzado y materiales compuestos), mampostería (piedra, sillar, ladrillo, etc.), madera y acero. Cabe resaltar que el material como la soga no se estipulan dentro del presente estudio debido a la corta durabilidad del material. Con lo estipulado se requieren tipos de instrumentos de monitoreo más sofisticados para ello se requiere el conocimiento de factores de daño.

2.2. FACTORES DE DAÑOS EN LOS PUENTES DEL PERÚ

En el Perú al tener una diversidad geográfica con el trópico y la cordillera de los andes muestran una variedad de climas, para ser exactos el país posee 38 tipos climas que fue clasificado por el método de Clasificación Climática de Warren Thornthwaite (SENAMHI, 2020b). Además, es un país megadiverso porque cuenta con el litoral costero, cordillera de los Andes y la variedad climatológica (Córdova

Krugg, 2022). Esto muestra que existen factores naturales que desgastan las infraestructuras viales. El deterioro estructural de los puentes se puede ocasionar gradualmente modificando la propiedad de durabilidad en los materiales o repentinamente por medio de desastres naturales (Calvert et al., 2021). En la **Figura 19** se muestra el mapa de temperaturas mínimas, máximas y precipitaciones en el Perú, estos agentes afectan directamente a los instrumentos de monitoreo generando ruido difícil de procesar en muchos de los casos, por ello estos agentes se mencionarán más adelante como parámetros de entorno. Aunque en el Perú existan varios climas, se debe tomar en cuenta la estación del año, la geografía de la zona, humedad, precipitaciones, vientos, etc. Por ello se debe estudiar los reportes emitidos por el SENAMHI en predicción de parámetros medioambientales.

Figura 19. Parámetros de entorno en el Perú



Nota. (a) Mapa de temperatura máxima anual (SENAMHI, 2021). (b) Mapa de temperaturas mínima anual (SENAMHI, 2021). (c) Mapa de precipitaciones acumuladas anual (SENAMHI, 2021).

Al definir uno de los problemas de colapsos de puentes, se observa a la naturaleza como una de las causas que ocasiona daños en los puentes, estos se definen como factores externos. Además, un estudio revela fallas en puentes en función a la causalidad (Alarcón et al., 2016):

- (i) Por las personas, definiendo la sobrecarga, diseño estructural, proceso constructivo. Por ejemplo: el caso del puente Topara en Chincha cuyo reporte muestra que el colapso se suscitó por incongruencia en la calidad de la construcción como se muestra en la **Figura 21** (CONTRALORÍA, 2016), el puente de Kutinachaca – Ayacucho 2022 donde se encontró materiales defectuosos, fatiga de materiales e inadecuados cálculos estructurales como se muestra en la **Figura 8 (b)** (Redacción RPP, 2022) y el puente San Pedro de Lurín como se muestra en la **Figura 20 (a)** en la que por la falta de mantenimiento y la sobrecarga del camión afecto a los pilares del puente.
- (ii) Por parámetros de entorno como fenómenos naturales, terremotos, socavación y otros desastres naturales que tiene características en el territorio peruano. El fenómeno del niño ha reportado 446 puentes colapsados uno de los casos fue el puente Solidaridad del 2017 como se muestra en la **Figura 5** (INDECI, 2017). Mientras que existen puentes actuales, también se observa la vulnerabilidad de puentes históricos como se muestra en la **Figura 20 (b)** cuyos factores ambientales fueron los causales de colapso en el puente colonial de Puno.

Figura 20. Puentes colapsados por factores de daño.



Nota: (a) Puente San Pedro ubicado en la Panamericana Sur - Lurín (Perú21, 2019). (b) Puente Colonial se cae a pedazos debido a fuertes lluvias en Lampa - Puno (Redacción Diario Correo., 2022)

Por ello se propone caracterizar a los factores internos por la variación interna de la estructura que sean acciones al paso del año o intervención en el proceso de la ejecución del año y externo por algún agente ambiental o fuerza externa que genere colapso inmediato.

2.2.1. Factores Internos

Existen varios factores de daño que afectan a la variación interna de la estructura. Factores que afectan a través de los años a las propiedades físicas como durabilidad, resistencia, adherencia mediante medios como la humedad, presencia de salinidad, etc., son mencionados como acciones estructurales. En cuanto al segundo punto, la intervención humana da idea a los cálculos inadecuados que pueden causar sobrecarga y fatiga estructural generando colapso inminente al puente.

a. Acciones estructurales.

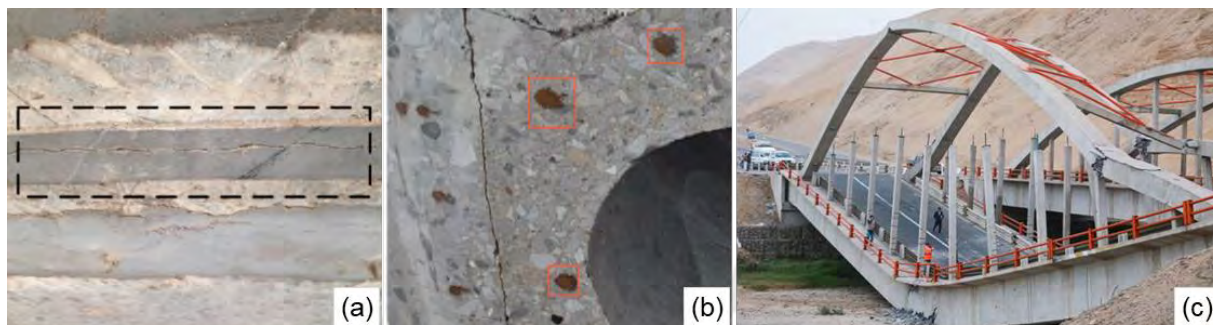
Pueden variar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales por ejemplo en la propiedad de durabilidad y fatiga debido al desgaste generan grietas como se muestran en la **Figura 21 (a)**, otros materiales como el acero son débiles ante la presencia de salinidad en el medio ambiente generando corrosión como se observa en la **Figura 21 (b)**.

b. La Intervención Humana.

Se consideran a los agentes que generen choques o incendio y provoque el colapso inmediato. En la **Figura 21 (c)** se muestra al Puente Topará en el que reporto el choque de un camión a uno de los laterales del puente y la mala ejecución del proyecto (CONTRALORÍA, 2016), otros problemas pueden ser mala calidad de materiales, inadecuados cálculos, no realizar un adecuado mantenimiento luego de

hacer el monitoreo del puente. Por ello, se considera a la intervención humana dentro de los factores internos y externos con la diferencia de cargas estáticas y dinámicas.

Figura 21. Consecuencia de factores internos



Nota. (a) Grieta transversal de la losa de puente (Jiang et al., 2023). (b) Grado de corrosión de las barras de refuerzo (Jiang et al., 2023). (c) Puente Topará (El Comercio, 2015)

2.2.2. Factores externos

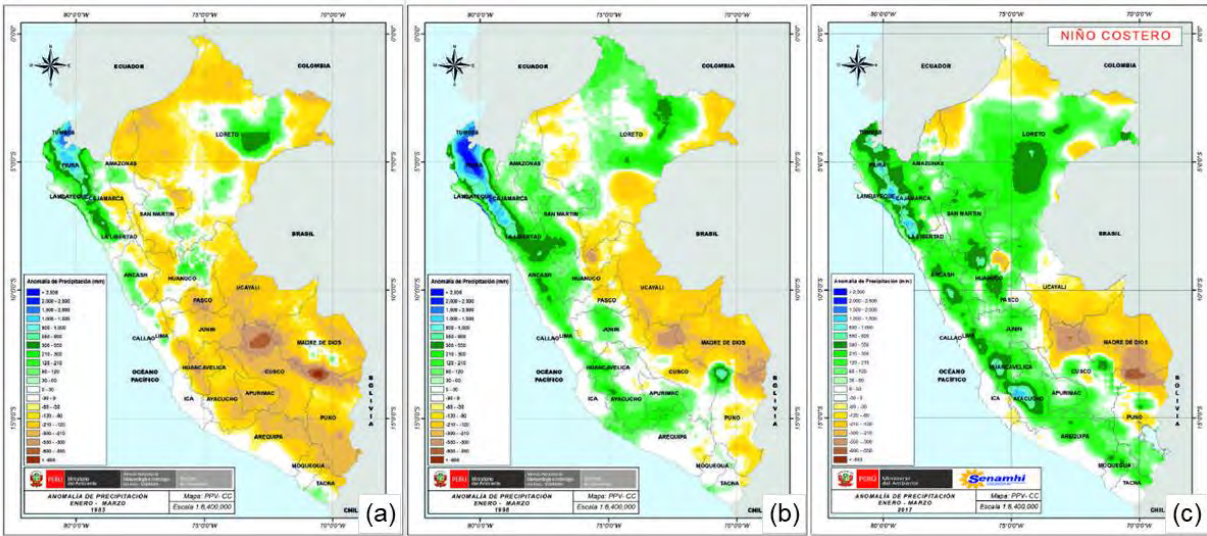
Se consideran los factores externos a activos que aquejan de manera inmediata generando colapso en los puentes, para esta clasificación se toma en cuenta efectos medioambientales. El fenómeno del niño, es uno de los más recurrentes año tras año que afecta a los puentes la costa y sierra del Perú. Mientras que los sismos y la geología peruana en la selva han generado mayores daños en la infraestructura vial. Finalmente, se consideran el estudio de otros efectos medioambientales como nieve, vientos fuertes, etc.

a. Fenómeno del niño

El fenómeno del niño ha afectado de mayor porcentaje a la costa central y el norte del país produciendo inundaciones como el caso del valle del Río Casma en el que se identificó sedimentación acumulada durante el Holoceno (Macharé & Ortlieb, 1993). La intensidad con la que ocurre este fenómeno puede afectar a diversos actividades o sectores siendo el transporte uno de ellos al verificar que se ha destruido carreteras y puentes con este fenómeno (Hijar et al., 2016). Se puede

observar en la **Figura 22** el comportamiento en precipitaciones del fenómeno del niño de los años 1983, 1998 y 2017 en los cuales fueron de intensidad extraordinario como se muestra en la **Figura 23**. Dichas anomalías producen como en 1983 demasiada sequía en el sur y precipitaciones altas en Tumbes y Piura; en 1998 con un comportamiento similares incrementando a Lambayeque dentro de la lista; en 2017, con mayores precipitaciones en el norte y el litoral peruano.

Figura 22. Comportamiento del fenómeno del niño del Perú

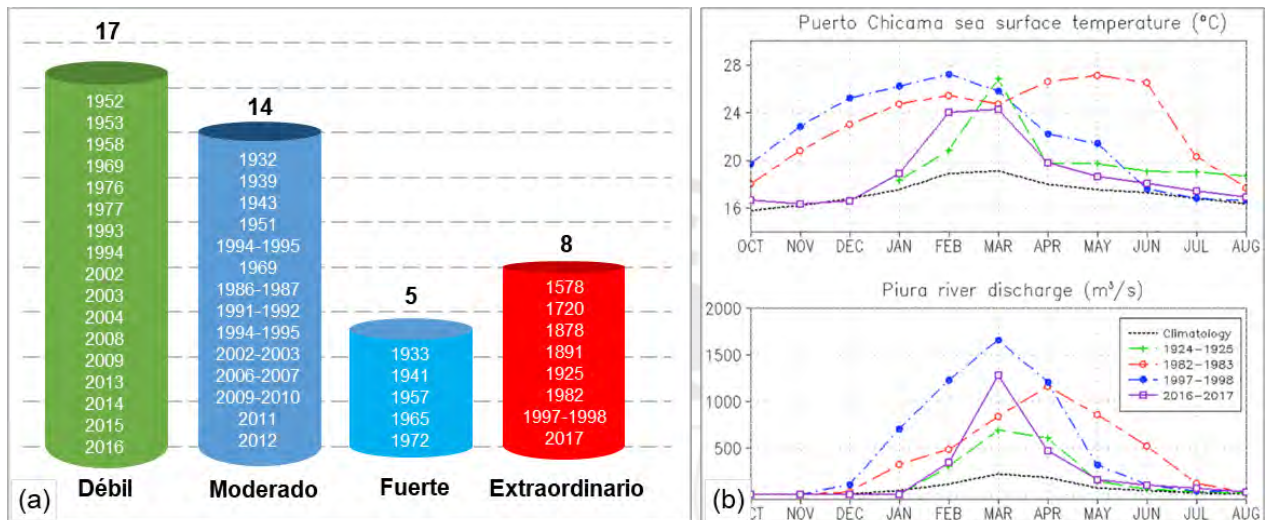


Nota: Anomalías en las precipitaciones del fenómeno del niño del Perú. (a) En el año 1983 (b) En el año 1998 (c) En el año 2017 (SENAMHI, 2021).

El INDECI reportó la intensidad de ocurrencia del fenómeno desde 1578 hasta el 2017 como se muestra en la **Figura 23 (a)**. Por ello, un estudio refleja las características del evento su citado el 2017 que afecto directamente en lo económico posicionándolo como el tercer episodio de El Niño más fuerte y reportes climatológicos. Los puentes generan la conexión entre ciudades cruzando ríos, lagos y mares, por ello el agua es un factor de estudio. En el Perú se realizó el análisis en el comportamiento del río Piura según el fenómeno del niño del 2017 para conocer los meses de mayor y menor caudal (Yglesias-González et al., 2023). Al observar la **Figura 23 (b)** podemos constatar que en los años 1997-1998 y 2017 de intensidad

fuerte es reflejada en la variación de la temperatura en los meses de febrero y marzo, además el incremento de caudal se genera los meses de marzo y abril afectando a la zona costera ya que esta se encuentra cerca la ocurrencia del fenómeno del niño.

Figura 23. Reporte del fenómeno del Niño en el Perú



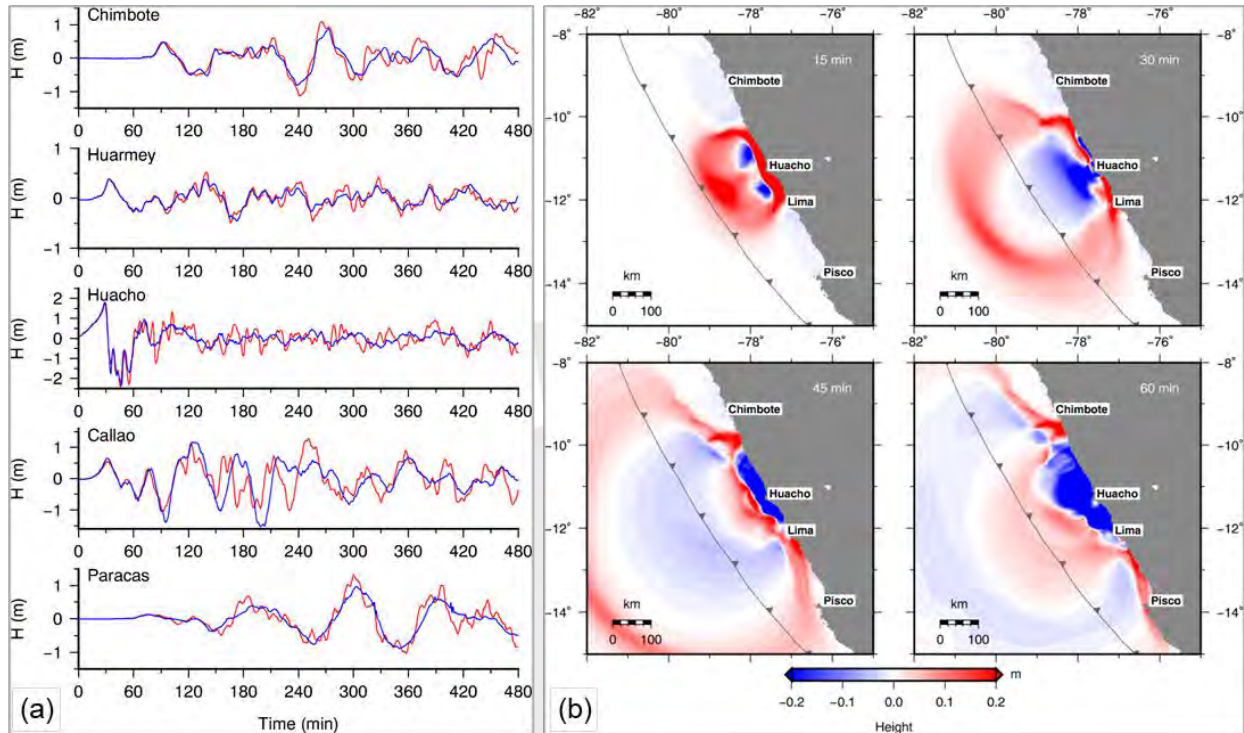
Nota. (a) Intensidad del Fenómeno del Niño en el Perú desde 1578 al 2017 (INDECI, 2017). (b) Calentamiento del océano costero del Puerto Chicama y medida de caudal del río Piura desde 1924 al 2017 (Yglesias-González et al., 2023).

b. Sismos, terremotos y tsunamis.

La región es sísmicamente activa debido a la convergencia de la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana experimentado una serie de terremotos y tsunamis que han causado pérdidas de vidas humanas y daños importantes a la infraestructura (Das et al., 2020). Muchos de estos casos quedan como precedentes que afecten directamente a los puentes. Los casos de los años 1940, 1966, 1974 y 2007 produjeron terremotos y tsunamis en diferentes lugares del país Por ello, realizaron simulaciones numéricas para obtener las fuentes sísmicas y la propagación del sismo de 1940 (Jiménez & Moggiano, 2020), como se muestra en la **Figura 24**. Se aprecia los puntos de estudio para ver la propagación e impacto del

sismo en la zona costera aledaña para ver el grado de influencia en el sector que ocurrió el sismo.

Figura 24. Estudio del sismo y tsunami de 1940 en Perú.



Nota. (a) Ondas sintéticas del tsunami de las ubicaciones de las estaciones de mareas de Chimbote, Huarmey, Huacho, Callao y Paracas para dos modelos de tsunami: el modelo lineal (línea roja) y el no línea (línea azul) (Jiménez & Moggiano, 2020). (b) Propagación del tsunami de 1940 medido en tiempos de 15, 30, 45 y 60 min. El color rojo representa los valores máximos de altura de ola (m) y color azul representa los valores mínimos (Jiménez & Moggiano, 2020)

En esta investigación muestra la vulnerabilidad del territorio ante sismos y tsunamis, por ello antecedentes como el sismo de 4.3 grados de magnitud del 2017 en la provincia de Huancayo tuvo su epicentro en el distrito de Andamarca con un puente peatonal de concreto colapsado (RCR, 2017). En el 2019, se suscitó un sismo de 8.0 grados de magnitud en Loreto, las infraestructuras viales se vieron afectadas las fallas geológicas de la zona, la magnitud del sismo y el tipo de suelo al que se caracteriza la zona viendo un comportamiento característico de la falla en la capa asfáltica (CNN, 2019). En el 2021, se registró un sismo con una magnitud $M_w = 7.5$ en la región de Amazonas cerca al poblado de Sta. María de Nieva,

Condorcanqui – Amazonas (Bedriñana, 2021). Además, en la **Figura 25** se puede ver las consecuencias de estos sismos ante las infraestructuras viales, teniendo factores similares en común del tipo de suelo, clima, humedad, fallas geológicas, etc.

Figura 25. Colapso de infraestructura vial por sismos en el Perú



Nota. (a) Colapso de puente peatonal de la provincia de Huancayo -distrito de Andamarca. Extraído de (RCR, 2017) (b) Daños en carretera Cajamarca a Cajabamba debido al sismo de Loreto del 2019 (Extraído de (Redacción Gestión, 2019)) (c) Vía afectada por el terremoto en Amazonas. Extraído de (Bedriñana, 2021)

c. Otras acciones medioambientales

La existencia de otros desastres naturales como las lluvias recurrentes los cuales generan flujo de detritos reflejan el estudio no solo del fenómeno del niño, sismos o tsunamis, sino también de otros activos que puedan afectar directa o indirectamente al colapso de puentes. Existen tecnologías satelitales para poder monitorear de mejor manera los desastres naturales, mas no existe el hecho de anticipar ni reducir la incertidumbre (Córdova Krugg, 2022). Por ello, en la investigación se menciona para las acciones medioambientales como nieve, hielo, socavación, vientos, fuego, choques, etc. Estos activos son los que más han afectado a los puentes peruanos y nivel mundial en los últimos años.

2.3. MONITOREO DE PUENTES NACIONALES

En las últimas décadas, muchos investigadores han tratado de predecir el comportamiento estructural de puentes sometidos a diversos factores naturales o intervenidos por la mano del hombre. La evaluación del comportamiento sísmico del

Puente Villena – Lima de 80m. mediante el desempeño muestras que la estructura tiene la capacidad suficiente para resistir a cargas permanentes y sobrecargas vehiculares (Salcedo, 2021). Ciertamente el estudio actualmente aplica para verificar el comportamiento ante sismos, dichos datos fueron corroborados mediante una inspección visual dejando con la incertidumbre de una adecuada caracterización de propiedades físicas de los materiales mediante instrumentaciones actuales (sensores). La inspección visual puede detectar daños en la superficie como grietas, desbocamientos del concreto, corrosión de los aceros, componentes parcialmente fallidos que detectan incrustaciones de elementos, daños menores, grietas por fatiga y delaminación (An et al., 2019). Según investigaciones, la inspección tradicional limita el uso de metodologías nuevas y genera resultados con mayor tasa de incertidumbre de falla (Ahlborn et al., 2010; Calvert et al., 2021; Delgadillo, 2022). Ante esto, la inspección visual se ha aplicado para un estudio generalizado de las estructuras recopilando datos generales.

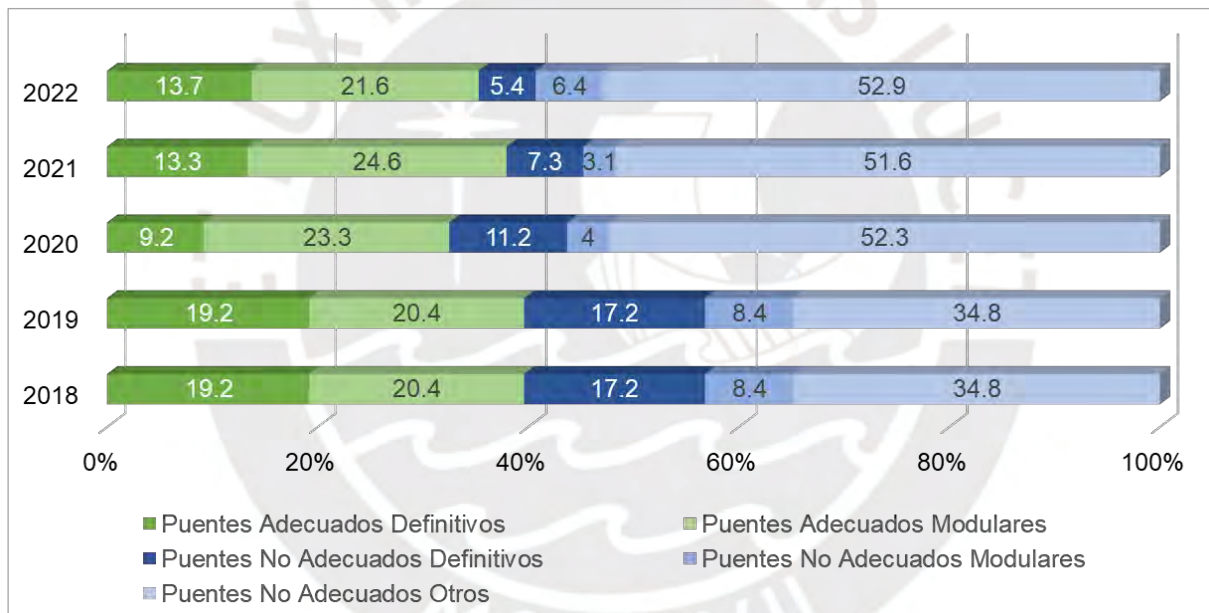
En el país existen reportes del PROVIAS (2022) en el que muestran datos y tipos de puentes con condiciones estructurales en funcionamiento adecuado e inadecuado, por ello, se describen los tipos de puentes contemplados en esta clasificación:

- (i) Primero, los puentes modulares de características de una estructura moderna de material concreto armado y acero que por lo general son utilizados para reemplazar inmediatamente en algún puente colapsado
- (ii) Segundo, en los puentes definitivos que de acuerdo al diseño de cargas previas a exigencia de tráfico actual (48 Ton.) se toman con referencia al tiempo puesta en obra menor o mayor a 30 años.

(iii) Tercero, existen otros tipos de puentes que contemplan los materiales de fácil degradación o características diferidas a las otras como maderas, sogas, piedra, etc.

En la **Figura 26**, se puede observar que las tonalidades verdes son el porcentaje de puentes en buen estado por el contrario de la parte azulada que es el porcentaje de puentes no adecuados, por otro lado, se observa un mayor porcentaje de puentes no adecuado de tipo “otros” la cual la mayor parte son maderas, piedras, sogas, etc.

Figura 26. Estado de los puentes peruanos del 2018 al 2022



Nota. Elaboración propia adaptado de los reportes (PROVIAS, 2022)

En el país se ha mencionado la constitución de materiales de estructuras existentes mediante el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) E.060 Concreto armado. Cabe mencionar que el **“Capítulo 20. Evaluación de la resistencia de estructuras existentes”** analiza al concreto armado mediante evaluación de incrementos de carga y cargas cíclicas para la constitución del material (VIVIENDA, 2019a). Existen la metodología SCAP del MTC para el monitoreo de puentes

mediante la inspección visual. Dicha metodología es aplicada para el monitoreo del puente Huallaga – Huánuco resultando un estado de REGULAR a BUENO como se puede apreciar en la **Figura 27 (a) y (b)** (Vela, 2020), mientras que Pecho (2017) propone un sistema de gestión de puentes mediante la actualización del SCAP como punto de partida. Por otro lado, la aplicación de estudios de modelamiento estructural del puente Andrés Avelino Cáceres de 120m en Piura mostró cuatro posibles escenarios de daño previniendo los tipos de fallas ante posibles activos que erosionen la estructura (Salinas et al., 2022). Dichas investigaciones reflejan el avance en el monitoreo de puentes en el Perú desde un contexto visual, gestionando la metodología mediante el SCAP y finalmente el uso de modelamientos estructurales mediante softwares.

Figura 27. Puentes monitoreados en el Perú.



Nota. (a y b) Inspección visual del puente Huallaga- Huánuco (Vela, 2020). (c) Caso de estudio del Puente Andrés Avelino Cáceres de 120m en Piura (Correo, 2019)

En cuanto a las normativas aplicadas en el Perú se puede apreciar en la **Figura 28** la línea cronológica de implementación de normas involucradas a los puentes. En el 2003 el MTC propuso el “Manual de Puentes” para el diseño y formulación de estas infraestructuras cuya última actualización es la del 2018 además estas normas están orientadas a los lineamientos que se actualizan en el AASHTO LRFD (MTC, 2018). Para el 2006, el MTC crea la Guía para la inspección de puentes con la metodología visual y tradicional, en esta sección se propone el monitoreo con rangos mientras que la segunda actualización del 2019 menciona en

un ítem la probabilidad que en algún momento se vea el “monitoreo de la salud estructural de puentes” mas no menciona la aplicación y metodología (MTC, 2006, 2019a). Para el 2008, el MTC propone generar un reglamento nacional en el que recopila los manuales, guías y leyes que tenga que ver con el ámbito vial generando el “Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial” en donde se pueden encontrar la mención al manual de carreteras, guía de inspección de puentes, manual de túneles de carreteras, etc. Por otro lado, en el 2018 el MTC actualizó el manual de carreteras implementando la sección de mantenimiento y conservación vial, dándole al país la importancia de preservar infraestructuras viales a lo largo de los años.

Figura 28. Línea cronológica de normativas referente a los puentes en el Perú



Nota: Elaboración propia del esquema muestras las normativas que tienen relación directa a los puentes en el Perú.



Capítulo 3. Estudio del monitoreo de la salud estructural de puentes e inteligencia artificial

Importancia del monitoreo de la salud estructural de puentes (BHM)

Inteligencia artificial aplicado al monitoreo de puentes

Estudio de normas internacionales con implementación del SHM en puentes

El monitoreo tecnológico se está implementando a nivel mundial debido a la vulnerabilidad de los puentes y sus colapsos recurrentes, por ello la metodología BHM ha revolucionado el monitoreo de puentes. Mientras que la IA sirve como herramienta de automatización para el desarrollo y análisis de datos como también para la ubicación de sensores y otros dispositivos de monitoreo. A nivel mundial existen lineamientos que parametrizan el uso de tecnología propuesta por el BHM y el Perú la nueva ley del uso de la IA para fines del desarrollo económico y social dan paso al desarrollo de la guía propuesta.

En la primera sección de este capítulo se presenta la importancia del monitoreo de puentes, por ello se estudia el análisis del ciclo de vida en cada fase del puente, además se estudia al BHM, su historia e importancia a nivel mundial. Dentro de la aplicación BHM se aplican tecnologías nuevas como sensores y otros instrumentos no destructivos que permiten conocer por medio de la obtención de data la constitución del material. Para el procesamiento de la data se requiere de algoritmos de IA por ello en la segunda sección del capítulo se estudia como la IA, se ha aplicado en el BHM. Finalmente, se realiza un estudio de las normativas de nivel mundial en monitoreo de puentes tradicional, tecnológico y la aplicación de leyes en IA.

3.1. IMPORTANCIA DE MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE PUENTES (BHM)

3.1.1. Ciclo de vida de un puente

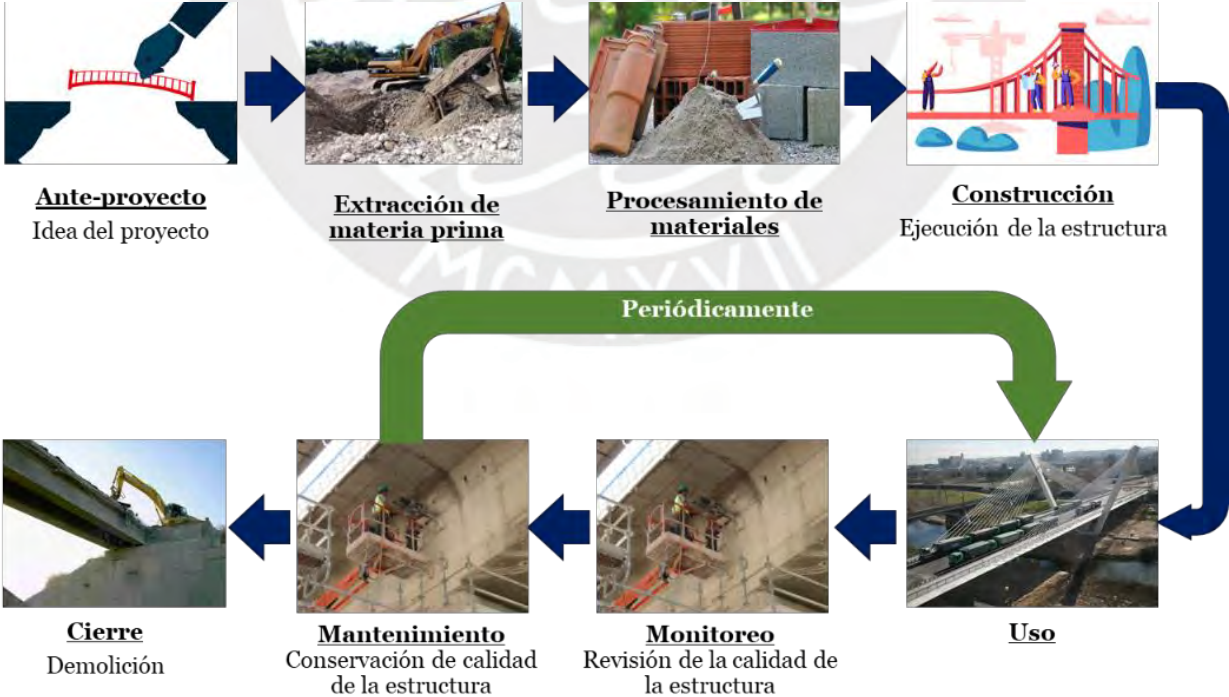
Un puente obsoleto no es necesariamente considerado que este colapsado sino que aún se encuentre en operatividad, pero por debajo de los estándares de diseño estructural que el país estipule (Hawk, 2002). Mientras que han surgido una

gran variedad de definiciones para el análisis el ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés Life Cycle Analysis), esto se precisa como el análisis de las fases que se ejecutan mediante procedimientos enmarcando el inicio hasta el final del proyecto (Project Management Institute, 2021). Por ello existe un incremento en el interés por la necesidad de mejorar los servicios de transitabilidad, esto ha forjado el inicio de la investigación del ciclo de vida (LC por sus siglas en inglés Life Cycle) de los puentes y el costo de análisis de estos. Es importante realizar el LCA de los puentes para determinar la fase crítica, mejorar las estrategias de solución de problemas y posibles recursos a usar de acuerdo a la fase definida (Calvert et al., 2021). Por ello definimos que el LC es un conjunto de etapas interrelacionadas desde la adquisición de materias primas hasta la disposición final o demolición (ISO, 2006). Para el ámbito de la gestión de proyecto de puentes en el Perú tomamos en cuenta las definiciones básicas dadas por la Guía del PMBOK (por sus siglas en inglés Project Management Body of Knowledge) del 2021, estos constan de las 6 fases: viabilidad, diseño, construcción, prueba, despliegue y cierre. Haciendo el énfasis en las fases de construcción en donde la infraestructura empieza a tomar forma desde la extracción de materia prima hasta la ejecución del diseño puesto en obra; la prueba, donde se verifica a calidad de materiales y comportamiento estructural del diseño además que en la actualidad se reconocen como los primeros monitoreos de toda la estructura; el despliegue, en esta fase se sitúa el uso a la estructura con un diseño de acuerdo a la duración de tiempo de vida útil y mantenimientos con la que se ha gestionado; el cierre, en esta fase se realiza la demolición y fin de la infraestructura previo estudio de la misma.

Se plantea un LC como se muestra en la **Figura 29**, reconociendo la fase de ante proyecto como la idea del proyecto y la formulación del expediente de la

infraestructura a construir, extracción de materias primas, procesamiento de las materias primas para generar los materiales de construcción, la ejecución del proyecto, uso, monitoreo, mantenimiento y la demolición. Al orientar estas 8 fases enmarcadas por la línea azul con la consideración de un solo mantenimiento y monitoreo durante su ciclo de vida, genera un enfoque lineal de LC que limita la economía y el medioambiente (Gassner et al., 2020). Además, se trazó los límites de nuestro estudio en cuento al ciclo de la vida de un puente con referencia al monitoreo de salud estructural el cual interviene cuando una estructura comienza a ejecutarse, utilizarse y finalizar con la demolición por ello en el siguiente ítem se estudia acerca del SHM en puentes. Ya que nuestro estudio se enfoca en el mantenimiento de puentes, esto ocasiona considerar un ciclo en un lapso de tiempo en que involucre el uso, monitoreo y manteniendo como se aprecia en la flecha verde.

Figura 29. Ciclo de vida de un puente.



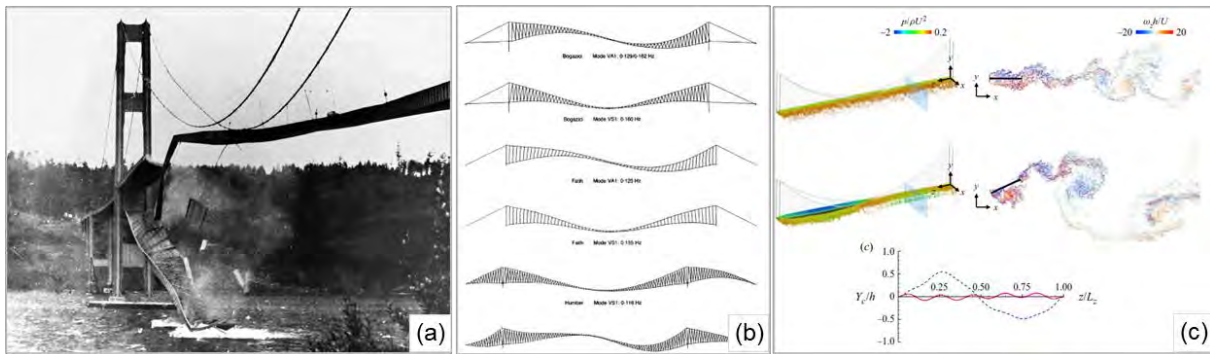
Nota. Elaboración propia, adaptado de los lineamientos del PMBOK y estudios de SHM

Si bien es cierto que la rama del LCA es muy poco conocida, este trabaja de la mano del SHM ya que ambos se centran en el fin de verificar la condición, capacidad de servicio y seguridad estructural (Calvert et al., 2021). Adicionalmente, el LCA también estudia los costos previstos de la infraestructura para su mantenimiento, por ello, se realiza un estudio del costo de monitoreo de puentes en el Perú como parte de las recomendaciones.

3.1.2. Monitoreo de salud estructural en puentes a nivel mundial (BHM)

Al existir el monitoreo visual o la inspección visual (VI) se ha reconocido que la condición física de los puentes depende de la capacitación del ingeniero y su criterio (Omar & Nehdi, 2018). El primer caso que se considera como el antecedente histórico que ha reflejado la importancia del monitoreo fue el colapso del puente Tacoma Narrows en 1940 cuyas investigaciones revelaron una falla de diseño estructural (Song et al., 2022). Se observó que algunos elementos estructurales no absorbían las ráfagas de viento y el diseño estrecho de la calzada manifestó un aumento en la amplitud del movimiento oscilatorio del puente que generó el colapso del puente (Brownjohn, 1994). Hasta la actualidad se sigue estudiando, proponiendo y mejorando tecnologías concernientes al caso del puente Tacoma Narrows (Song et al., 2022). En la **Figura 30 (a)** se puede observar el momento exacto del daño de los cables del puente atirantado con el colapso de la losa del puente Tacoma Narrow. Además, Song et al. (2022) realizó estudios de vibración simulando los vientos ocurridos en la fecha del colapso utilizando algoritmos IA y simulaciones numéricas como se observa en la **Figura 30 (b) y (c)**, dicho resultado predijo el resultado del colapso similar al comportamiento estructural sucedido en 1940. Por esta razón, se ampliaron los horizontes de la investigación de monitoreo de puentes en Estados Unidos y a nivel mundial.

Figura 30. Puente Tacoma Narrows



Nota. (a) Puente Tacoma Narrows colapsado en 1940 (Hutchinson, 2021). (b) Tipos de vibración planteados para estudiar el puente propuestos por (Brownjohn, 1994). (c) Se estudia las vibraciones verticales y torsionales mediante simulaciones numéricas y algoritmos AI (Song et al., 2022)

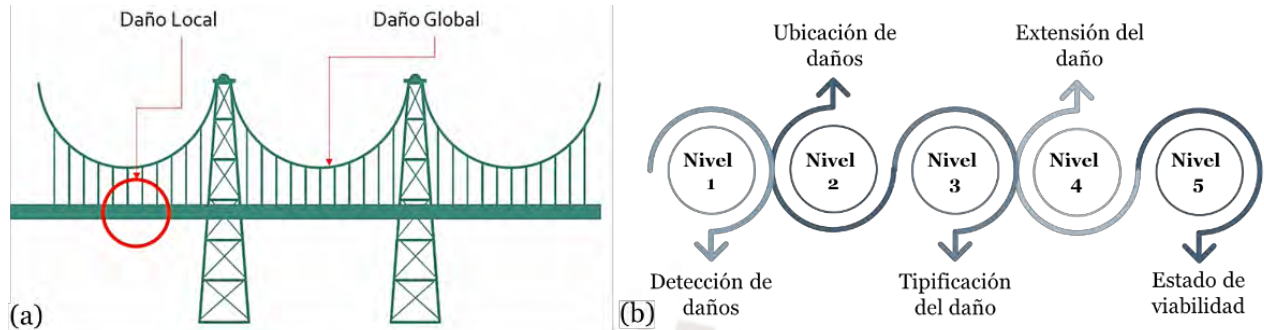
En definición, el SHM es un proceso que basa en someter a la estructura a excitaciones estáticas y dinámicas cuyos resultados de la respuesta estructural se registran mediante el uso de sensores u otros dispositivos para la obtención de la data, la cual pasa por un procesamiento de algoritmos IA (Bisby, 2006; Dong et al., 2010). Actualmente el proceso metodológico del SHM en puentes ha tenido investigaciones con técnicas que definan el monitoreo aplicadas al nuevo enfoque tecnológico mediante dispositivos y la recopilación de datos conociéndola como Bridge Health Monitoring (BHM) o Monitoreo de la salud estructural de puentes. Además, la investigación se ajusta a la importancia del ciclo de vida de un puente por lo cual el monitoreo es una base esencial del estudio. Los puentes son una inversión a largo plazo que requiere rutinas de mantenimiento a pequeño, mediano o largo periodo según se requiera de acuerdo a los resultados mostrados en la obtención de datos que se realiza al puente estudiado (Hawk, 2002). Por esta razón, se definen dos tipos de monitoreo para delimitar el estudio: el monitoreo periódico cuyo proceso se realiza en un prolongado tiempo para investigar cambios en la respuesta estructural de la infraestructura y el monitoreo continuo conocido como el más costoso pero sofisticado por la obtención y procesamiento rápido de datos

(Dong et al., 2010). Actualmente, un adecuado sistema de SHM en puentes se define como el estudio que detecta, localiza y cuantifica el daño estructural a través de modelos numéricos, implementaciones, validación a escala y tamaño real cuyos datos aseguran la mejora de toma de decisiones para las infraestructuras (An et al., 2019). Además, enmarcamos el sistema de monitoreo en el país para buscar definir el estado de los puentes, encontrar el daño y ver la magnitud de la misma. Así mismo un adecuado SHM proporciona información sobre la seguridad, integridad, servicio y salud con el fin de preservar la vida de la infraestructura (Avci et al., 2021) mediante el cambio de las propiedades materiales y/o geométricas para verificar el rendimiento del sistema estructural (Farrar & Worden, 2007)

El SHM implementa la adopción de sensores que se ubican en el puente para la recolección de datos del deterioro del puente (Comisu et al., 2017). Adicionalmente, según Avci et al. (2021) un adecuado monitoreo comienza con la inspección visual (enfoque tradicional), el cual evoluciona adaptando términos y metodologías propias del SHM y adicionando la “detección de daño estructural” (SDD, structural damage detection). Pero según An et al. (2019) esta detección de daños se puede realizar a nivel macro (daños globales), es decir, un estudio de todo el sistema estructural o nivel micro (daño local) en donde el estudio se realiza en un solo elemento estructural como se observa en la **Figura 31 (a)**. Para evaluar estos daños en el sistema del SHM se puede observar en la **Figura 31 (b)** cómo se ha dividido en 5 niveles de estudio que debe cumplir el proceso de identificar el daño sea local o global (Seguel, 2019). Dentro de los niveles el 1 y 2, se pueden realizar una VI de acuerdo a ello se proponen instrumentos que analicen la extensión del daño y verificar la viabilidad de la estructura monitoreada. En otras investigaciones

consideran a los niveles de identificación hasta la extensión de daño considerando solo hasta el nivel 4.

Figura 31. Enfoque del SHM.

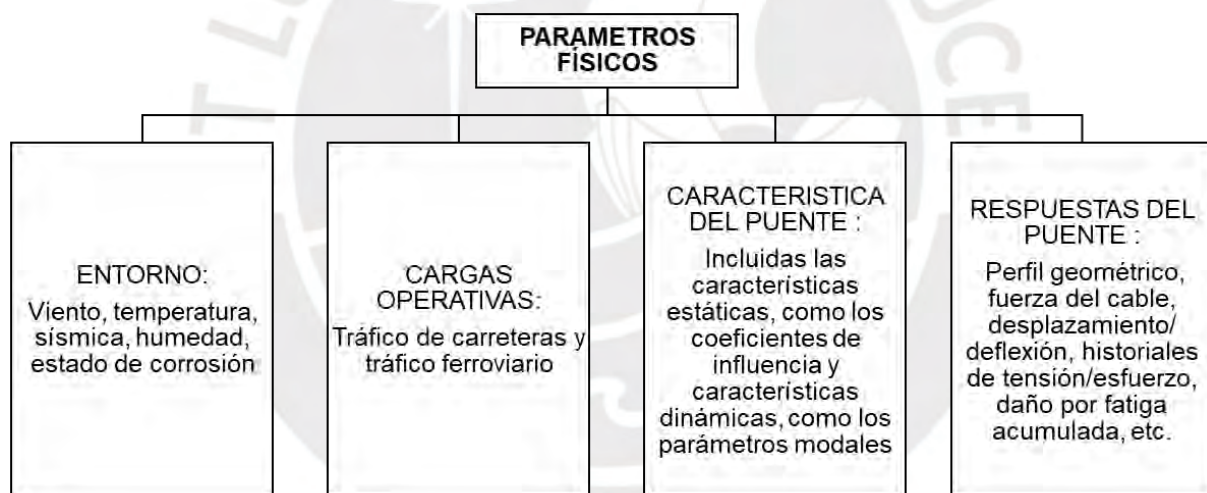


Nota. Elaboración propia adaptado de Seguel (2019). (a) Detección de daño local y global. (b) Niveles de identificación de daños.

En cuanto a puentes aplicando el SHM, se ha visto un desarrollo favorable en el BHM. Las tecnologías de monitoreo también han evolucionado desde la aplicación ensayos destructivo que afectaban a las propiedades de los materiales hasta los no destructivos se han aplicado para ser menos invasivas a las estructuras. Un claro ejemplo es el puente de suspensión Tsing Ma ubicado en Hong Kong-China, el cual ha sido objeto de varios proyectos de monitoreo de la salud estructural y análisis de vibraciones desde 1997 conjuntamente con otros 4 puentes incluidos en dicho proyecto (Zhou et al., 2020). La metodología utilizada para el monitoreo es del "Sistema de Monitoreo de la Salud Estructural y del Viento" (por sus siglas en inglés The Wind and Structural Health Monitoring System "WASHMS"). Para que este sistema funcione con un adecuado monitoreo a tiempo real se implementaron también un sistema de gestión de mantenimiento, estos deben ser correctivos basados a la condición de puente de servicio (desempeño estructural y mecanismos de deterioro) esto con el fin de mejorar la toma de decisiones de cuando el mantenimiento es más rentable (Wong & Ni, 2009). Por otro lado, dentro de los objetivos del WASHMS es comprender el comportamiento estructural, desarrollar y

valididad la técnica de evaluación, calibrar y actualizar los modelos de monitoreo. Por ello, se delimitan los parámetros físicos que influyen el desempeño del puente, por ello, en el Perú existen muchos parámetros ambientales y físicos que pueden afectar a los dispositivos que se monitorean, estudian y clasifican. En Wong & Ni (2009) proponen 4 parámetros físicos como se puede observar en la **Figura 32**: Se considera a los parámetros ambientales como el entorno, cargas operativas a las cargas de tráfico del puente, las características generales del puente y las variaciones que se han producido a lo largo de su tiempo de operatividad. Por ello, estos parámetros serán considerados como factores causales de daño dentro de la guía propuesta.

Figura 32. Parámetros físicos que influyen el desempeño de un puente



Nota. Adaptado (Wong & Ni, 2009)

El objetivo primordial de SHM es incrementar la economía y beneficios de la seguridad de vida (Svendsen et al., 2022). Para aplicar SHM se necesita adecuados objetos de instrumentación que permitan identificar y constituir las propiedades dinámicas de materiales (Dong et al., 2010). Al tener los parámetros definidos y obtenidos mayormente de la data histórica, se plantea los objetivos y finalidad del SHM, la ubicación de sensores y tipos de sensores a usar, en el cual se debe tener

en cuenta el posicionamiento y tipos de instrumentos a usar para la adquisición de datos. Además, técnicas de diagnóstico y tipos de daño los cuales son: globales, los cuales aprovechan las características de la estructura (frecuencia natural, forma modal y matriz de flexibilidad) para determinar ubicaciones y la gravedad de daños; locales, los cuales son más precisos y aunque son sensibles a daño requiere un conocimiento previo para la manipulación de la tecnología y el procesamiento de ellos como se muestran en la **Figura 31 (a)** (An et al., 2019). Al recopilar los datos de sensores, se prepara el preprocesamiento de datos en el que se utilizan modelos y algoritmos de Inteligencia Artificial (IA) filtrando data limpia para mejorar el procesamiento y el tiempo que dure la actividad, evitando errores de cálculo humano. Dentro del ítem se identifican los tipos de métodos de identificación de daños, análisis de daños y el tipo de respuesta ante variables obtenidas por medio del modelo AI. Por ello la presente investigación propone la guía de aplicación del BHM como punto de partida de propuesta de mejora en la red de mantenimiento de puentes. Al implementar la metodología BHM también se puede ampliar la visión del Sistema de gestión de puentes (BMS) aplicado al Perú, cuyo fin es tener una data de diversos monitoreos con información resguardada en su sistema nacional (Pecho, 2017). Esta propuesta va de la mano con lo trabajado en Estados Unidos la cual ha formado una red automatizada de cada puente como lo propone la FHWA en la guía de inventariado de inspección de puentes (FHWA, 2022).

Dentro de la parte de la inspección muchas veces observa una dependencia de la experiencia del inspector con el estudio visual de este más no a una forma analítica de monitoreo de puentes mediante dispositivos que puedan caracterizar el material de la infraestructuras (An et al., 2019). Por ello, el SHM utiliza un sistema de supervisión automatizado para evaluar la salud en servicio de una estructura (Chen,

2018). El proceso de monitoreo de la salud estructural de edificios existentes (SHM) consiste en inspeccionar periódica o frecuentemente las condiciones estructurales del edificio a través de pruebas y análisis técnicos, con el fin de evaluar el estado actual de la estructura y determinar la necesidad de reparaciones o mejoras. Esto puede incluir la utilización de técnicas de inspección visual, pruebas de carga, escaneo láser 3D, monitoreo sísmico y otras herramientas de análisis. El monitoreo regular de la salud estructural de edificios existentes es crucial para garantizar la seguridad de los ocupantes y prolongar la vida útil del edificio. Un adecuado SHM a largo plazo debe automatizar el procesamiento de la data hasta la toma de decisión de respuestas y emitir la alerta, pero para llegar a esta automatización el sistema debe ser minuciosamente estudiado en cada proceso y probarse para evitar la aparición de falsos positivos (Dong et al., 2010).

3.2. INTELIGENCIA ARTIFICIAL APLICADO AL MONITOREO DE PUENTES

El desarrollo de la inteligencia artificial aplicado en el BHM va de la mano de las nuevas tecnologías en SHM. Estudios aplicativos en el procesamiento de datos de los sensores en puentes han mencionado a la inteligencia artificial como una herramienta de mejora para SHM (Bisby, 2006). Las técnicas de procesamiento de BD vienen desarrollándose por la necesidad de automatizar el proceso. Para caracterizar la data, una de las manera de realizarlas es a través de las redes neuronales, las cuales identifican los patrones procesando aún más rápido y mejorando el proceso mediante el aprendizaje automático (Dong et al., 2010). El proceso de la adquisición de datos debe verse abarcada a los aspectos del preprocesamiento, limpieza de ruidos, aplicación al algoritmo AI y el análisis de los

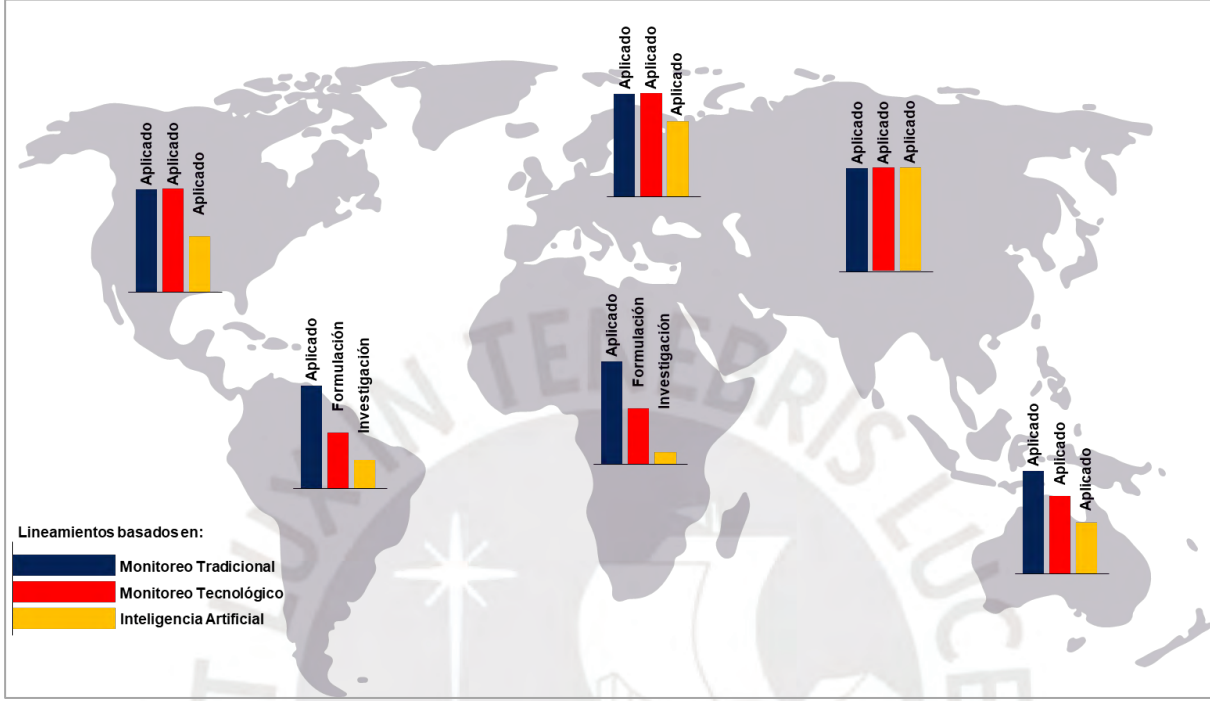
resultados producidos, para recién aplicar verdaderamente a datos a obtenerse (Sun et al., 2020). Antes de la aplicación, se pide una validación o conformidad de datos, por ello muchas veces se apoya de modelos numéricos y algoritmos para el SHM en puentes calibrando el proceso y validando el modelo AI con los modelos numéricos. En otros casos, según (Calvert et al., 2021) la calibración de los métodos estocásticos es mediante el uso de datos y juicio de expertos. Dichas calibraciones se hacen mediante el registro de servicios y mantenimientos, registro de condición visual de los puentes.

3.3. ESTUDIO DE NORMAS INTERNACIONALES CON IMPLEMENTACIÓN DEL SHM EN PUENTES

A nivel mundial se viene destacando los antecedentes de la historia en el monitoreo de puentes, se hace una comparativa de los continentes en los cuales se está desarrollando normativas en el monitoreo tradicional, tecnológico e IA como se observa en la **Figura 33**. En el continente viene aplicándose completamente el monitoreo tradicional mientras que el monitoreo tecnológico se encuentra en formulación en países como Chile y Argentina, además en el país se aprobó una normativa para el desarrollo y aplicación de la IA. Por otro lado, países como Estados Unidos, China, Rusia, Japón, Italia, Suecia, Nueva Zelanda vienen evolucionando el BHM en normativas y aplicación en diferentes porcentajes de avance. Mientras que las normativas en IA más desarrolladas son en países como Australia, Estados Unidos, Unión Europea, Rusia y China. Esta última, ha propuesto un plan al 2030 en implementación de la IA en todo aspecto económico y social con buen avance en regulaciones, mientras que Rusia ha mejorado el plan de la IA para

el BHM mediante el manejo de la información obtenida de los instrumentos de monitoreo.

Figura 33. Normativas en monitoreo tradicional, tecnológico e IA.



Nota: Elaboración Propia.

A continuación, se recopila normativas legisladas en el ámbito del monitoreo tradicional, SHM, tecnologías de monitoreos, ensayos para constitución de materiales, leyes propuestas en el BHM e IA como se muestra en la **Tabla 1**. Dichos lineamientos se mencionan para tener en cuenta al momento de aplicar el Manual BHM del **Capítulo 4**.

Tabla 1. Normativas en el monitoreo tradicional, BHM e IA.

NORMATIVA	DESCRIPCIÓN
PERÚ:	
<i>Guía de Inspección de puentes (MTC, 2006, 2019a)</i>	Normativa peruana constituida para el monitoreo tradicional mediante ensayos semi destructivos y destructivo
<i>Normativa en inteligencia artificial:</i>	Ley N.º 31814, "Ley que promueve el uso de la inteligencia artificial en favor del desarrollo económico y social del país". Esta ley fue aprobada en julio de 2023 y busca regular el uso de la IA para fomentar el desarrollo del país, priorizando el respeto por los

	derechos humanos.
COLOMBIA:	
<i>“Manual para la inspección visual de puentes y pontones”</i>	Se toma en cuenta la Norma Colombiana de Diseño de Puentes CCP14 y el convenio que realizó la Universidad Nacional de Colombia y el Ministerio de Transportes para elaborar el “Manual para la inspección visual de puentes y pontones”
<i>“Plataforma de captura, almacenamiento, procesamiento y visualización de datos de una red acelerométrica orientada al monitoreo de salud estructural”</i>	La empresa REHABTEC realiza el Sistema De Monitoreo Dinámico Del Puente Pumarejo como punto de partida para monitoreos antes de ponerlo en marcha. Investigaciones de cómo nace el monitoreo de puentes en Colombia da a conocer en “Línea base para el monitoreo de salud estructural del puente Gómez Ortiz a partir de pruebas de vibración ambiental” (Viviescas et al., 2018). Gracias a ello se crea una plataforma en donde muestra las técnicas de monitoreo aplicadas a los campos de la ingeniería
ARGENTINA:	
CIRSOC 201 – 2005: (Saracho, 2012)	Reglamento argentino de estructuras de concreto basado en el documento “Building Code Requirements for Structural Concrete an Commentary (ACI 318-05)”
CIRSOC 301 – 2005: (Saracho, 2012)	Reglamento argentino de estructuras de acero para edificios basadis en la especificación “Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings AISC-LRFD”
CIRSOC 801 - 2019	Reglamento argentino para el diseño de puentes carreteros
DVBA – 2007 (DVBA, 2007)	Manual para inspecciones rutinarias de puentes y alcantarillas en servicio hecho por el Ministerio de Infraestructura de Vivienda y Servicios Públicos.
MÉXICO:	
<i>Inspección de puentes carreteros</i> SIAP - 2010	Sistema de Administración de Puentes (SIAP). Plan nacional de evaluación de puentes federales, libres de peaje dañados por corrosión (2000-2005). Una cuantificación de resultados, proyectos y colaboraciones.
COSTA RICA:	
<i>eBridge 3.0:</i>	Sistema para el monitoreo de puentes.
<i>Manual de inspección de puentes</i>	SAEP–Conavi. En Costa Rica, el Consejo Nacional de Vialidad (Conavi) ha desarrollado un Sistema para la Administración de Estructuras y Puentes (SAEP) (Monge, 2011). La idea es que en el futuro cercano el SAEP contenga un inventario de los puentes nacionales con información técnica detallada que apoye funciones estratégicas de planificación y mantenimiento. (Garita, 2016) Estudio JICA. La Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) realizó hace algunos años un estudio, a solicitud del Gobierno de Costa Rica, sobre el desarrollo de capacidad en planificación, rehabilitación, mantenimiento y administración de puentes, basado en 29 puentes de carreteras nacionales (JICA, 2007). Entre los objetivos está el establecimiento de herramientas de mantenimiento de puentes con manuales y lineamientos. (Garita, 2016)

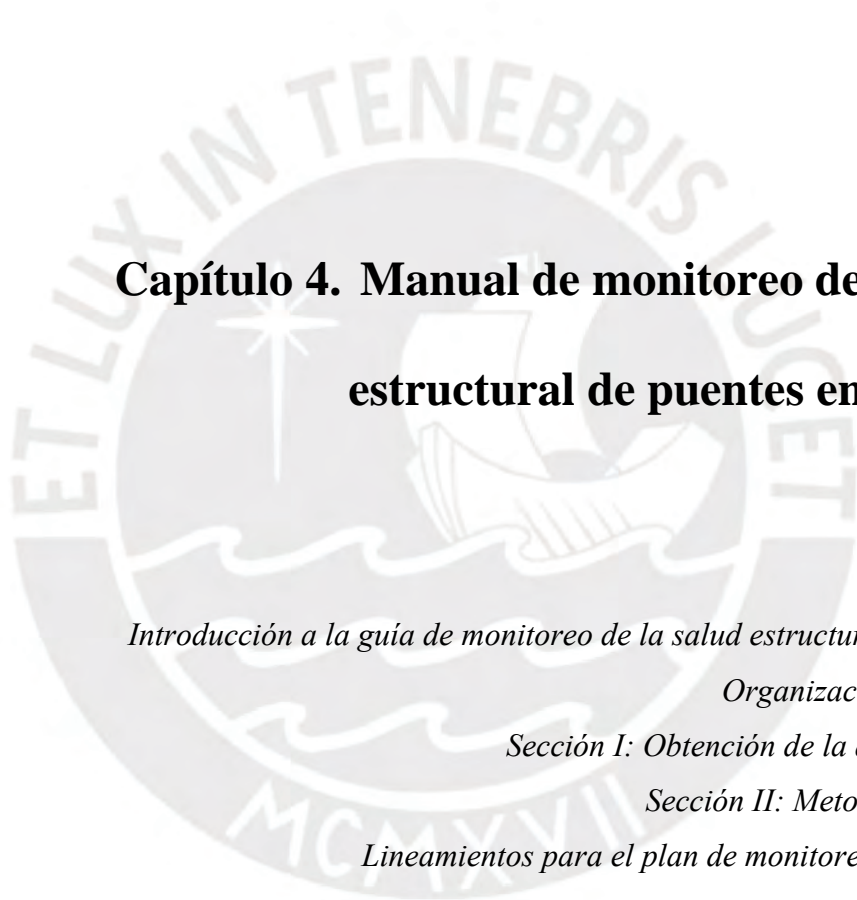
<i>Guía para la determinación de la condición de puentes en Costa Rica mediante inspección visual - 2015</i>	Propuesto conjuntamente con la Universidad de Costa Rica en el 2015, propone una inspección visual (Muñoz-Barrantes et al., 2015).
CANADÁ:	
<i>CALTRANS</i>	California Department of Transportation monitoring bridges
ESTADOS UNIDOS:	
<i>ACI</i>	Parámetros de inspección en concreto desde la creación, puesta en obra y durabilidad durante su vida útil.
<i>ASTM</i>	Parámetros de inspección en acero desde la creación, puesta en obra y durabilidad durante su vida útil.
<i>NBIS</i>	National Bridge Inspection Standards (NBIS) (2004 / 2022)
<i>NBI</i>	National Bridge Inventory (NBI)
<i>SEAOC 1995</i>	Estudio de daño y nivel de desempeño:
<i>ASSHTO</i>	National Bridge Inspection Program Compliance Review Manual Non-Destructive Testing of Fracture Critical Members Fabricated from AASHTO M244 Grade 100 (ASTM A514/A517) Steel NBI. Como proyecto relacionado, el National Bridge Inventory (NBI) (FHWA, 2013) es un sitio web que se ofrece como un servicio público a todos los interesados en la condición y administración de puentes en Estados Unidos. El NBI posee una colección de más de 600,000 puentes en vías públicas en ese país. AASHTO Ware Bridge. La asociación estadounidense AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Office) ofrece el producto AASHTOWare Bridge, que consiste en un conjunto de herramientas para inventario, inspección, evaluación y diseño de puentes (AASHTO, 2013).
EUROPA:	
<i>ISO 13822:2010: Para Inglaterra y Francia.</i>	Bases para el diseño de estructuras — Evaluación de estructuras existentes para la fiabilidad de estructuras.
<i>IA normativa</i>	La comisión Europea propuso éticas de uso de la IA en la que propone el manejo de la información (Comisión Europea, 2018)
NUEVA ZELANDA:	
<i>IPWEA - 2015</i>	Directrices para la recopilación de datos y el seguimiento para la gestión de activos de los puentes de Nueva Zelanda (Omenzetter et al., 2015)
CHINA:	
<i>Bridge Design Practice in China</i>	Libro de ingeniería de puentes (Sección VII)
<i>Aún en proceso de publicación:</i>	- Términos básicos sobre el monitoreo de la seguridad para la prevención de desastres de ingeniería.

<i>(Zhou et al., 2020)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Norma para la Construcción y Aceptación de Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural - Estándar de Procesamiento Masivo de Datos para el Monitoreo de Salud Estructural - Reglamento Técnico sobre la Selección y Colocación de Sensores para el Monitoreo del Estado del Puente
<i>CECS 333 – 2012: Lineamiento nacional (Zhou et al., 2020)</i>	Estándar de diseño para sistemas de monitoreo de salud estructural.
<i>T/CECS 652 – 2019: Lineamiento nacional (Zhou et al., 2020)</i>	Norma para el Mantenimiento Operacional y Gestión de Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural.
<i>DB/T29–208 – 2011: Lineamiento provincial (Zhou et al., 2020)</i>	Especificaciones técnicas del sistema de monitoreo de salud estructural para el puente de Tianjin
<i>GB50982 – 2014: Código Nacional (Zhou et al., 2020)</i>	Código Técnico de Vigilancia de Estructuras de Edificios y Puentes
<i>JT/T1037 – 2016: Lineamiento nacional (Zhou et al., 2020)</i>	Especificaciones Técnicas para Sistemas de Monitoreo de Seguridad Estructural de Puentes de Carreteras
<i>DB32/T 2880- 2016: Lineamiento provincial (Zhou et al., 2020)</i>	Especificaciones para el Diseño, Construcción y Mantenimiento de Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural de Puentes y Túneles basados en Fibra Óptica Sensing
<i>DB13/T 2548 -2017: código provincial (Zhou et al., 2020)</i>	Guía para el diseño y mantenimiento de sistemas de monitoreo de salud para estructuras de puentes de concreto
<i>DBJ50/T-304 - 2018: Lineamiento provincial (Zhou et al., 2020)</i>	Norma para la Construcción y Aceptación de Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural para Puentes
<i>T/CECS 529 – 2018: Lineamiento nacional (Zhou et al., 2020)</i>	Estándar de Umbral de Alerta Temprana para el Sistema de Monitoreo de Salud Estructural de Puentes de Luces Largas
<i>DB32/T 3562 – 2019: Código provincial (Zhou et al., 2020)</i>	Código de diseño para el sistema de monitoreo de la salud estructural de puentes
<i>IA normativa</i>	Plan de implementación en aspectos sociales y económicos en China al 2030 (Cheng & Zeng, 2023)
INDIA	
<i>Manual de Puente de India (Government of India Ministry of Railways, 1998)</i>	Publicado en 1998 para el monitoreo de puentes y túneles.
JAPÓN:	
<i>PWRI - 1988</i>	Un modelo de manual de inspección de puentes desarrollado en 1988 por el Instituto de Investigación de Obras Públicas (PWRI)

	del entonces Ministerio de Construcción.
RUSIA:	
<i>Normativas BHM</i>	Condición técnica del monitoreo de puentes en Rusia (Ministry Of Construction And Housing And Communal Services Of The Russian Federation, 2016)

Nota: Elaboración propia.





Capítulo 4. Manual de monitoreo de la salud estructural de puentes en el Perú.

Presentación

Introducción a la guía de monitoreo de la salud estructural de puentes

Organización de la guía

Sección I: Obtención de la data histórica

Sección II: Metodología BHM

Lineamientos para el plan de monitoreo tecnológico

PRESENTACIÓN

La presente guía es una propuesta de documento técnico con recomendaciones preliminares orientada a implementar e impulsar el Monitoreo de Salud Estructural o Structural Health Monitoring (SHM) de puentes (BHM) en el Perú. La permanente transformación y mejora en la ciencia y tecnología en la ingeniería vial genera nuevos sistemas de monitoreo los cuales se proponen acorde a la realidad peruana. Se propone el uso de nuevas tecnologías como instrumentos que cuantifiquen la condición del daño y la Inteligencia Artificial (IA) como medio de procesamiento de datos.

En el Perú, existe un apartado en el RNE E.030 Diseño sismorresistente, Capítulo 8 que trata sobre la evaluación, reparación y reforzamiento de estructuras dañadas como un conjunto para la evaluación ante evento sísmico. Además, se tiene la Guía de Inspección de puentes del 2019 del MTC en el cual menciona que existe la Inspección Especial la cual integra por completo al SHM, cuyos resultados de obtención son la deformación, deflexión, vibración y desplazamiento, más no hace referencia a la instrumentación para este tipo de monitoreos. Por el contrario, existe normativas de entidades internacionales para la instrumentación de ensayos de acuerdo al tipo de material. El ACI rige ensayos para todo tipo de concreto mientras que el ASTM C597-22 propone el ensayo de pulso ultrasónico. Mientras que normativas internacionales ya complementan lineamientos para el uso del sensor, la adquisición de la data y algunas recomendaciones. Por ello, la presente guía propone el uso del BHM acorde a la tipología y parámetros físicos en el Perú.

Dentro de los beneficios de implementar BHM en el Perú se encuentra el entendimiento del comportamiento estructural mediante la aplicación de nuevas

tecnologías. El objetivo es detectar daño para conocer la condición del puente, reducir tiempos en el mantenimiento, reconstrucción y/o monitoreo mejorando la rentabilidad de la vida útil mediante nuevas tecnologías (Bisby, 2006). Por ello, el presente manual propone lineamientos para el proceso aplicativo del BHM.

INTRODUCCIÓN A LA GUÍA DE MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE PUENTES

Actualmente contamos con el Manual de Inspección de puentes del Perú del 2019 y los objetivos son asegurar el tráfico sin riesgos sobre la infraestructura (seguridad vial), escoger el tiempo de inspección y detectar deficiencias existentes para recomendar acciones de mantenimiento (MTC, 2019a). La orientación de esta guía es implementar el ítem de la Inspección Especial planteada en la guía mencionada con la inclusión del término “Monitoreo de la salud estructural”. Además, se plantean cinco tipos de puentes y parámetros físicos dentro de la realidad peruana.

Por otro lado, el Bridge Health Monitoring o Monitoreo de la salud de Puentes (BHM) toma en cuenta el término “salud” creando una analogía directa de un doctor atendiendo a una persona humana así como un inspector o doctor estructural verifica la condición del puente (Bisby, 2006). En la **Figura 34** muestra lo mencionado anteriormente, para la realización del BHM necesita de dispositivos de monitoreo, obtención y adquisición de data como también el uso de métodos de procesamiento de datos e identificación de daños mediante algoritmos de Inteligencia Artificial (IA).

Figura 34. Idealización de BHM.



Nota. Elaboración Propia

ORGANIZACIÓN DE LA GUÍA

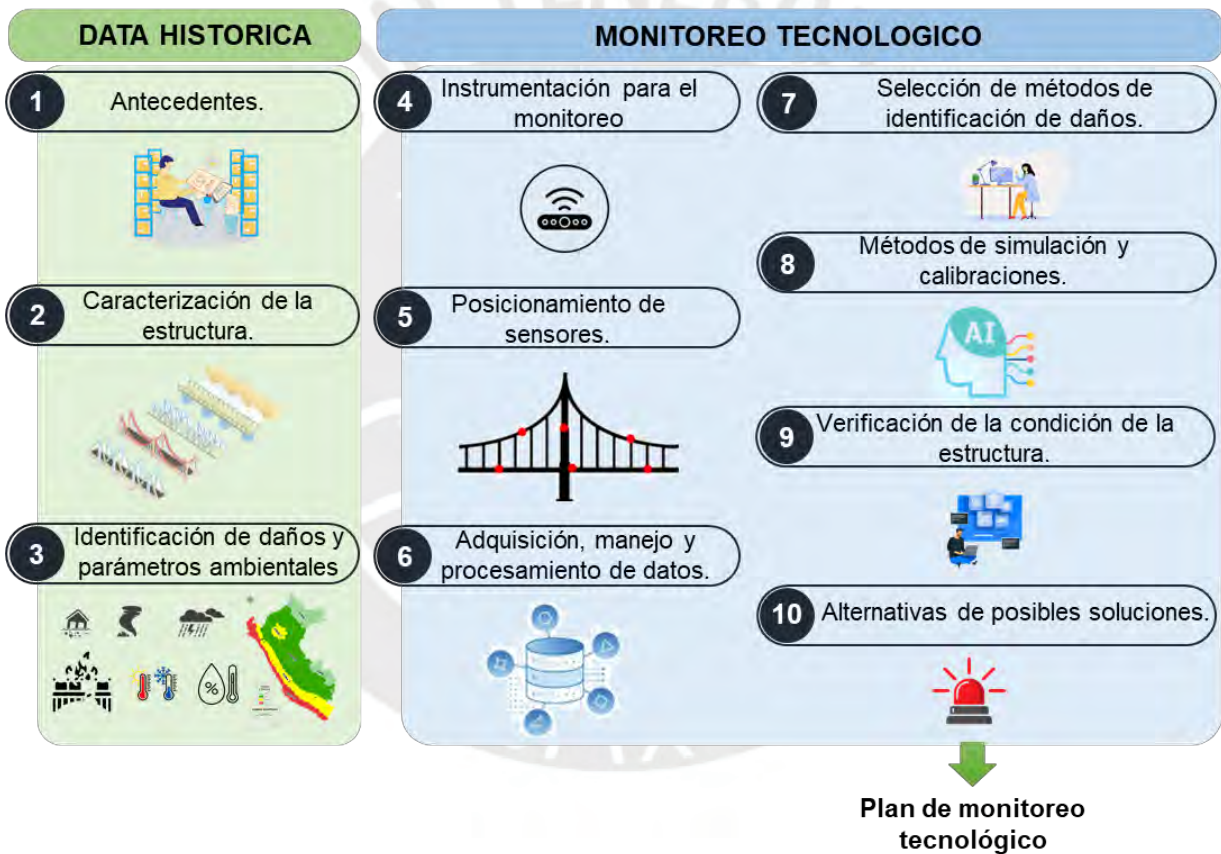
La presente guía presenta una serie de pautas necesarias para el monitoreo de puentes en el Perú combinando el enfoque tradicional con el tecnológico. Cada uno de estos tiene una finalidad por ello se divide en dos secciones, llamando al enfoque tradicional como la data histórica y al tecnológico la aplicación del BHM.

- La primera, obtención de la data histórica como se observa en la **Figura 35** (parte sombreada de verde) comprende de tres ítems, el objetivo de esta sección es obtener toda la información in-situ posible para aplicar la segunda parte, por ello se necesita de la obtención de antecedentes, inspección visual y estudio de parámetros físicos de entorno. Con dichos datos se planificará el área de trabajo y entorno para aplicar el BHM al puente en estudio.
- Para la segunda parte, monitoreo tecnológico como se observa en la **Figura 35** (parte sombreada de azul) comprende de siete ítems. El objetivo de esta sección es identificar, localizar, cuantificar y pronosticar daño mediante tecnologías BHM (instrumentación de tecnologías de monitoreo, aplicación de método de procesamiento de señales, métodos de identificación de daños y

aplicación de la IA para la automatización de datos). Además, con el resultado se debe desarrollar estrategias de solución de daños.

Finalmente, se propone el “Plan de monitoreo tecnológico” con lineamientos generales obtenidas de la data histórica y el monitoreo tecnológico, dicho plan propone elaborar un documento técnico que sirve como guía para la aplicación del BHM de puentes en el Perú y va luego de escoger las características dentro de todo el proceso de la guía.

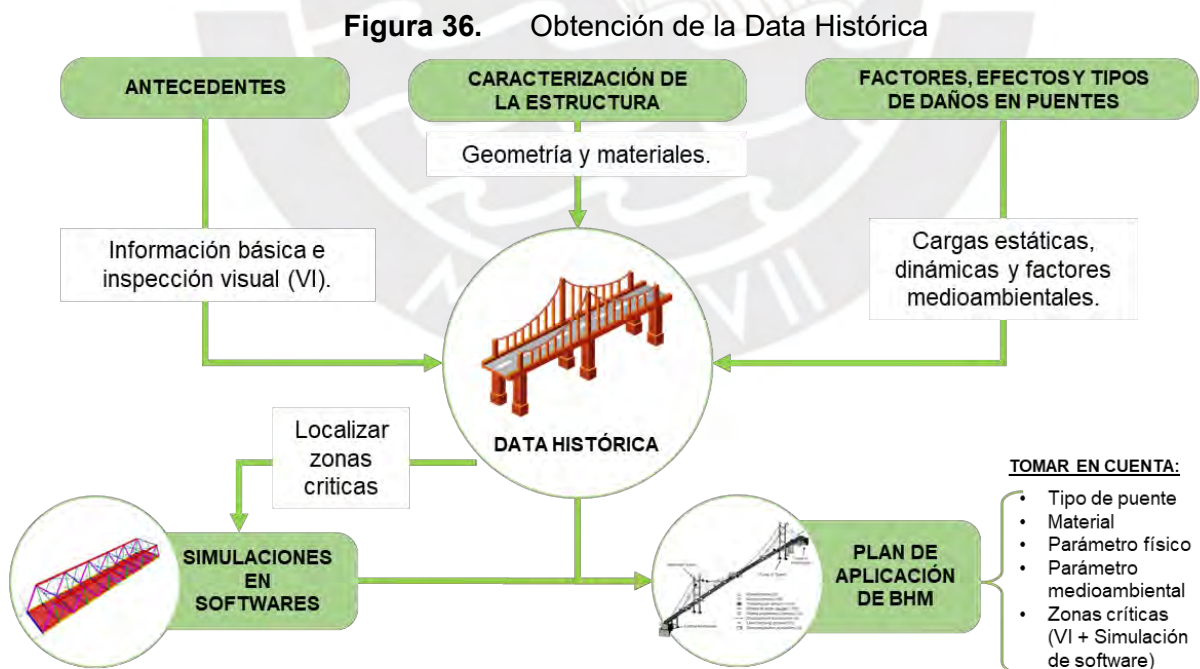
Figura 35. Estructuración de la guía



Nota. Elaboración Propia

SECCION I: OBTENCIÓN DE LA DATA HISTÓRICA

El objetivo de esta sección es la recopilación de toda información previa mediante documentaciones e inspecciones visuales (VI). Con dicha información se podrá realizar un plan de aplicación de la metodología BHM. Por ello en la **Figura 36** se puede observar el flujo de trabajo para la primera sección. Para completar el objetivo se realizará el estudio de los antecedentes los cuales se contrastarán con la información de la caracterización de la estructura estudiando en este ítem el tipo de puente, material de construcción y elementos críticos. Finalmente, se estudia el entorno en el que el puente está sometido dentro de ello se estudian los parámetros físicos y medioambientales. Esta información puede compararse con las simulaciones de la estructura por medio de softwares para analizar los puntos críticos que pueden estudiar en caso el puente no presente daños visibles, debido a la importancia de la integridad estructural.



Nota. Elaboración Propia

Finalmente, en la figura se puede apreciar la propuesta del Plan de aplicación del BHM en el que se toma en cuenta toda la información recopilada anteriormente para poder escoger los tipos de instrumentos de monitoreo y la posición en la que se colocarán.

4.1. ANTECEDENTES

En esta sección el inspector recopilará la mayor cantidad de datos del puente en estudio donde de acuerdo a la información previa estudiada se realizará el monitoreo visual propuesto en el Manual de puentes del MTC del 2019. En el 1.7 de evaluación preliminar en la normativa estadounidense menciona una exhaustiva investigación de documentaciones, informes y códigos jurisdiccionales mencionando al monitoreo visual para dicha sección (ACI, 2019b). Por ello se generan los niveles de información para tener un mayor orden en el inventariado.

- (i) **Nivel 1:** En este nivel se obtienen los datos generales del puente como ubicación, nombre de puente, año de construcción y otros detalles de “A ítem 4.4. Inspección Inicial de inventario del (MTC, 2019a)” cuyas reseñas deben ser compatibles con el objetivo propuesto en el proyecto del expediente técnico.
- (ii) **Nivel 2:** En este nivel se obtienen los documentos como valorizaciones, calidad de los materiales, observaciones de ejecución y códigos jurisdiccionales (ACI, 2019b).
- (iii) **Nivel 3:** Datos de monitoreos y mantenimientos se podrán generar un historial de datos previas al monitoreo que se realizará.
- (iv) **Nivel 4:** En este nivel se obtiene la Información General se realizará acorde a lo descrito en los ítems “2. Caracterización de la estructura y 3.

Factores, efectos y tipos de daños en puentes” de la presente guía además de lo especificado en los “ítems **B** y **C** del 4.4. Inspección Inicial de inventario del (MTC, 2019a)”, también se realiza un análisis de factores ambientales para poder generar un plan de acción del tipo de instrumentación a usar para el monitoreo.

Tabla 2. Niveles de información previos para BHM de puentes.

Nivel	Detalle	Descripción
1	Datos Generales	Nombre del puente Ubicación Descripción general (ruta y km) Administración de ejecución Año de diseño, construcción y/o reconstrucción
2	Datos de ejecución	Año de construcción Detalles de calidad de materiales en la ejecución y garantías establecidas Observaciones de ejecución alzadas Detalles generales compatibilizados de planos de expediente con la ejecución.
3	Datos de monitoreos y mantenimientos.	Año de monitoreo y mantenimiento Detalle de monitoreo Detalle de mantenimiento Detalles de modificaciones tales como adiciones, alteraciones o cambios de uso.
4	Información General	Caracterización de la estructura: condición física de los miembros estructurales para ver el alcance y ubicación de daño Idealización de trayectoria de cargas y orientación de miembros estructurales, desviaciones constructivas y dimensiones físicas Factores generales de daños que afecten al puente Efectos y tipos de daños encontrados Análisis de factores ambientales.

Nota. Extraído y adaptado (ACI, 2019b; MTC, 2019a)

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

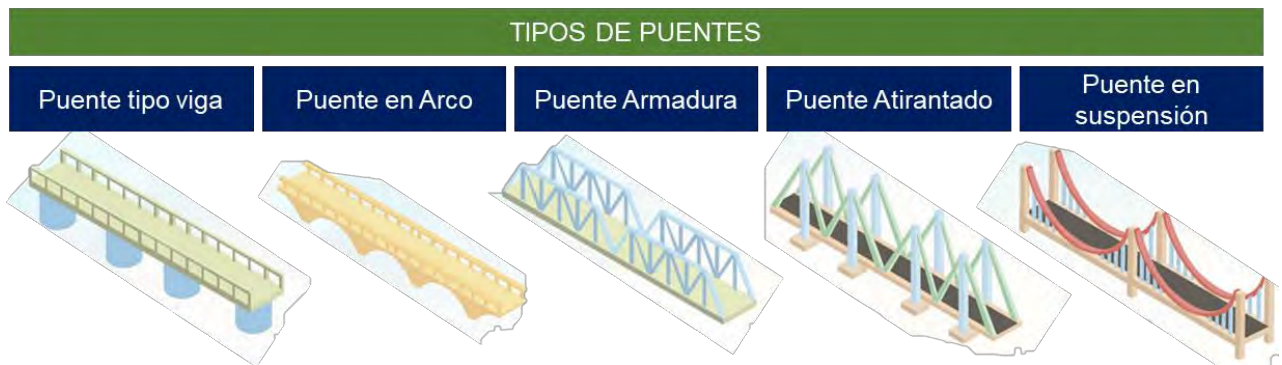
Dentro de la caracterización de la estructura se proponen la obtención de acuerdo al tipo de puente, tipo de material y elementos estructurales. El objetivo de

la caracterización a la estructura es describir la información y corroborar estas informaciones con simulaciones en softwares para determinar los factores, tipo, ubicación, amplitud, duración y frecuencia de las cargas estáticas y dinámicas (Seguel, 2019), con el fin de validar la información obtenida del dentro del **ítem 4.1 ANTECEDENTES**, la **Tabla 2** en el Nivel de información N°4.

4.2.1. Tipos de puentes

Hasta la fecha se han desarrollado e introducido varias clasificaciones de puentes en el Perú, siendo el MTC el ente regulador que ha propuesto de acuerdo a los objetivos a cumplir. Entre ellos resaltan según el sistema estructural principal (puentes tipo viga, arco y suspendidos) (MTC, 2018) y según el tiempo de vida previsto (puentes definitivos y temporales) (MTC, 2016), se considera esta última con mayor importancia debido a la presencia de colapsos de puentes en el país y el remplazo de estos con puentes temporales en el lugar del incidente. Por otro lado, la Guía de inspección de puentes menciona en el **“Anexo I. Características principales de los diferentes tipos de puentes y Anexo 2: Gráficos de tipos de estructuras de puentes”** las características de algunos tipos, secciones transversales, tipos de apoyos, secciones, etc. cabe recalcar que estos tipos de puentes varían de acuerdo al tipo de material y zona geográfica. *Por ello se propone “el puente en viga, arco y suspensión por lo previsto del manual de puentes; se adiciona el puente atirantado que se detalla con más precisión en la guía de inspección de puentes y finalmente, los puentes tipo armadura al ser una mayor cantidad existentes en el país”* como se muestra en la **Figura 37**. Es necesario conocer el tipo de puente para hacer un análisis exhaustivo y tomar precaución al tratar de interpretar los datos básicos, ya que los resultados podrían variar de acuerdo al objetivo al cual se quiere llegar.

Figura 37. Tipos de puentes según la guía BHM



Nota. Elaboración Propia

4.2.2. Tipos de materiales

En esta sección se mencionan lineamientos de tipos de materiales de construcción de acuerdo a la tipología propuesta, haciendo un resumen se enmarcan tres tipos de materiales: **“concreto, acero y otros materiales”**. En la **Tabla 3** se mencionan los materiales de algunos elementos dentro de la tipología propuesta, cabe resaltar que muchos puentes provisionales tienen materiales mixtos como hierro, sogas, madera, materia viva, etc., por ello solo se consideró el uso de materiales de la tipología propuesta y del reporte de PROVIAS en puentes definitivos, provisionales e históricos.

Tabla 3. Tipos de materiales de acuerdo al tipo de puente

TIPO DE PUENTE	CONCRETO	ACERO	OTROS
Puente en viga	En todos los elementos del puente	En todos los elementos del puente con acero de refuerzo y vigas de planchas soldadas.	En algún caso se utiliza la madera para la capa de rodadura.
Puente en Arco	En todos los elementos o en las vigas, pilares y losa.	Secciones de acero en el arco, en los elementos de concreto de usa como acero reforzado.	La piedra o ladrillo en todos los elementos del puente.
Puente Armadura	En las losas, vigas y cimentaciones.	Secciones de acero en los laterales o en todo el puente excepto en cimentaciones y acero de refuerzo en las partes del concreto armado.	En algún caso se utiliza la madera para la capa de rodadura.

Puente Atirantado	En todos los elementos o en las vigas, pilares y losa.	Secciones de acero pilas generales, uso en los tirantes y acero de refuerzo en las partes del concreto armado.	En algún caso se utiliza la madera para la capa de rodadura.
Puente en suspensión	En todos los elementos o en las vigas, pilares y losa	Secciones de acero pilas generales, uso en los tirantes y acero de refuerzo en las partes del concreto armado.	En algún caso se utiliza la madera para la capa de rodadura.

Nota: Elaboración propia.

(i) **Concreto:** Dentro de este ítem se consideran el concreto armado (CA), concreto pre-esforzado y materiales compuestos con la combinación del concreto, en la Tabla 4 se describen las normativas que mencionan las propiedades del concreto en la construcción. Para el parámetro de durabilidad y otras propiedades mecánicas se consideran los lineamientos del Instituto Americano de Concreto (ACI).

Tabla 4. Normativas para las propiedades generales del concreto.

Normativa	Descripción
ACI 318-19: Requisitos del reglamento para concreto estructural	Considerar solo el capítulo 14: Concreto simple: Detalla los criterios de diseño, las propiedades del concreto, los métodos de prueba, además en su último apartado habla del refuerzo que ese debe tener por medio de barras de acero. (ACI, 2019a). Se complementa con el Capítulo 19: Concreto: Requisitos de diseño y durabilidad , en el cual complementa aspectos que puedan garantizar la calidad y durabilidad del concreto reforzado.
ACI 440.1R-15: Guía para el diseño y construcción de concreto estructural reforzado con barras de fibras de polímero (FRP)	La normativa considera netamente la combinación del concreto estructural con el refuerzo de barras de polímero, dicho materiales es reforzado con fibras. Dentro de la normativa se contemplan las fibras de aramida (AFRP), fibras de carbono (CFRP), fibra de vidrio (GFRP), etc. En el ítem del Capítulo 4: Características de los materiales se discute la composición de materiales, características físicas y mecánicas, consideraciones de selección y uso estructural (ACI, 2015).
R.N.E E.060: Concreto Armado	La normativa peruana reafirma los parámetros básicos del concreto convencional, prefabricado y pre-esforzado (para más detalle revisar los Capítulo 4, 16 ,18). Además, se orienta con los lineamientos del ACI, ASTM y NTP adaptados a la realidad peruana (VIVIENDA, 2019a).

Nota. Elaboración adaptada y recopilada (ACI, 2015, 2019a; VIVIENDA, 2019a).

(ii) **Acero:** Al ser un material maleable la característica, forma y textura es de diferente manera dependiendo al tipo de puente. En caso de puentes en armadura se consideran propiedades de acuerdo a la sección de cada elemento. Por otro lado, los puentes atirantados llevan tensores de acero y los puentes en viga llevan el acero de refuerzo del concreto y también en vigas con planchas soldadas, por ello se especifica para ambos casos la calidad de material. Finalmente, para este material se debe seguir los lineamientos del Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM) y lineamientos planteados en el Perú, en la siguiente tabla se muestra el resumen de normativas en acero.

Tabla 5. Normativas para las propiedades generales del acero.

Normativa	Descripción
R.N.E E.060: Concreto Armado	La normativa peruana menciona los parámetros básicos del acero de refuerzo en los “ Capítulo 4. Propiedades de durabilidad y Capítulo 7. Detalles de refuerzo ” para criterios de diseño y calidad (VIVIENDA, 2019a).
ASTM A36: Norma de especificación de acero estructural al carbono.	Dispone los parámetros básicos para sólidos, secciones y detalles en acero mayormente para el uso en puentes de armadura, suspensión y atirantados (ASTM, 2008a)
ASTM A572: Especificación estándar para acero estructural de columbio-vanadio de baja aleación y alta resistencia	Proporciona las especificaciones para el uso de acero con aleación de columbio y vanadio en formas estructurales, placas, pilotes en laminas y barras con el objetivo de cumplir la resistencia y durabilidad de diseño para puentes (ASTM, 2021)
ASTM A615: Especificación estándar para barras de acero de carbono corrugadas y lisas para refuerzo de concreto.	Especifica las característica de acero de refuerzo corrugado de varios grados como el de 60 para garantizar las propiedades de alta adherencia entre el acero y el concreto (ASTM, 2012).
ASTM A709: Especificación estándar para acero estructural para puentes.	Describe especificaciones y cubre una variedad de aceros, incluidos el acero al carbono, aceros de baja aleación de alta resistencia, aceros aleados templados y revenidos para placas estructurales destinadas a ser utilizadas en puentes (ASTM, 2013).
ASTM A992: Especificación estándar para formas de acero estructural.	Describe las especificaciones para formas de acero estructural y sus propiedades como resistencia, aleación, soldabilidad, ductilidad y maleabilidad utilizadas en la construcción de edificios, puentes y otros fines estructurales (ASTM, 2011).

Nota. Elaboración adaptada y recopilada (ASTM, 2008a, 2011, 2012, 2013, 2021; VIVIENDA, 2019a).

(iii) **Otros materiales:** Según constitución de materiales se pueden reconocer puentes históricos en arco con mampostería en el cual las unidades más usadas son piedra, ladrillo, etc. También se considera a la madera dentro de esta sección al estar presente en losas y vigas de puentes como se amplía en la **Tabla 3**, por ello a continuación se mencionan las normativas en estos materiales.

Tabla 6. Normativas para las propiedades generales de la piedra en la construcción.

Normativa	Descripción
ASTM C616-08: Especificación estándar para piedra dimensional a base de cuarzo	Establece métodos de prueba para evaluar propiedades físicas de bloques de piedra para mampostería, como absorción de agua, densidad aparente, absorción por peso, densidad, resistencia a la compresión, módulo de ruptura y resistencia a la abrasión (ASTM, 2008b).
ASTM C1353-09: Método de prueba estándar para la resistencia a la abrasión de piedra dimensional sometida a tránsito peatonal utilizando una plataforma giratoria y un abrasivo de doble cabezal.	Norma que aborda las propiedades físicas y mecánicas de piedra natural utilizada en la construcción, incluyendo resistencia a la compresión, absorción de agua, densidad y la resistencia a la abrasión (ASTM, 2009).

Nota. Elaboración adaptada y recopilada (ASTM, 2008b, 2009).

Tabla 7. Normativas para las propiedades generales del ladrillo en la construcción.

Normativa	Descripción
ASTM C67: Métodos de prueba estándar para el muestreo y prueba de ladrillos y tejas de arcilla estructural.	Esta normativa establece las propiedades de los ladrillos estructurales como la resistencia a la compresión, absorción de agua, dimensiones, coeficiente de saturación, deformación, efecto de congelación y descongelación (ASTM, 2019a).
NTP 331: Materiales refractarios	Esta normativa fue actualizada el 2020, en el cual describe las características, propiedades y composición de ladrillos (El Peruano, 2020)

Nota. Elaboración adaptada y recopilada (ASTM, 2019a; El Peruano, 2020).

Tabla 8. Normativas para las propiedades generales de la madera en la construcción.

Normativa	Descripción
EN 338:2016: Estructuras de madera	Esta norma específica y define parámetros como la resistencia característica, la densidad y la humedad de equilibrio de la madera aserrada y de productos derivados de la madera para uso estructural (UE, 2016).
ASTM D245-22: Práctica estándar para establecer	Dentro de esta norma se verifica la calidad estructural y propiedad permitida relacionada para la madera estructural

grados estructurales y propiedades admisibles relacionadas para madera clasificada visualmente

aserrada visualmente clasificada (ASTM, 2019b).

RNE E.010: Madera

La presente norma regula aspectos fundamentales como la calidad de la madera, las técnicas de construcción, los requisitos estructurales, de seguridad y de sostenibilidad para garantizar la idoneidad y durabilidad de las estructuras construidas con madera (VIVIENDA, 2021).

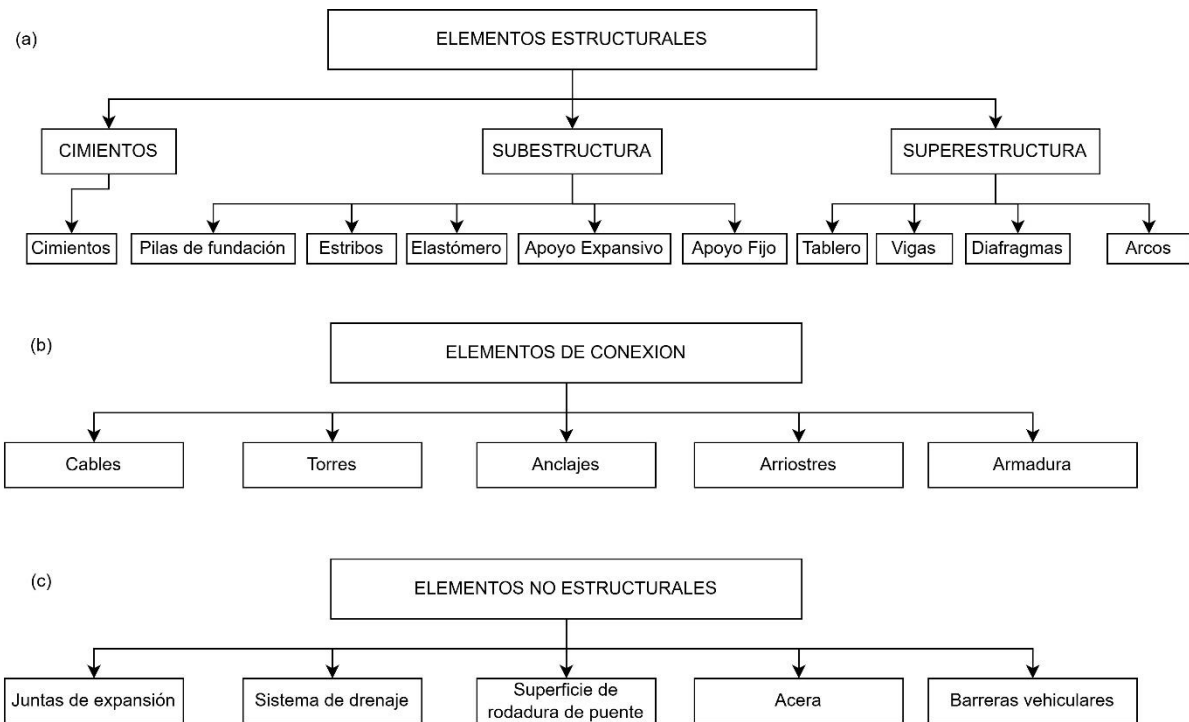
Nota. Elaboración adaptada y recopilada (ASTM, 2019b; UE, 2016; VIVIENDA, 2021).

4.2.3. Elementos de la estructura

Se debe identificar los elementos estructurales, acoplamientos, conexiones de los elementos y detalles constructivos en el estado en el que se encuentre. Aunque la prioridad de tener un estudio a profundidad de los elementos estructurales recaiga en los manuales, en la guía de inspección del MTC del 2019 propone una codificación de 426 elementos generales incluyendo barandales, señalizaciones y otros elementos que no actúan de manera dinámica dentro del puente. Por ello, para la guía se identifican los elementos en los cuales se puedan utilizar instrumentaciones de monitoreo tecnológico.

En la presente guía se propone **“el estudio de los elementos del puente mediante los elementos estructurales, de conexiones y no estructurales”**. En la **Figura 38** se muestra los elementos generales de los 5 tipos de puentes acorde al objetivo estructural dentro del diseño, por ello, al momento de realizar la inspección visual se toma en cuenta la presente clasificación.

Figura 38. Elementos de un puente



Nota. (a) Elementos estructurales (b) Elementos de conexión (c) Elementos no estructurales. Extraído y adaptado (Darban et al., 2021; Menn, 1990; MTC, 2018, 2019a; Muñoz-Barrantes et al., 2015).

Para implementar la información del **Nivel 4** de la **Tabla 2** se propone los siguientes **“pasos para realizar el estudio de los elementos del puente”**:

- (i) Identificar el elemento y clasificar como elemento estructural, de conexión o no estructural.
- (ii) Las dimensiones del elemento en estudio.
- (iii) Detallar el material de construcción caracterizando la parte interna del elemento a estudiar.
- (iv) Identificar los daños visuales encontrados en el elemento.
- (v) Identificar los factores de daños (de acuerdo al **ítem 4.3.1** de la guía)
- (vi) Identificar los efectos visibles de daño (de acuerdo al **ítem 4.3.3** de la guía)
- (vii) Ubicar el elemento en estudio dentro del diseño general para saber si se realizara un estudio de daños globales o locales.

4.3. IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS Y PARAMETROS DE ENTORNO

En esta sección se identifican los causales, efectos y tipos de daños como también los parámetros ambientales acorde a la realidad peruana. Dentro de los factores de daño se parametrizan los actores que causan daño mediante efectos medioambientales o intervención humana. Mientras que en los efectos se mencionan los daños producidos de acuerdo al material propuesto en el ítem 4.2.2. En el **Figura 39** se muestran los ítems de estudios que menciona esta sección, dentro de los agentes se estudia la reacción de causa y consecuencia para los dos primeros ítems de factores y efectos de daño. En cuanto a los tipos de daños se define si los daños son locales o afectan a toda la estructura en general, finalmente se estudian los parámetros de entorno para crear un adecuado plan de implementación del BHM.



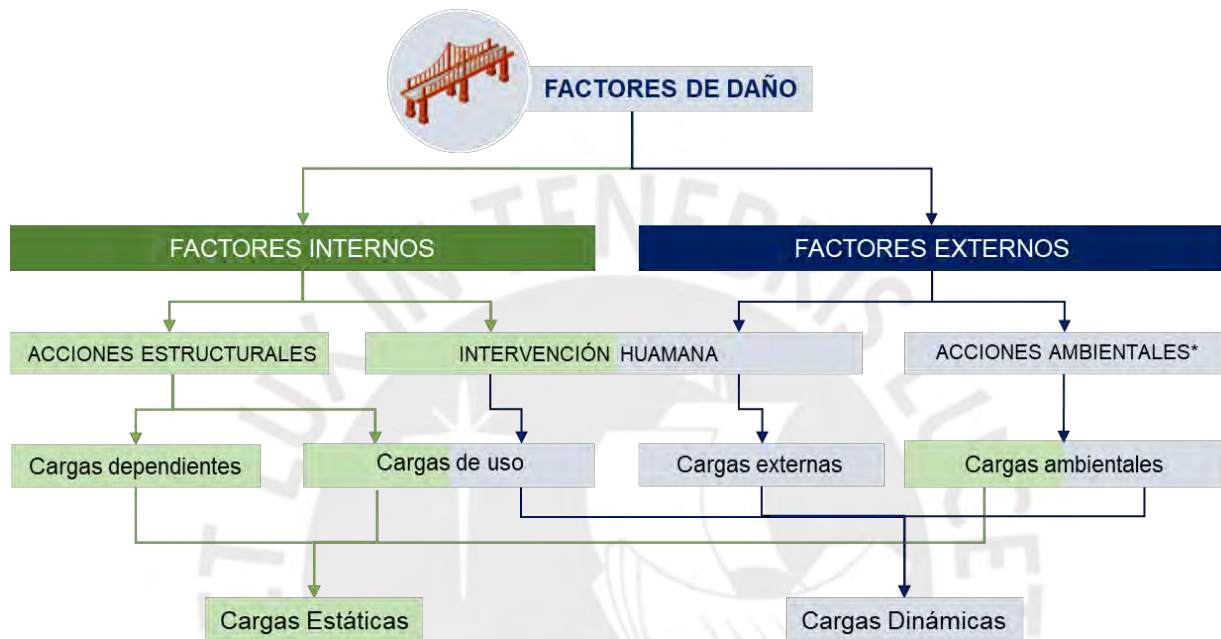
Nota: Elaboración Propia.

4.3.1. Factores de daño

El factor de daño es un fenómeno existente que puede causar deterioro con un tiempo variable, por ello, se subdivide en factores internos y externos los cuales producen cargas estáticas y dinámicas. Al observar la **Figura 40**, se considera a los **“factores internos, los que afecta internamente a la estructura y externos, a los**

agentes que de un momento a otro puedan causar daños inminentes”. Al mencionar las cargas estáticas y dinámicas se debe tomar en cuenta el factor del tiempo de exposición para crear el ciclo de vida con los tiempos de durabilidad y posibles colapsos.

Figura 40. Factores de daños en el Perú



Nota. Elaborado y adaptado (Seguel, 2019; Wong & Ni, 2009)

** Para el estudio del nivel de seguridad de cargas: ver el **capítulo 5 del ACI 562** en el cual verifica el estudio de los factores de carga, factores de reducción de resistencia y combinaciones de carga viendo la consistencia aceptable de seguridad estructural (ACI, 2019b). Dicha normativa propone el procedimiento mediante calibraciones para generar la precisión de los modelos y verificar del tiempo de vida útil.*

A. Factores Internos

Se involucran a las acciones que actúa con cargas, deformaciones y desplazamientos en el interior de todo el sistema o de un elemento estructural. El diseño estructural propuesto debe cumplir el comportamiento estático y dinámico para que ante agentes pueda cumplir los requerimientos mínimos de diseño. Los factores internos varían las propiedades físicas y mecánicas mediante el tipo de fuerza que interactúa a la estructura.

Los factores internos son considerados a los que varían a la estructura desde un elemento crítico, por ello en la **Tabla 9** se muestra la clasificación de dichos agentes. Primero, las acciones estructurales son consideradas cargas estáticas en donde se subdivide en fuerzas que caracterizan la estructura como el peso propio y cargas de uso que desaparecen después de la construcción o mantenimiento como el peso de la grúa. Segundo, intervención humana las cuales son consideradas cargas dinámicas y de acuerdo al uso las cuales afectan a la estructura interna del puente como el tipo de tonelaje del vehículo, errores de diseño, mala calidad de materiales, etc.

Tabla 9. Factores Internos de daño

ACCIONES ESTRUCTURALES		INTERVENCION HUMANA
CARGAS INDEPENDIENTES	CARGAS DE USO	
Peso propio	Materiales de construcción	Cargas de trafico
Instalaciones	Cargas de grúas	Cargas de maquinaria
Esfuerzos de pretensado	Equipos de monitoreo y mantención	Sobrecarga
Cargas constructivas		Error de diseño*
		Fallas en la construcción
		Mala calidad de materiales
Cargas Estáticas		Cargas Dinámicas

Nota. Elaborado y adaptado (MTC, 2019a; Seguel, 2019).

**En la Guía del Monitoreo peruano del 2019 reporta los tipos de errores de diseños.*

B. Factores Externos

Los factores externos son agentes ambientales que actúan directamente afectando propiedades físicas y mecánicas como la durabilidad y resistencia, el daño se realiza a lo largo de los años o de manera inmediata efectuando un colapso inminente. Por ello en la **Tabla 10** se muestra la clasificación de dichos agentes. Primero, las cargas estáticas que involucran a efectos ambientales que suceden por un periodo, temporada larga o existe en el entorno como empuje de suelo,

temperatura, humedad, entre otros. Segundo, las cargas dinámicas varían la estructura mediante daños poco visualizables que producen deterioro interno crítico o son eventos extraordinarios cuyas consecuencias son críticas a nivel de daño global y las cargas externas de intervención humana que actúan de manera inmediata como los impactos, choques, explosiones, etc.

Tabla 10. Factores Externos de daño

INTERVENCIÓN HUMANA	ACCIONES AMBIENTALES	
CARGAS EXTERNAS	CARGAS EXTERNAS	
Vibraciones	Vientos	Empuje del suelo
Choques o colisiones (vehículos, aviones. Trenes, barcos)	Sismos ²	Cargas estáticas de fluidos
Explosiones	Tsunamis	Presión de aguas subterráneas
Incendios ¹	Terremotos	Nieve
Sobrecargas	Fenómenos naturales (fenómeno del niño)	Hielo
	Avalanchas	Temperatura
	Crecida de ríos	Asentamiento de fundaciones y socavaciones de pilas
	Impacto de escombros	
	Lluvias frecuentes	
	Inundación	
	Flujo de detritos	
	Cargas Dinámicas	Cargas Estáticas

Nota. Extraído y adaptado (Seguel, 2019).

¹ para los incidentes extraordinarios se orienta con el ACI- 216 en el cual verifica la resistencia al fuego y protección contra incendios de estructuras de concreto y mampostería.

² Para el estudio a resistencia sísmica se utilizará el análisis mediante el **ASCE 41 “Evaluación Sísmica y Rehabilitación de Estructuras Existentes”** y el **ACI 369 “Evaluación sísmica y modernización de edificios de concreto existentes”**, adicionar metodologías como la Evaluación del desempeño sísmico de edificios **ATC - 58 “Diseño basado en el desempeño de componentes no estructurales”**, **ATC - 78 -1 “Identificación y mitigación de edificaciones de concreto no dúctil”** y **FEMA P695 “Metodología para cuantificación de Construcción Sísmica Factores de rendimiento”**.

4.3.2. Efectos de factores de daños en materiales.

Los efectos de los factores descritos en el ítem 4.3.1 generan deterioros en las propiedades físicas (desgaste de la sección), químicas (corrosión en el acero) y mecánicas (la fatiga produce grietas microscópicas). Además, que menciona los daños

o presencias de deterioros locales para elementos y globales para todo el sistema estructural. En la siguiente tabla se muestran las fallas probables de un puente mediante el tipo de material descrito en el ítem 4.2.2.

Tabla 11. Fallas probables en puentes según el tipo de material

MATERIAL	FALLAS PROBABLES
Concreto	Socavación, agrietamiento del tablero, corrosión de armaduras, pérdida de pretensado, fisuramiento de estribos, impacto longitudinal entre estribo y tablero, impactos con topes sísmico, impactos de escombros, daño de topes sísmicos, movimiento residual de tableros) longitudinales o transversales), daños en elastómeros, corte o deformación de barras antisísmicas, deformación del tablero, daño por impacto debido a accidentes, daños en juntas sísmicas, impactos entre secciones de tableros, efectos de retracción por temperatura, efectos de filtraciones de agua y escurrimiento, daños debido al mal uso o por efectos externos producidos por personas, delaminación, desconchado, contaminación por cloruros, eflorescencia, formación de etringita, desgaste y grieta por fatiga.
Acero	Corrosión, socavación, agrietamiento por fatiga, daño por temperatura, daño por colisión, sobrecarga.
Mampostería	Grietas, fisuras, erosión, daño por incendio deterioro del mortero, desplome de elementos, deformación estructural y deterioro de impermeabilidad.
Madera*	Efectos naturales desgaste, deterioro, insectos, contaminación química, delaminación, conexiones sueltas, daños por incendio, intemperismo, deformaciones, fallas en el revestimiento.

Nota. Extraído y adaptado: Para concreto, acero y madera (Ahlborn et al., 2010; Prendergast et al., 2018; Seguel, 2019) y mampostería (Acito et al., 2023; Ahlborn et al., 2010; Brencich & Morbiducci, 2007).

**Para la madera se complementa la información de la sección del “Anexo 05: Defectos y problemas de los puentes” de la guía de Inspección de puentes (MTC, 2006).*

Los daños mencionados en la **Tabla 11** se producen de acuerdo a los materiales de construcción. Para estudiarlos existen normativas que mencionan el estudio de la condición del material al momento de estudio tomando en cuenta distintos factores de daño. En la **Tabla 12** se describe normativas que mencionan el muestreo del material para conocer la condición en la que se encuentra.

Tabla 12. Normativas para la evaluación de materiales.

Normativa	Descripción
ACI 318-19: Requisitos del reglamento para	Considerar solo el capítulo 27: Evaluación de la resistencia de estructuras existentes: Requisitos de seguridad de calidad

concreto estructural	<p>en función al deterioro mediante ensayos de carga. (ACI, 2019a)</p> <p>Complementar con las siguientes normativas:</p> <p>ACI 214.4R: Guía para la obtención de núcleos e interpretación de resultados de resistencia a la compresión.</p> <p>ASTM C42M: Método Normalizado de obtención y ensayo de núcleos perforados.</p> <p>ACI 437.2: Pruebas de carga de estructuras de concreto.</p>
<p>ACI 562-19: Requisitos del código para evaluación, reparación y Rehabilitación de Existentes Estructuras de Concreto</p>	<p>Se considera dentro de la normativa se considera para concreto convencional, concreto pretensado y concreto prefabricado.</p> <p>En el “Ítem 6.3. Propiedades de materiales” menciona los estudios básicos y parámetros de resistencia a compresión del concreto y limite elástico de los aceros de refuerzo en estructuras existentes(ACI, 2019b).</p> <p>Se complementa el “Ítem 6.4. Métodos de pruebas para cuantificar las propiedades de los materiales” para el estudio de la calidad de materiales mediante ensayos destructivos y no destructivos, las cantidades y ubicaciones de muestra para unificar el material (ACI, 2019b).</p> <p>Complementar con las siguientes normativas:</p> <p>ACI 228.1R: Métodos in-situ para determinar la resistencia del concreto (métodos no destructivos más especificados en el ítem 4.4)</p> <p>ASTM C823: Práctica estándar para el examen y muestreo de concreto endurecido en construcciones</p> <p>ACI 365.1R: Predicción de la vida útil del concreto.</p> <p>ACI 364-19: Guía para la evaluación de estructuras de concreto antes de la rehabilitación.</p> <p>ACI 369.1: Evaluación sísmica de modernización de edificios existentes de concreto.</p>
<p>ACI 440.1R-15: Guía para el diseño y construcción de concreto estructural reforzado con barras de polímero reforzadas con fibra (FRP)</p>	<p>La normativa considera AFRP, CFRP y GFRP. En el ítem del “Capítulo 5: Durabilidad”, menciona pruebas para verificar la durabilidad, cambios de resistencia y rigidez en entornos de agua, exposición a rayos ultravioleta, temperaturas elevadas, soluciones alcalinas o acidas y soluciones (ACI, 2015).</p> <p>ASTM D7705-12: Método de prueba estándar para la resistencia a los álcalis de barras compuestas de matriz de polímero reforzado con fibra (FRP) utilizadas en la construcción de concreto.</p>
<p>ACI 562-19: Requisitos del código para evaluación, reparación y Rehabilitación de Existentes Estructuras de Concreto</p>	<p>En el “Ítem 6.4. Métodos de pruebas para cuantificar las propiedades de los materiales” menciona el muestreo y ensayos del acero de refuerzo dentro del concreto (ACI, 2019b).</p> <p>ASTM A370: Método de prueba estándar y definiciones para pruebas mecánicas de productos de acero.</p> <p>ASTM A1061: Método de prueba estándar para el acero de refuerzo en concreto pretensado.</p>

AWS D1.4: Código estructural de soldadura – Barras de acero de refuerzo.

MTC 2006: Guía de Inspección de Puentes En la sección del “**Anexo 06: Pruebas en los componentes de un puente**” muestra ensayos semi - destructivos y destructivos sugeridos para los materiales constituidos mencionando a la corrosión como el principal problema con más ensayos mencionado (MTC, 2006).

Nota. Extraído y adaptado (ACI, 2015, 2019a, 2019b; MTC, 2006)

En un puente el comportamiento y progreso de los daños aumenta cuando se desarrolla una primera anomalía (Calvert et al., 2021). Por ejemplo, según Zhang et al., (2023) el acero con bajo contenido de carbono tiene menor resistencia a la corrosión lo cual provoca una disminución en la capacidad de carga del puente. Siendo considerado la corrosión el factor clave de desgaste en puentes de armadura, arco y en algunos casos en puentes de viga mixta. Por ello, dichos daños se estudian de acuerdo a la localización e intensidad, estos se tipifican en daños locales y globales.

4.3.3. Tipos de daños

En este ítem se describe la identificación del tipo de daño mediante niveles de estudios planteados por el SHM. A consecuencia de los factores de daño, la vulnerabilidad en los puentes se puede identificar de manera visual en todo el sistema o solo en algunos elementos. Por ello, se proponen dos tipos de inspecciones de acuerdo al objetivo de estudio del elemento estructural (daño local) y el estudio de todo el sistema estructural (daño global) del puente con el objetivo de verificar la condición del puente.

a) Niveles de identificación de daño

Los factores de daños pueden ser imperceptibles a lo largo de los años, pero debemos tener en cuenta que es importante estudiar la condición estructural del puente. Si el daño en algún elemento estructural se acumula sin ser detectado ni

puesto en tratamiento temprano este seguirá extendiendo (Han et al., 2021). La presente guía propone “4 niveles de estudio de daños” como se muestra en la **Figura 41**, de acuerdo a la definición del SHM con el objetivo de diagnosticar y tipificar el daño mediante la metodología de la salud estructural. Esta definición viene de la mano con el tipo de daño a estudiar si es de tipo daño local y global.

Figura 41. Niveles de identificación de daño

NIVEL I	NIVEL II	NIVEL III	NIVEL IV
DETECCIÓN DE DAÑOS	LOCALIZACIÓN DE DAÑOS	CUANTIFICACIÓN DE DAÑO	PRONOSTICO DE DAÑO
Identificar la presencia de daño de manera visual.	Identificación de la ubicación de daño para estudiarlo.	Identificar y determinar la magnitud y severidad del daño.	Predicción de la vida útil de la estructura.



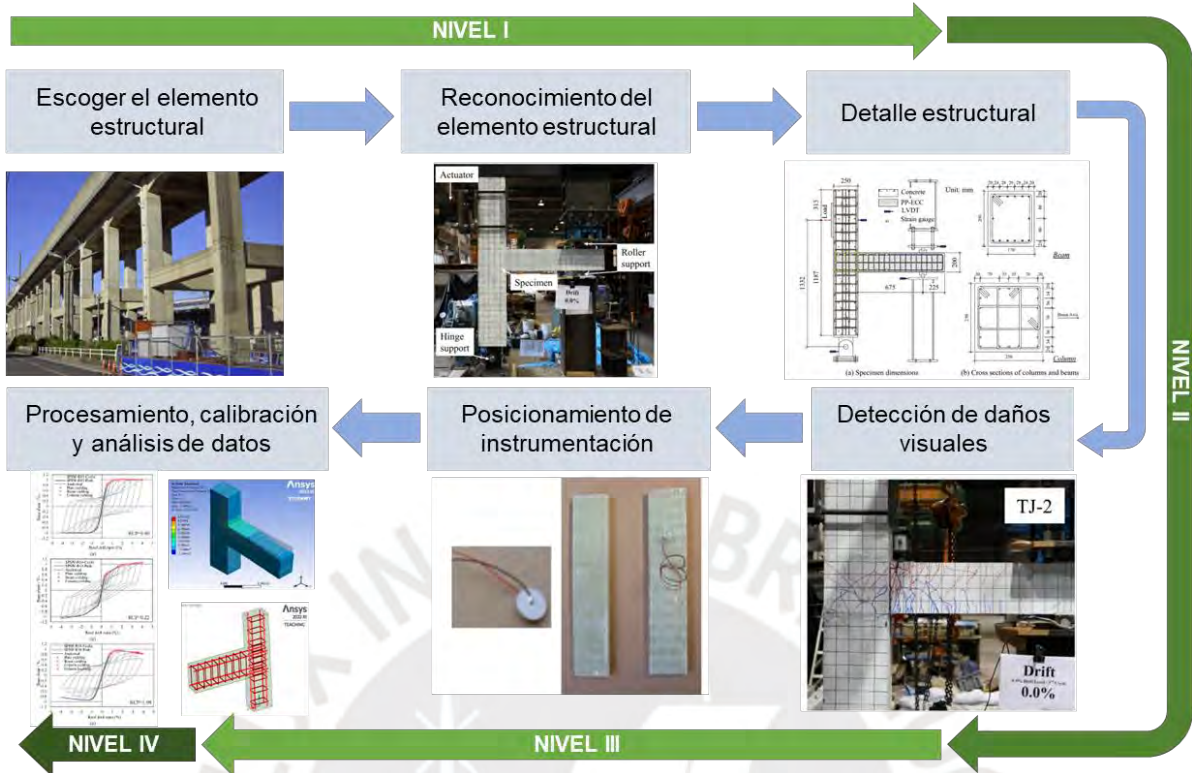



Nota: Elaboración Propia

b) Daños locales

Dentro del daño local se propone el estudio en un elemento estructural mediante la metodología para analizar el daño local que se muestra en la **Figura 38**. Para conocer los daños locales es mejor revisar, observar la geometría de puente y el elemento a estudiar para darle la exactitud de daño (Han et al., 2021). Por ello, en la **Figura 42** se reconoce un flujo de proceso de estudio del elemento estructural, reconocer los detalles estructurales de amarre, geometría, materiales, detectar de daños mediante instrumentos tecnológico, procesamiento, calibración y análisis de datos obtenidos del monitoreo. Dichos datos se posicionan de acuerdo al objetivo del nivel de identificación de daño.

Figura 42. Metodología para el análisis de daño local.



Nota: Elaboración propia.

c) Daños globales

El daño global de un puente puede abarcar desde fisuras, grietas y otros daños. Por ejemplo, la corrosión es una de las principales causas de deterioro en puentes de acero. Según Svendsen et al. (2022) muchos daños encontrados en puentes de acero son causados por la fatiga producida por cargas de tráfico y estas suelen ocurrir en conexiones entre elementos principales de soporte de vigas y columnas o entre conexiones de los arriostramientos. Existen casos de corrosión en vigas presentes en las juntas de tablero de puentes antiguos (S. Zhang et al., 2023). Según el MTC (2006) muestra parámetro de condición del puente global del 0 al 5 en el cual va de “muy bueno” a “pésimo” mientras que en Ahlborn et al. (2010) muestra un calificativo de 9 a 0 condicionando desde excelente condición a condición fallida. Por ello se propone la siguiente tabla con los parámetros de daños de acuerdo a estas dos condicionales:

Tabla 13. Parámetros de daños global

Índice de daño	Severidad de daño	Descripción de la condición
0	Condición fallida	Perdida de sección presente en algún elemento estructural en puntos críticos. Este daño es tan evidente que se puede poner fuera de servicio. Colapso estructural.
1	Condición de falla inminente	Gran deterioro presente en elementos estructurales o puede que la socavación haya afectado de manera más invasiva a la subestructura. Seguridad de ocupantes comprometido.
2	Condición crítica o pésima	Presencia de desplazamientos horizontes o verticales que afectan la estabilidad de la estructura. Se presentan fallas locales en las secciones con perdida estructural. Elementos no estructurales desgastados.
3	Estado grave o muy malo	Avanzado deterioro de los elementos estructurales principales. Presencia de grietas de fatiga en acero o grietas de corte en concreto. Perdida de sección de elemento estructural o presencia de socavación.
4	Condición pobre o malo	Buen estado de elementos estructurales primarios, pero puede existir perdida menor de sección, deterioro, socavación, posibilidad de fracturas locales, descascarado, rajaduras en el concreto o fatigas en el acero.
5	Condición justa o regular	Loa elementos primarios están en buen estado, pero algunos elementos secundarios muestran deterioro. Algo de perdida de sección, grietas, descascaramiento o socavación perdida de sección avanzada.
6	Condición satisfactoria	Hay problemas de deterioro menores o sin importancia en algunos elementos estructurales.
7	Buen estado	Algunos problemas menores
8	Muy buena condición	No se observan problemas
9	Excelente condición	No se observan problemas. No hay daño estructural y no estructural lo cual cumplen las funciones de diseño.

Nota: Elaboración propia, extraído y adaptado (Ahlborn et al., 2010; Calvert et al., 2021; Darban et al., 2021; MTC, 2006)

4.3.4. Estudio de parámetros de entorno

Definidos los ítems anteriores, en esta sección se debe considerar la generalización de las condiciones físicas y el estudio de condiciones ambientales a las que se verá afectado el día del estudio. Se necesita un estudio de condiciones ambientales para escoger los sensores adecuados, estudiando las cargas medioambientales que afecten y estimen la variabilidad de la data a obtener (Seguel,

2019). Para generar un adecuado BHM se debe verificar las condiciones reales de la zona a estudiar para realizar combinaciones y un sistema de sensores u otros dispositivos a usar. La humedad, temperatura y presión pueden ser algunos factores ambientales que afecten a la obtención de data real generando ruido en la data o afectando la propiedades mecánicas de los propios dispositivos (Dong et al., 2010). Para esta sección se puede orientar con reportes de climas nacionales para verificar el medio ambiente y como esto pueda afectar a los monitoreos (SENAMHI, 2020b, 2020a). Por ello se propone una serie de sugerencias de acuerdo a resultados de monitoreos realizados:

- (i) La temperatura y humedad pueden ser factores directos de obtención de data creando ruido blanco que puede traer problemas al momento de procesar la data (Viviescas et al., 2018)
- (ii) Los parámetros ambientales afectan directamente los resultados de las deformaciones unitarias variando los resultados (Bacuilima & Barbecho, 2022)

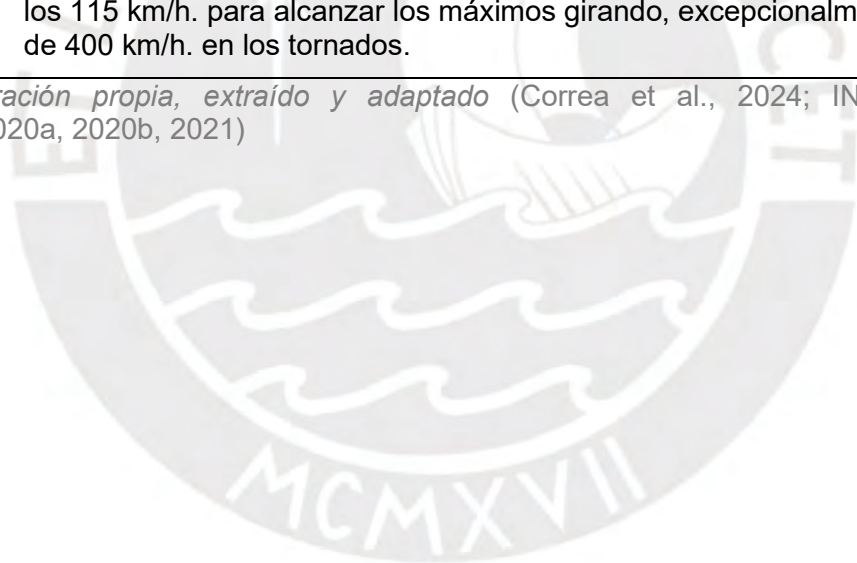
En el Perú, existen entidades que estudian parámetros de entorno como INDECI y SENAMHI que muestran resultados en factores generales de causales de daño. Se muestra la siguiente tabla con los parámetros de entorno que varían en la obtención de datos del monitoreo.

Tabla 14. Parámetros de daños global

Factores	Rango	Descripción de la condición
		Existen 442 estaciones meteorológicas que brindan los datos de temperaturas máximas y mínimas.
Temperatura Ambiental	Frío	Se reportó en el 2003 una temperatura mínima de -28.2°C en "Chuapalca" -Tacna.
	Norma	En el Perú se debe considerar: - La región geográfica: costa, sierra y selva.

	- Estación del año: primavera, verano, otoño e invierno.
Calor	Se reportó en el 2022 una temperatura máxima de 41.8°C en "Aramango" – Amazonas.
Lluvia	Existen 651 estaciones meteorológicas que brindan los datos de en precipitaciones.
Costa	La existencia del "Fenómeno del niño" ha generado mayores precipitaciones en la costa generando vulnerabilidad en puentes.
Sierra	La Sierra se caracteriza por tener precipitaciones extremas, pero también sequías extremas, por ello se debe trabajar con datos máximos de lluvias.
Selva	La geografía del suelo inestable más las precipitaciones constantes de mediana y alta intensidad genera vulnerabilidad en puentes.
Humedad	Es el contenido de vapor de agua en el aire. Existe la humedad absoluta o la razón de mezcla general y la humedad relativa la cual indica el grado de saturación de la atmósfera. Ambos expresados en porcentaje (%)
Viento	Aire en movimiento a causa de los contrastes de presión atmosférica; sus datos básicos son los de dirección y velocidad. Las velocidades varían desde las rayanas con la calma (5 km/h.) a las huracanadas que exceden los 115 km/h. para alcanzar los máximos girando, excepcionalmente, a más de 400 km/h. en los tornados.

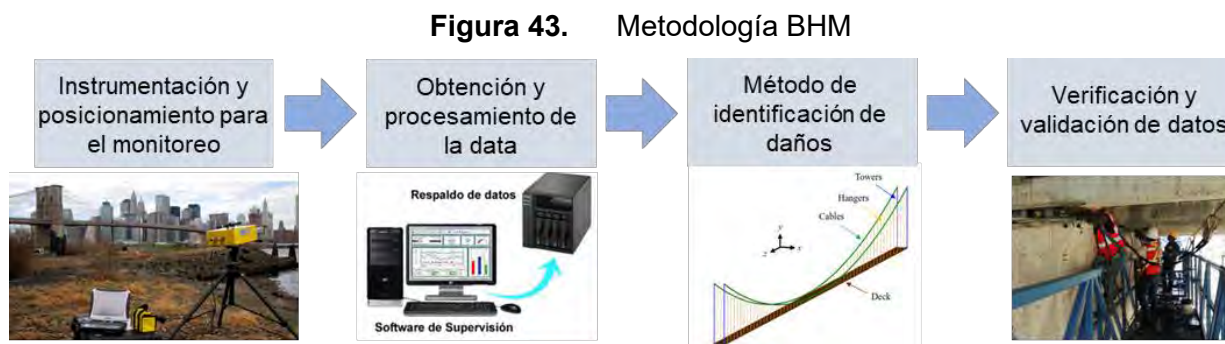
Nota: Elaboración propia, extraído y adaptado (Correa et al., 2024; INDECI, 2017; SENAMHI, 2020a, 2020b, 2021)



SECCION II: METODOLOGÍA BHM

Con los antecedentes planteados en la **Sección I: Obtención de la Data Histórica**, se trabaja en la identificación de daños mediante un proceso tecnológico, Por ello el BHM propone crear un proceso de identificación de daños mediante sensores tecnológicos y algoritmos (Han et al., 2021). Existen limitaciones que se deben tomar en cuenta como por ejemplo el uso de sensores inalámbricos que dependen de la energía de la batería y necesitará un mantenimiento más frecuente de lo cotidiano (Omar & Nehdi, 2018). Resultados en el monitoreo de puentes con BHM ha mostrado mejores resultados en la toma de decisiones (Darban et al., 2021).

En la **Figura 43** muestra la metodología de la segunda parte de la guía. En la primera parte de esta sección se muestra los diferentes tipos de instrumentos de monitoreo con ventajas y desventajas de su uso, además de un resumen de aplicación de estas técnicas en diferentes casos para sugerencias en el posicionamiento de los instrumentos. Como segundo punto a enfatizar, se encuentra la obtención de data mediante los instrumentos y como estos son procesados mediante diferentes técnicas y tecnologías. En el tercer punto se proponen las técnicas de identificación de daños mediante la aplicación en investigaciones por tipo de puente, los cuales se organizan por la tipología dentro de la presente guía. Finalmente, se describen los parámetros de gravedad de daño del puente al margen global y posibles alternativas mostradas en los resultados de investigaciones.



Nota: Elaboración Propia.

4.4. INSTRUMENTACIÓN PARA EL MONITOREO

En esta sección se define y recomienda los tipos de instrumentos de monitoreo, describiendo ventajas y desventajas de uso para que el inspector pueda escoger los sensores de acuerdo a la vulnerabilidad o conveniencia del entorno. Se puede crear un sistema de varios tipos de instrumentos de monitoreo siempre y cuando se cumplan los objetivos del proyecto (Bisby, 2006). Para escoger los sensores o instrumentos de monitoreo se debe tener en cuenta ciertos puntos (Dong et al., 2010).

En esta sección propone: Primero, el estudio de acuerdo al material con los ensayos de monitoreo como se muestra en la **Tabla 15**; segundo, las ventajas y desventajas de los ensayos destructivos y no destructivos en general; tercero, combinación de instrumentos de monitoreo con objetivos de estudio.

Para la constitución de los materiales existen ensayos destructivos y no destructivos (ACI, 2019b). Además, en el **ítem 4.2.2. Tipos de Materiales** se propuso al concreto, acero, mampostería y madera como materiales de construcción básicos. En la siguiente tabla se resume los tipos de ensayos destructivos y no destructivos aplicados en los materiales propuestos en la presente guía.

Tabla 15. Ensayos de acuerdo a la constitución de material.

Material	Tipo de prueba	Ensayos
Concreto	No destructivos	Ondas acústicas sónicas, maquinaria de detección de delaminación, radar de penetración terrestre, métodos electromagnéticos, velocidad de pulso, prueba de conector plano, prueba de eco impacto, termografía infrarroja, prueba ultrasónica con láser, perturbación del campo magnético, métodos nucleares, pacómetro, métodos de rebote y prueba de penetración ultrasónico.
	Destructivos	Muestreo de núcleos, carbonatación, permeabilidad del concreto, resistencia del concreto, endoscopio, videoscopio, contenido de humedad, resistencia del acero de refuerzo, examen petrográfico.
Acero	No destructivo	Prueba de emisiones acústicas, sensores de corrosión, pintura inteligente, tinte penetrante, partículas magnéticas, pruebas radiográficas, computadora tomográfica, pruebas ultrasónicas, corriente de Foucault.
	Destructivo	Prueba de dureza Brinell, prueba de impacto Charpy, prueba de resistencia a la tracción.
Mampostería: Piedra, ladrillo y otras propiedades de mampostería.	No destructivo	Inspección visual, prueba de sonido, prueba de penetración de líquidos, prueba de ultrasonido, prueba de rayos x, prueba de resistencia al impacto
	Destructivo	Ensayo de compresión, ensayo de tracción, ensayo de flexión, ensayo de dureza, ensayo de absorción de agua, ensayo de resistencia al hielo-deshielo
Madera	No destructivo	Pol-Tek, análisis espectral, pruebas ultrasónicas, vibración.
	Destructivo	Perforación, contenido de humedad, sondeo, shigometro,

Nota: Elaboración propia.

Dentro de los estudios que se presentaron existen los ensayos destructivos y no destructivos de acuerdo al tipo de material. El BHM propone estudiar los materiales y daño mediante inspecciones menos intrusivos para la estructura. En la actualidad ya se pueden estudiar diferentes parámetros característicos en los materiales constituidos en los puentes mediante tecnologías avanzadas como el uso de sensores. Por ello, la siguiente tabla presenta las ventajas y desventajas de las técnicas e instrumentos de monitoreo con tecnologías emergentes. Se recomienda revisar esta tabla como decisión preliminar para la propuesta de monitoreo.

Tabla 16. Ventajas y Desventajas de técnicas de monitoreo

Sensor	Ventajas	Desventajas
Sensor de fibra óptica	La varilla FBG controla la profundidad de socavación en puntos discretos.	Solo detecta la socavación local de cada sensor FBG.
Sensores de aceleración	Tamaño y peso pequeño. Uso para monitoreo de vibraciones.	Baja precisión en el desplazamiento estático.
Sensores de tensión	Mide el desplazamiento vertical global en un puente. Mide la deformación del marco de un sistema estructural.	Se necesita un sistema de DAQ para la obtención de data.
Sensores Basados en vibraciones	Mide cambios en las frecuencias naturales de las varillas impulsadas debido a la socavación Se ajustan las propiedades en el modelo numérico para verificar el módulo de la subrasante	Solo detecta la socavación local de los sensores y puede pasar por alto los efectos de socavación global
Sensores de desplazamiento	De fácil uso. Fácil recopilación de datos mientras tenga un sistema DAQ. Medición de deflexión.	Mucho tiempo de instalación. No apto para instalación en puentes de grandes luces.
Estación total robótica	Alta precisión. Automatización de toma de datos. Mide coordenadas tridimensionales.	Una tarea a la vez. No se puede realizar mediciones dinámicas.
Topografía por satélite GPS	Monitoreo continuo. No depende de los parámetros ambientales en la toma de datos. De alta precisión.	De alto costo. Poca demanda en medición.
Cámaras de detección de movimiento	Mide desplazamientos mediante el análisis de la serie de fotogramas de fotografías. Necesita luz natural para la obtención de buena data.	Variación de la precisión debido a la presencia de los parámetros ambientales.
Correlación cruzada de imágenes digitales	Medición óptica de desplazamiento. Uso de fotografía digital.	Necesita validar los datos con otros métodos y generar precisión de resultados.

	Sensores inalámbricos	
Sensores de radar	Costos bajos. Estudio de las señales de onda del sensor de radar.	Problemas en el procesamiento de datos por presencia de ruido.
Vibrómetro láser Doppler	Mide la vibración y el desplazamiento de puentes. Buena precisión de resultados. Dispositivo de gran tamaño.	No dejar sin supervisión. No recomendable para monitoreo a largo plazo.
Escaneo láser terrestre	De rápido levantamiento de modelado 3D.	Baja precisión de monitoreo. Pos procesamiento de datos masivos es complicado.
Detección por proyección láser	Muestra la variación del desplazamiento dinámico. De rápido levantamiento de datos mediante imágenes.	Los dispositivos sin de alta tecnología en el láser y cámara de alta resolución.
Eco Impacto (IE)	Buena precisión en la obtención de datos.	Pierde efectividad en las capas de asfalto. Difícil de obtener para estudios.
Eco de pulso ultrasónico (UPE)	Preciso en la gravedad de daño presente. Depende de la composición del material (en el concreto va depender del tipo de agregado ya que puede crear mayor dispersión de resultados).	Demanda mayor cantidad de tiempo. No recomendado para daños superficiales.
Sonic fathometer	Fijado en su lugar al elemento del puente. Mide la interfase agua-sedimento. Mide la socavación local al elemento.	Puede verse afectado por el aire arrastrado en flujo turbulento.
Potencial de media celda (HCP)	Evalúa la corrosión.	La resistividad del concreto puede afectar directamente en los resultados. Los parámetros ambientales como la humedad causan cambios en la toma de datos

Radar de penetración terrestre (GPR)	Es rentable. Eficiente para monitoreo de amplias áreas lineales. Procesamiento de datos inmediato.	No detecta la delaminación si existe poca o casi nula humedad en el área de estudio. No muestra pérdidas de sección o desgaste en acero de refuerzo. Manipulación manual por ello no se recomienda para monitoreo remoto
Termografía infrarroja (IRT)	Visualización a tiempo real Inspección rápida Es rentable	Se obtienen resultados con poco detalle de defectos Variable ante parámetros medioambientales.
Interruptores enterrados atados	Funcionamiento mecánico simple Instalado cerca del pilar del puente Indica cuando la socavación alcanza su profundidad flotando hacia arriba y enviando una señal	Requiere reinstalación después de flotar hacia arriba Solo indica la socavación

Nota: Extraído y adaptado (Enckell, 2011; Omar & Nehdi, 2018; Prendergast et al., 2018; Seguel, 2019)

Investigaciones muestran que no solo se necesita de un tipo de instrumento para monitorear los puentes, las técnicas se deben combinar para poder filtrar datos de parámetros físicos y medioambientales. Por ello en la siguiente tabla se muestran algunos estudios que combinaron tanto ensayos destructivos como no destructivos (NDE) y su objetivo de estudio.

Tabla 17. Combinación de técnica

Técnicas de Monitoreo	Objetivo de estudio
Sensores de vibración sincronizados con GPS en vehículos como en los puentes, VBI.	logrando una sincronización temporal estable y de alta precisión
Infrarrojos, Radar	Detección de delaminación
Radar, arrastre de cadena, potencial de media celda	Detección de daños
Eco de impacto, radar, arrastre de cadena	Estudio comparativo
Infrarrojos, Arrastre de cadena	Detección de delaminación
Radar, eco de impacto, respuesta dinámica	Detección de daños
Radar, eco ultrasónico, sonda de martillo	Estudio comparativo
Eco de impacto, radar, infrarrojo	Estudio comparativo.

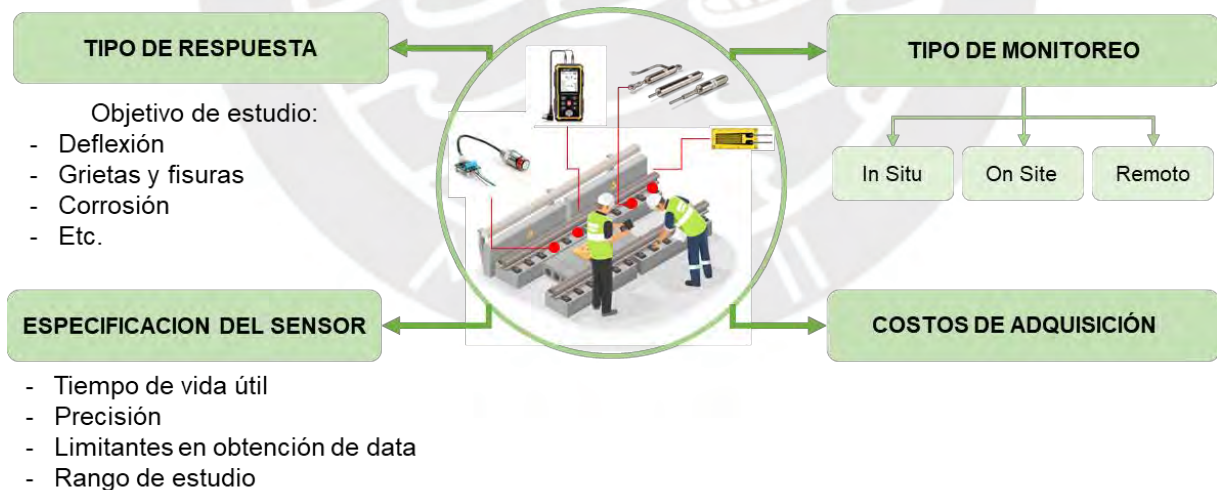
Eco de impacto, eco ultrasónico	Medición de espesor.
Eco ultrasónico, radar, infrarrojo, potencial de media celda	Estudio comparativo.
Eco de impacto, radar, media celda, ondas de superficie ultrasónicas, resistividad eléctrica, infrarrojos, eco de pulso, respuesta al impulso	Estudio comparativo.
Eco de impacto, infrarrojo, arrastre de cadena	Detección de daños
Tecnologías integradas de inspección visual y teledetección.	Mapear patrones de deformación, como grietas superficiales, desconchado, incrustaciones y erosión.
Técnicas basadas en vibraciones, sensores de socavación.	Daño por socavación.
Técnicas de emisión acústica (ondas de tensión).	Daños por fatiga.
Potencial de media celda, resistividad eléctrica.	Potencial de corrosión.
Eco impacto y termografía infrarroja acoplada al aire.	Detección de delaminación y grietas.
Técnicas magnéticas (utilizando medidores de reluctancia magnética).	Detección de corrosión en cordones de pretensado (en puentes de vigas cajón de concreto adyacentes).
Técnicas de monitorización de la salud (mediante sensores de deformación) y FEM.	Daños en puentes colgantes de gran envergadura.
Técnicas de emisión acústica (ondas de tensión).	Rendimiento inicial en vigas de concreto postensado.
Tecnologías de teledetección y monitorización de la salud.	Defectos del subsuelo en los componentes de la superestructura.
Técnicas sísmicas y ultra sísmicas paralelas.	Se desconoce la profundidad, integridad y tipo de cimentación.
Radio Modern, electrodos de referencia, voltímetro de alta impedancia y equipos de corrosión (GECOR 6)	Se muestran los resultados de corrosión en concreto armado.
Red de sensores FOS, transductores tradicionales	Se muestran los desarrollos del agrietamiento en el concreto armado.
FOS, SmarTape, sensor de temperatura, tres interrogatorios y conexión de banda ancha.	Se crearon algoritmos de desarrollo y procesamiento de grietas mediante los resultados de tensión y temperatura.
GNSS, velocímetros y acelerómetros	Identificación de vibraciones de alta frecuencia y desplazamientos de baja frecuencia.

Nota. Elaborado a partir de resultado de investigaciones (Castañeda et al., 2001; Enckell, 2011; Mudahemuka et al., 2024; Omar & Nehdi, 2018; R. Zhang et al., 2020)

Para la presente guía, se propone otra clasificación de instrumentos de monitoreo debido al tipo de entorno, tiempo de monitoreo y tipo de daño. Se debe

tomar en cuenta los cuatro puntos que se muestran en la **Figura 44** para escoger instrumentos adecuados de acuerdo a la necesidad, los cuales son: el objetivo de estudio, especificaciones técnicas de los instrumentos, tipo de monitoreo y costos de adquisición. Cabe mencionar que dentro de la guía propuesta se da el énfasis a los ensayos no destructivos, por ello la clasificación se realiza por equipos que obtendrán data real en el sitio por un periodo de tiempo muy corto, largo y de manera remota (Ahlborn et al., 2010). Esto debido a que los instrumentos in situ requieren un tiempo necesario para la obtención de datos y estos puedan estudiar la variabilidad de acuerdo a las estaciones del año. Mientras que el on-site permite dejar los dispositivos por un periodo corto de tiempo o de manera rápida. Además, existen los instrumentos remotos que no requieren de instalaciones previas en el lugar del monitoreo. Esta clasificación de los instrumentos de monitoreo se menciona con más detalle dentro de esta sección.

Figura 44. Lineamientos para escoger un adecuado instrumento

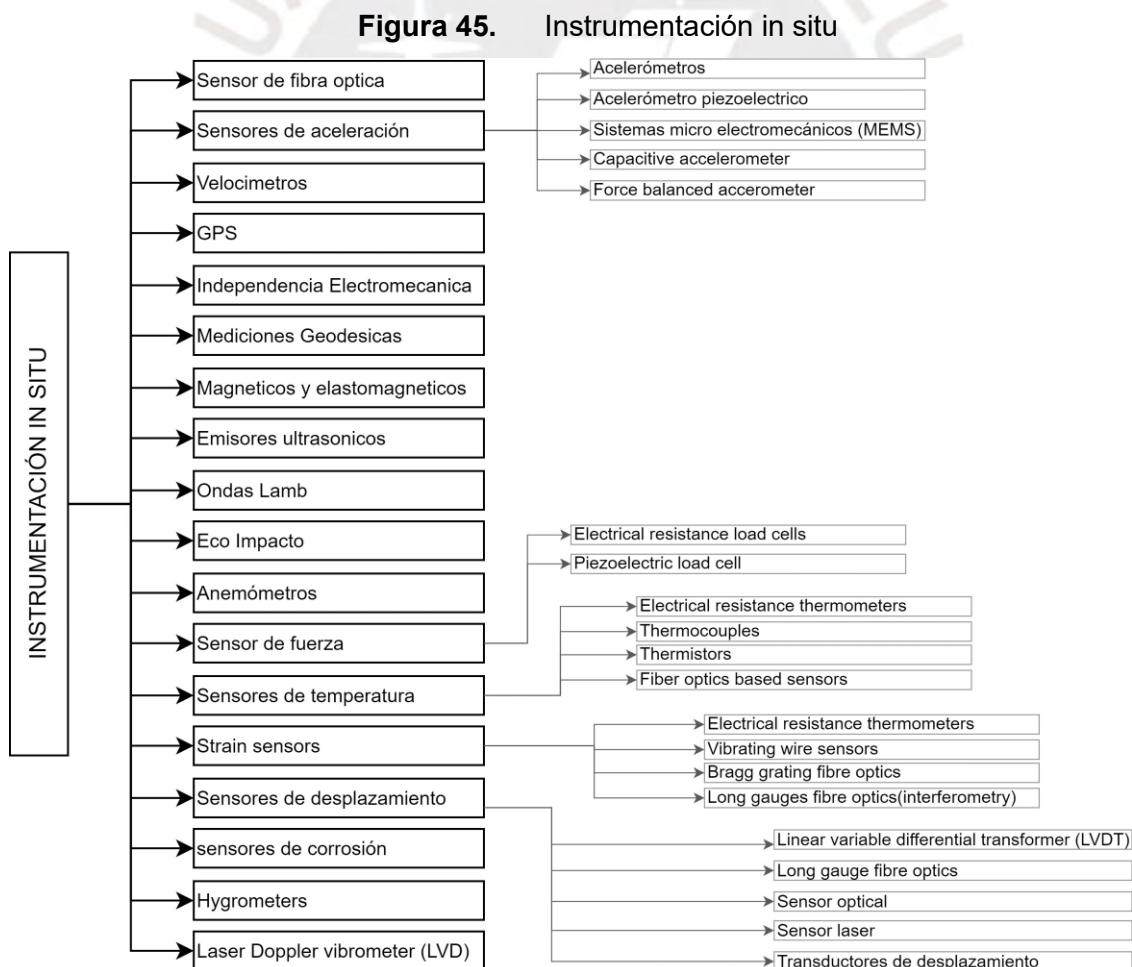


Nota: Elaboración propia

A continuación, se explaya los tres tipos de instrumentaciones de monitoreo, estos están clasificados de acuerdo al objetivo general de uso, independientemente de si este sea de monitoreo corto, mediano o largo plazo.

4.4.1. Instrumentación in situ

Son instrumentos que se aplican en un tiempo corto, temporadas medianas y largas para la obtención de datos. En algunos este tipo de instrumentos pueden quedarse por estaciones del año para analizar en la variabilidad de parámetros ambientales de acuerdo a la estación de estudio y cómo se comporta durante todo el año. Esto mejora la precisión de los algoritmos haciendo que el modelo pueda predecir con mayor exactitud el daño y se anticipe ante fenómenos que causan daño inminente. Estos instrumentos se colocan en el sitio durante el periodo al cual este planificado. En la siguiente figura se mencionan la mayor cantidad de tipos de sensores mencionados y recopilados de investigaciones.



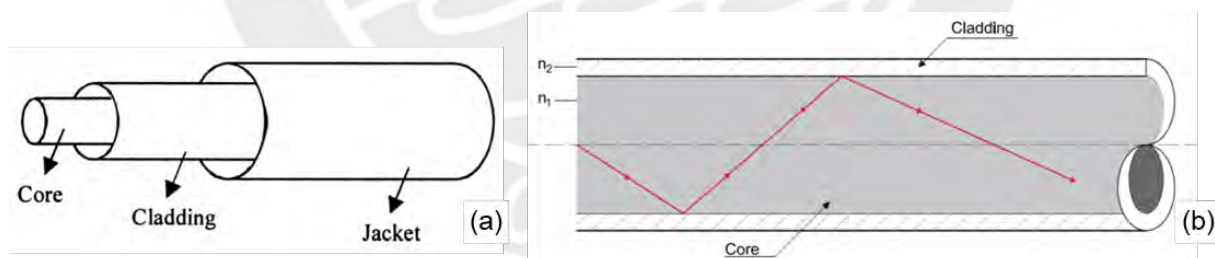
Nota. Adaptado de (Ahlborn et al., 2010; FHWA, 2022; Khedmatgozar Dolati et al., 2021; Seguel, 2019)

A continuación, se mencionan algunos sensores con definiciones, detalles y características de uso.

(i) Sensor de fibra óptica (OFS)

Estos sensores captan los cambios de temperatura, tensión, vibración y ondas acústicas mediante el contacto directo entre el sensor con el material mediante un pegamento especial (Gupta, 2006). Para Seguel (2019) pueden medir desplazamientos, localización de grietas, esfuerzos e inclinaciones. Para captar cambios se realiza a través de la señal modulada de la dispersión de la luz con la que entra a lo largo de toda una fibra (Barrias et al., 2016). En la **Figura 46 (a) y (b)** se muestra la estructura interna de OFS y como es su comportamiento con la luz. Este sensor tiene una estructura cilíndrica de 2 revestimientos y un núcleo de vidrio o plástico de diámetro entre 4 y 600 μm y el índice de refracción uniforme (Barrias et al., 2016; Gupta, 2006). Además, estos sensores no son afectados por el EMI (Dong et al., 2010).

Figura 46. Sensor de Fibra Óptica

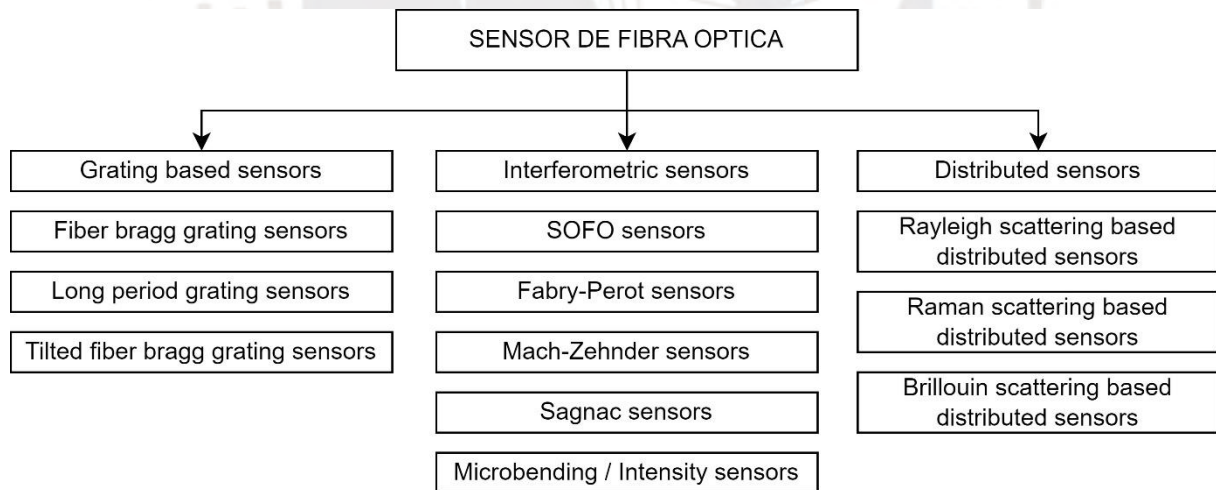


Nota. (a) Geometría de la fibra óptica (Extraído de (Gupta, 2006)). (b) Guiado y reflexión de la luz en una fibra óptica (Extraído de (Barrias et al., 2016)).

Este tipo de sensores tiene las características de durabilidad, estabilidad, pequeño tamaño e insensibilidad a las perturbaciones electromagnéticas externas por ello son mejores para la evaluación a largo plazo (Bao & Chen, 2012). Además permite mapear las deformaciones en dos o tres dimensiones verificando un comportamiento real global a partir de pocas mediciones (Barrias et al., 2016). Para

la utilización del OFS se debe tener en cuenta si la medición es en el dominio del tiempo como la Reflectometría Óptica (OTDR) o en el dominio de la frecuencia como la Reflectometría Óptica (OFDR) (Bao & Chen, 2012). Ya que este es un parámetro con el cual se va procesar la data. Además, existe tipificación de OFS diferentes con propiedades y características diferentes. Gupta (2006) define tres tipos: las fibras de índice escalonado multimodo, índice gradual multimodo e índice escalonado monomodo cuyas secciones y materiales varían de plástico, vidrio y metal. Mientras que Guo et al. (2011) propone sensores interferométricos, sensores distribuidos y sensores basados en rejilla. Además Barrias et al. (2016) muestra en la siguiente figura, estudios adicionales en los sensores distribuidos tomando en cuenta los tipos de dominios a los cuales se estudia. En la **Figura 47** se observa los tipos de sensores propuestos por la investigación mencionada.

Figura 47. Tipos de sensores de fibra óptica



Nota: Extraído de Barrias et al. (2016).

De acuerdo a lo descrito anteriormente, se muestra las características de aplicación usadas en otras investigaciones, para la siguiente tabla con los sensores ópticos más utilizados en el monitoreo de puentes.

Tabla 18. Rendimiento de las técnicas de detección distribuida y cuasi distribuida.

Tecnología de detección	Tipo de transductor	Rango de detección	Resolución espacial	Tiempo de medición	Principales medidas	Ventajas	Desventajas
Raman OTDR	Distribuido	900 m 37 Km	1 cm 17 m	<3 min	Temperatura	Puntos de detección infinitos y fibra integrada	Solo Temperatura y alto costo
OTDR: Reflectómetro óptico en el dominio del tiempo	Distribuido	Distribuido	1-10	< 1ms	Perdida de fibra y ubicación de rotura.	Amplias aplicaciones	Limitaciones de detección
BOTDR: Sensor reflectómetro óptico en el dominio del tiempo de Brillouin	Distribuido	20-50 Km	≈1 m	1-5 min	Temperatura y tensión	Puntos de detección infinitos y fibras integradas	Sensibilidad cruzada
BOTDA: Análisis óptico en el dominio del tiempo de Brillouin	Distribuido	150-200 Km	2cm (2Km) 2m (150Km)	2-5 min	Temperatura y tensión		
Rayleigh OFDR/OBR	Distribuido	50-70 m	≈1 m	(0.01-3) s	Temperatura y tensión		
FBG: sensores de rejilla de Bragg de fibra	Cuasi Distribuido	≈100 canales	2mm (Longitud de Bragg)	10+ min	Temperatura, tensión, rotura, presión y desplazamiento.	Linealidad en la respuesta, precisión, alta resolución y codificación WDM coherente	Sensibilidad cruzada.
Sensor Interferómetro Fabry-Perot	Punto	Paralelo y división del tiempo	0.1		Temperatura, tensión, rotación y presión.	Alta sensibilidad y precisión.	Punto único
Sensor Interferómetro SOFO	Calibre largo	Cuasi distribuido, división de la longitud onda	0.1		Deformación, fuerza y tensión.	Calibre alto y alta resolución espacial.	Baja velocidad (10s)

Nota. Extraído y adaptado (Bao & Chen, 2012; Barrias et al., 2016; Guo et al., 2011)

Se propone una serie de recomendaciones de acuerdo a investigaciones:

- Existe una gran fragilidad en las fibras desnudas por ello se debe asegurar que el sensor no se dañe durante el proceso de instalación o medición (Barrias et al., 2016). Por ello se debe tomar en cuenta el grosor de la capa intermedia y externa, de acuerdo a eso la obtención de data tendrá mayor exactitud.
- Al momento de colocar el sensor, cepillar la zona ya que esto puede perjudicar en la toma de datos generando picos altos y bajos. Al ser el concreto una superficie rugosa se propone lijar la zona y utilizar un pegamento especial (Barrias et al., 2016).
- Verificar el nivel de redundancia de los sensores.

- Los FBG tienen mayor robustez y fiabilidad en la técnica de empaquetado de sensores (Guo et al., 2011)
- Dentro de los beneficios se encuentra la alta resolución espacial, transmisión rápida de datos para monitoreo en tiempo real e inmunidad a las influencias electromagnéticas y las agresiones químicas (Gómez et al., 2021).
- Los sensores FBG detectan la tensión de los polímeros hinchados al contacto con el agua obteniendo el nivel de socavación (Prendergast et al., 2018)
- Dentro de las limitaciones se encuentra la complejidad de instalación al ser delicados y susceptibles a daños, sensibilidad a la presencia de parámetros ambientales, costo elevado de implementación, requiere algoritmos avanzados para el procesamiento de datos, requiere calibraciones y validación regular (Gómez et al., 2021)
- Aunque la instalación puede ser compleja, su detector de daños se puede realizar a nivel global y local, mediante la obtención de data y procesamiento con algoritmos (Seguel, 2019)

(ii) Sensores de aceleración

El uso de aceleraciones en el monitoreo de puentes permite estudiar la condición de cargas dinámicas para analizar las propiedades dinámicas como cargas y vibraciones para determinar los parámetros modales (Bacuilima & Barbecho, 2022). Además, los sensores de aceleración son dispositivos capaces de medir la aceleración lineal y angular en una estructura mediante vibraciones generadas por la carga dinámica (Seguel, 2019). Al instalar estos sensores estratégicamente en un puente, es posible recopilar datos precisos sobre las vibraciones, movimientos y comportamiento estructural de la infraestructura. Estos datos son fundamentales para evaluar la salud estructural del puente, detectar

posibles daños, y tomar medidas preventivas o correctivas según sea necesario. Los acelerómetros se han utilizado por su capacidad para detectar mayor frecuencia en desplazamientos tridimensionales globales con presencia de vientos fuertes (Ahlborn et al., 2010).

Existen acelerómetros inalámbricos, los cuales son equipos electrónico que miden la aceleración en tres dirección con bajo costo de aplicación pero tienen interferencia de campos magnéticos (Bacuilima & Barbecho, 2022). También existe la combinación de los acelerómetros con GPS de tipo sistema eléctrico inalámbrico que miden la aceleración mediante el cambio de frecuencia vibratoria de alta sensibilidad en daños (Cantero et al., 2019). Para el análisis de datos a nivel global se van a necesitar método de procesamiento de señales como el análisis de Fourier, filtros, transformada de Wavelet, entre otros (Seguel, 2019).

Tabla 19. Características del sensor de aceleración

CARACTERISTICA	DETALLE
Fenómeno a medir:	Mide la aceleración absoluta
Tipo de monitoreo:	Se puede realizar monitoreos locales y globales
Instalación:	Simple
Precisión:	± 0.001 (g)
Alimentación:	DC: 5V
Rango de mediciones:	$\pm 1.7, \pm 5, \pm 18$ (g)
Limitaciones:	Mediciones menores a 0.2 (Hz)
Requisitos técnicos:	Sin requisitos

Nota. Extraído y adaptado (Seguel, 2019)

Los **Sensores de tecnología de sistema microelectromecánica (MEMS)** son dispositivos muy pequeños que combinan los componentes electrónicos y mecánicos, captando la aceleración con respecto a la gravedad, además son máquinas pequeñas de sistemas electromecánicos del tamaño de un chip (MEMS, micro-electromechanical systems) con potencia de cálculo (Ahlborn et al., 2010). Los

MEMS son de material piezoeléctrico inalámbrico que miden las deformaciones y aceleraciones, además son los más indicados para implementar una red sensorial al ser inmunes al ruido y sensibles para la obtención de la data, de bajo consumo energético, bajo costo de implementación y de fácil integración en un sistema de monitoreo (Bacuilima & Barbecho, 2022). Estos sensores son conocidos por ser capacitivos, es decir que tienen un alto grado de precisión y estabilidad evitando mucho ruido o variación de parámetros ambientales (Seguel, 2019).

(iii) Global Positioning System (GPS)

Estos dispositivos han demostrado resultados favorables al momento de realizar la eficiencia de la toma de datos (Seguel, 2019). Calcular el desplazamiento basándose en la medición de los cambios de coordenadas en una, dos o tres dimensiones (Omar & Nehdi, 2018). El GNSS con el GPS miden los movimientos de los puntos monitoreados, se debe registrar en el puente los puntos bases y este obtendrá datos en tres direcciones en condiciones dinámicas y estáticas en el dominio de la frecuencia y el tiempo (Bacuilima & Barbecho, 2022).

Tabla 20. Características generales del GPS

CARACTERISTICA	DETALLE
Fenómeno a medir:	Desplazamiento
Tipo de monitoreo:	Global
Instalación:	Simple
Precisión:	H: ± 5 (mm), V: ± 10 (mm)
Alimentación:	AC/DC
Rango de mediciones:	H: ± 3 (mm), V: ± 5 (mm)
Limitaciones:	Frecuencias menores a 20 (Hz)
Requisitos técnicos:	Base de radio externo

Nota. Extraído y adaptado (Seguel, 2019)

(iv) Sensor de Potencial de Media Celda (HCP)

Este tipo de sensor electromecánico de método electroquímico en el que mide la diferencia de voltaje en barras de acero de refuerzo y armaduras de acero identificando la probabilidad de corrosión activa presente en el elemento estructural del puente (Omar & Nehdi, 2018). El sensor de corrosión electromecánico debe ser calibrado antes, durante y después del uso para ver la variabilidad en la toma de datos. Además, es sensible a la contaminación porque estudia la superficie corrosiva del metal.

(v) Emisores Acústicos (AE)

Los sensores de emisión acústica son de material piezoeléctricos o MEMS que miden la deformación unitaria mediante el cambio de ondas elásticas. Se puede obtener los daños en baja amplitud y son de bajo consumo de energía, pero son muy perceptibles a las condiciones atmosféricas por ello se necesita calibrarlo antes del monitoreo final (Bacuilima & Barbecho, 2022). La tecnología de los AE varia mediante el cambio de distribución de tensiones con la energía de deformación elástica del material a estudiar (Enckell, 2011).

Para que el sensor obtenga resultados es necesario que exista amplitud, duración de señal, energía, frecuencia, la cantidad de veces que supera el límite definido y el tiempo entre la primera vez que se supera el límite de amplitud máxima alcanzada (Seguel, 2019). Además, los AE pueden detectar la corrosión, presencia y extensión de grietas por fatiga, rotura de fibras en secciones, cables, tirantes o pre - cables siempre y cuando están calibrados (Enckell, 2011).

Tabla 21. Características generales de los sensores AE

CARACTERISTICA	DETALLE
Fenómeno a medir:	Emisiones acústicas

Tipo de monitoreo:	Local
Instalación:	Compleja
Precisión:	± 1.5 (dB)
Alimentación:	AC/DC
Rango de mediciones:	-63/80 (dB)
Limitaciones:	Sensible a ruido ambiental
Requisitos técnicos:	Utilización de varios sensores para identificar fallas

Nota. Extraído y adaptado (Seguel, 2019)

Eco de pulso ultrasónico (UPE): Es un método de propagación de ondas de tensión acústicas que se mide en el tiempo de tránsito de entrada a salida (Omar & Nehdi, 2018). El transductor emite pulsos cortos con alta amplitud de ondas ultrasónicas que al interpretarlas se podrá detectar delaminación, grietas, huecos, cangrejas, espesor de la cubierta y despegado de barras de refuerzo (Omar & Nehdi, 2018)

Recomendaciones:

- Requieren de un procesador de señal digital (DSP), un sistema adaptado para cada sensor, un programa que pueda detectar señales y el rango de frecuencia para permitir una correcta lectura.
- Se requiere una triangulación para la ubicación de sensores y captar las señales correctamente.

(vi) Eco Impacto (IE)

Método de propagación de ondas de tensión mecánica o sísmica de tipo acústica es decir, el estudio se realiza por medio de la lectura de ondas, donde exista el cambio de tonalidad es porque existe cambio de onda y las propiedades varían en esa zona (Omar & Nehdi, 2018). Detectan defectos de delaminación,

grietas, huecos, cangrejeras, detección de desprendimiento secciones de elementos estructurales y evalúan el módulo elástico del concreto (Omar & Nehdi, 2018).

(vii) Sensor de deformación

Es un sensor de lámina gruesa de cerámica de sistema eléctrico cableado de material piezorresistivo que capta la deformación unitaria mediante el cambio de voltaje por efecto del material, además estos sensores son económicos durables y precisos, pero necesitan calibración debido a los parámetros ambientales de entorno (Bacuilima & Barbecho, 2022).

Las galgas extensiométricas de tipo sistema eléctrico obtienen las deformaciones unitarias mediante el cambio de deformación de la lámina delgada que contiene (Bacuilima & Barbecho, 2022). Estos dispositivos trabajan con el principio de tracción y compresión en una superficie mientras los parámetros externos están controlados (Seguel, 2019). Este tipo de sensores son económicos y compactos pero puede tener fallas si existe interferencia electromagnética (Bacuilima & Barbecho, 2022). Por ello no es apto para medir la deformación en el tramo medio de puentes de gran longitud (Omar & Nehdi, 2018). Los sensores de grafeno constituidos por nano materia de carbono y grafeno son eléctricos y miden la deformación unitaria mediante el cambio de energía en la banda electrónica. Estas son livianas, compactas y de alta sensibilidad pero son de alto costo (Bacuilima & Barbecho, 2022).

Existen otros sensores de deformación a base de cemento con características eléctricas y miden la deformación unitaria mediante el cambio en el volumen de la resistividad eléctrica, además se unen fácilmente al concreto y solo se deben usar en este tipo de materiales (Bacuilima & Barbecho, 2022).

Los sensores de deformación inalámbrico son equipos electrónicos que miden la deformación unitaria mediante la identificación de la frecuencia de radio de estudio, este es el proceso que automatiza el monitoreo pero se necesita una fuente de energía con el uso de baterías de litio (Bacuilima & Barbecho, 2022).

Uno de los más conocidos sensores de precisión son los **Electrical resistance strain gauges**. Estos son más precisos que los de fibra de carbono, ya que detectan grietas diminutas caracterizando el material, además los sensores son más flexibles y trabajables (Ahlborn et al., 2010).

Tabla 22. Características generales de los sensores Strain Gauges

CARACTERISTICA	DETALLE
Fenómeno a medir:	Esfuerzos
Tipo de monitoreo:	Global / Local
Instalación:	Simple
Precisión:	$\pm 1.2 (\mu\epsilon)$
Alimentación:	AC/DC
Rango de mediciones:	$\pm 1.2 (\mu\epsilon)$
Limitaciones:	Sensible a cambios de temperatura ambiental
Requisitos técnicos:	Sin requisitos

Nota. Extraído y adaptado (Seguel, 2019)

(viii) Sensores de desplazamiento

Existen inclinómetros, estos dispositivos constan de dos cupulas herméticas cerradas, en la parte superior tiene 4 placas capacitivas y en la inferior capa de aluminio separadas por un espacio de 1/8”(Seguel, 2019).

Tabla 23. Características generales de los inclinómetros.

CARACTERISTICA	DETALLE
Fenómeno a medir:	Inclinaciones
Tipo de monitoreo:	Globales y locales
Instalación:	Simple
Precisión:	0.005°

Alimentación:	AC/DC
Rango de mediciones:	$\pm 3^\circ$
Limitaciones:	
Requisitos técnicos:	Sin requisitos

Nota. Extraído y adaptado (Seguel, 2019)

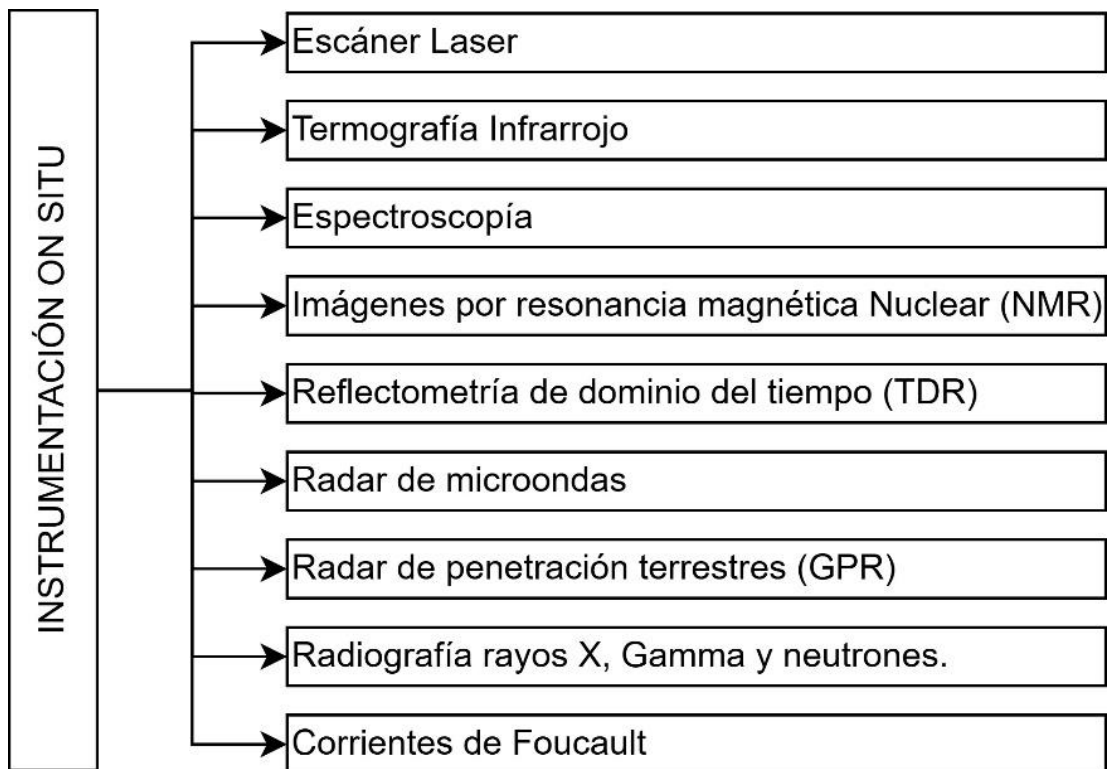
(ix) Sensores de peso

Los dispositivos de pesaje en movimiento (WIM) sirven para la obtención de datos del vehículo en movimientos detallando las características dinámicas de la interacción entre el móvil y el puente (Enckell, 2011).

4.4.2. Instrumentación on site

Son los dispositivos de monitoreo que se colocarán solo por el periodo muy corto de tiempo, generalmente dura el tiempo de uso. Mientras que los instrumentos in situ se puede dejar un periodo más largo de tiempo. Los instrumentos on site se pueden realizar con monitoreos periódicos, el trabajo de la obtención de datos se realizará colocando los instrumentos para captar la data y al terminar el levantamiento de datos se recogerá todo instrumento. Las instrumentaciones planeadas para el uso por lo general pueden durar entre horas y días mas no temporadas estacionarias. Una de las técnicas más usadas es el Escáner Laser el cual depende de parámetros ambientales para la toma de datos. En la **Figura 48** presenta los dispositivos de monitoreo con las características antes mencionadas.

Figura 48. Instrumentación On Site



Nota. Adaptado de (Ahlborn et al., 2010; Deng et al., 2023; FHWA, 2022; Khedmatgozar Dolati et al., 2021; Seguel, 2019)

Se mencionan algunas tecnologías usadas en investigaciones:

(i) Termografía Infrarrojo (IRT)

Este sistema utiliza la energía térmica de radiación para obtener datos de la condición del área a monitorear mediante radiación electromagnética superficial en la región infrarroja obteniendo diferencias de temperatura en la superficie (Omar & Nehdi, 2018). Este sistema de monitoreo también puede ser considerado dentro del monitoreo remoto ya que se pueden usar dispositivos como drones y otros para la aplicación en el sitio (Enckell, 2011). Este estudio obtiene resultados de delaminación, desintegración, grietas, huecos, detección de capas y despegue de capas (Omar & Nehdi, 2018)

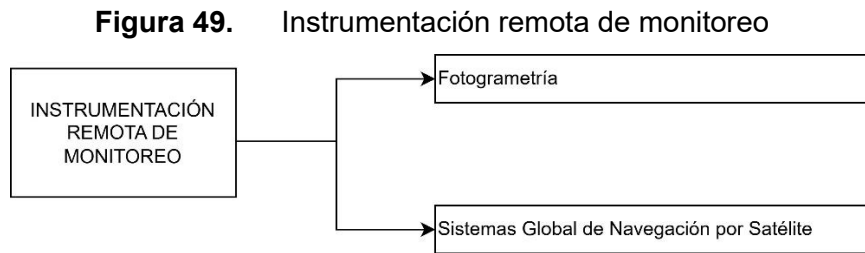
(ii) Tecnología de Radar.

Detección y alcance de radio o RAdio Detection And Ranging (RADAR) se utiliza para ver la condición en propiedades eléctricas y geológicas que se encuentran en la parte interna de una superficie (Enckell, 2011).

- **Radar de penetración terrestres (GPR):** Se mide por la propagación de ondas electromagnéticas captados a través de una antena transmisora con resultados dependientes a la frecuencia, si esta es mayor la resolución es mejor (Omar & Nehdi, 2018). Se puede analizar y estudiar la socavación mediante la interfase agua-sedimento (Prendergast et al., 2018) Pero, va a depender del material a monitorear porque dependen de las propiedades eléctricas (conductividad eléctrica y permitividad dieléctrica relativa) (Omar & Nehdi, 2018). El GPR al utilizar ondas electromagnéticas genera un levantamiento de puntos con la presencia de objetos en el rango al cual esté expuesto, produciendo puntos de datos 3D. Además, este instrumento permite la evaluación del espesor de la cubierta de concreto, descripción del concreto en ambiente corrosivo y localización de armaduras de acero (Omar & Nehdi, 2018).
- **Radar Interferómetro:** Este dispositivo recibe y capta señales electromagnéticas de la cual se obtienen mediciones de movimientos y deformaciones, las cuales pueden ser estáticas y dinámicas del puente (Enckell, 2011). Reduce tiempos de operatividad y no interrumpe el tráfico del puente evitando perder tiempo y dinero, además al ser un dispositivo que percibe señales se puede obtener propiedades de tirantes y cables de puentes (Enckell, 2011).

4.4.3. Instrumentación remota de monitoreo

Este tipo de instrumentaciones se pueden realizar a una distancia considerable del puente, aunque no existe precisión en lo que quiere predecir, puede combinarse con otros métodos de monitoreo para mejorar predecir daño haciéndola confiable y de rápida intervención en el monitoreo.



Nota. Adaptado de (Ahlborn et al., 2010; Deng et al., 2023; FHWA, 2022; Zhao et al., 2022)

(i) **Sistemas Global de Navegación por Satélite (GNSS)**

La tecnología GNSS es un sistema de posicionamiento global que utiliza satélites las cuales puede estudiar los desplazamientos verticales, horizontales y deformaciones mediante el seccionamiento de áreas. Reconoce las deficiencias de desplazamiento de baja frecuencia del puente, aunque tiene deficiencias por la cantidad de ruido severo, genera menos exactitud en el procesamiento de datos para deformaciones (R. Zhang et al., 2020). El GNSS engloba al GPS ya que se ha necesitado de diferentes softwares comerciales para el procesamiento de la data (Seguel, 2019). Para estudiar las características de vibración del puente se necesita parametrizar el GNSS como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 24. Características de GNSS

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Baja frecuencia	Depende del desplazamiento de baja frecuencia del puente y el efecto de trayectoria múltiple del GNSS.
Señal de vibración	Este componente refleja la vibración de la estructura del puente. Se considera el análisis de la frecuencia y amplitud para verificar la condición del puente

Ruido de alta frecuencia	Mayor presencia de este componente causado por el receptor y la tecnología GNSS Se eliminará con la aplicación de algoritmos inteligentes.
--------------------------	---

Nota. Extraído y adaptado (R. Zhang et al., 2020)

Recomendaciones:

- Es bueno complementar el GNSS con velocímetros y acelerómetros para mejorar la precisión y eliminar el ruido generado para la deformación.

(ii) Fotogrametría

Técnica de monitoreo que permite determinar las propiedades geométricas a partir de imágenes fotográficas (Enckell, 2011). Detectan patrones de grietas y su evolución superponiendo imágenes de alta resolución por medio de cámaras digitales (Bacuilima & Barbecho, 2022). Crea una nube de puntos con datos tridimensional en el cual se aprecian las fisuras, grietas y corrosión, generando el avance prolongado de daño de manera visual. No requiere información del comportamiento estructural mediante sensores como los acelerómetros, ya que solo depende necesariamente de la luz natural para la toma de datos y teniendo limitaciones debido al ángulo de la visión de la cámara de lugares inaccesibles (Bacuilima & Barbecho, 2022). Este tipo de monitoreo es muy bueno en el ámbito visual y puede trabajarse para verificar la aparición de grietas y fisuras en modelos números y así poder predecir daño mediante constantes calibraciones con las imágenes. Además, dentro de la fotogrametría podemos realizar la toma con cámaras fotográficas de puntos en la superficie como también el uso de drones para la obtención de imágenes de la parte superior e inferior de torres, cables, secciones del puente.

4.5. POSICIONAMIENTO DE SENSORES

El posicionamiento óptimo de sensores (OSP) tiene como finalidad la obtención de data de manera eficiente sin tener carencia al momento de procesar mediante algoritmos IA (Seguel, 2019). Se debe detallar el plan de posicionamiento de sensores y como se realizará todo el sistema además de verificar su funcionamiento mediante pruebas de procesamiento de data cruda para calibrar los sensores (Dong et al., 2010). Para los métodos de identificación de daños locales como el método del campo magnético, pulso ultrasónico, las corrientes de Foucault y sensores de temperatura, se necesitan conocer con anterioridad la ubicación aproximada del daño y son utilizados para daños locales y en puentes con menor longitud (Han et al., 2021). Un sensor está funcionando normalmente si este tiene buena correlación, este factor es la relación lineal entre dos variables (Salcedo, 2021). Por ejemplo, entre la señal del sensor y la acción a medir como la carga aplicada. Otro factor a estudiar es la probabilidad de desviación estándar que debe ser el menor posible para que no exista variabilidad en la dispersión de datos (Salcedo, 2021). Si la correlación es el menor posible indica los sensores tienen buena correlación, lo que demuestra que el sensor está funcionando a la acción que este en estudio. De lo contrario, significa que la correlación de datos no está bien y cierto sensor funciona de manera anormal. Para implementar un sistema de sensores posicionados se requiere saber la complejidad de aplicación de cada sensor, por ello la siguiente tabla muestra el tipo de dificultad que requiere para aplicar una red de monitoreo, por ejemplo, los instrumentos de mínima maniobra son los primero en implementarse, mientras que los de posicionamiento más complejo necesitan mayor cuidado y nivel de conocimiento para maniobrar los dispositivos correctamente.

Tabla 25. Implementación de red de sensores para un BHM desde el mínimo, general y compleja aplicación

Mínimo	General	Complejo
Estación Meteorológica	Sensor de desplazamiento láser	Sensores de desgaste de la carretera
Sensor de temperatura	Sistema de posicionamiento global (GPS)	Radar interferómetro de microondas
Sensor de fibra óptica	Estación de pesaje en movimiento (WIM)	Sensor de emisión acústica
Inclinómetro	Acelerómetro triaxial	Piranómetro
Celda de corrosión	Anemómetro	Fotogrametría
Acelerómetro biaxial	Sensor de humedad	Sensor de presión hidráulica
	Presión de agua subterránea	Geo radar
	Acelerómetro sísmico	Puente de estación WIM
		Termografía

Nota. Extraído (Enckell, 2011)

Se identificarán las condiciones en las cuales pueden verse afectados los sensores y otros dispositivos en la región de ubicación (Seguel, 2019). Existen varias técnicas que captan los fenómenos físicos como los acústicos, sísmico, eléctricos, electromagnéticos, térmicos, etc. para detectar el daño en las estructuras agilizando y haciendo fiable el monitoreo (Omar & Nehdi, 2018). Para verificar si los sensores están obteniendo buena data, se presenta recomendaciones de investigaciones:

- (i) **El método de análisis de correlación se utiliza para verificar si los sensores obtienen buena data**, es decir si los datos obtenidos por diferentes sensores están dentro de los límites de la desviación estándar y tienen una buena correlación entre el sensor y la acción medible (Han et al., 2021).
- (ii) Verificar la amplitud del sensor y el preprocesamiento de datos ya que la baja coherencia puede deberse a punto de baja amplitud en las formas modales (Viviescas et al., 2018)

- (iii) **Verificar el grado de redundancia de los dispositivos**, es decir que, si un punto de recolección de la data falla, este debe ser cubierto por otros dos o tres puntos de recolección.

Existen técnicas para el posicionamiento de sensores, la **Tabla 26** propone métodos para colocar sensores y otras instrumentaciones considerando el grado de redundancia, correlación y amplitud de dispositivos mediante el uso de la IA.

Tabla 26. Investigaciones de técnicas para OPS.

TECNICA OPS	DESCRIPCIÓN
Método Influencia efectiva (EI)	Trata de determinar el índice de influencia de cada sensor para que este sea justo y no caiga en la excesiva redundancia
Método EI – DPR (Driving Point Residue)	Es una variación adicionada al método EI que es para sensores que captan menos energía.
Método KE (Kinetic Energy)	Es similar al método EI pero se estudia la red general como un todo.

Nota. Elaborado a partir de resultado de investigaciones (Seguel, 2019)

Al crear un sistema de monitoreo mediante las técnicas propuestas, se toma en cuenta la experiencia de aplicación de monitoreos a nivel mundial. En la Tabla 27 muestra algunos sistemas de monitoreo propuestos en puentes reales con dispositivos que puedan manejarse de manera óptima. Un claro ejemplo es que en estos casos siempre se consideran sensores para los parámetros de entorno y son mencionados como sensores de monitoreo ambiental.

Tabla 27. Investigaciones de uso de sensores

TIPO DE PUENTE	DISPOSITIVOS DE MONITOREO
Puente tipo viga Gómez Ortiz L=510 m	3 sensores triaxiales de aceleración sísmica en las tres direcciones,
Puente Arco armadura Hell Bridge Test Arena L=35 m	40 acelerómetros de un solo eje y 18 acelerómetros triaxiales
Puente tipo viga cajón Z-24, Suiza L=65 m (Puente con mas de 100 años de antigüedad)	16 acelerómetros, 5 sensores de monitoreo de condiciones ambientales (temperatura/humedad del aire, gotas de lluvias y velocidad y dirección del viento)

Puente tipo viga de L=30.82 m	12 sensores de aceleración en la loza del puente sincronizados con GPS en el vehículo y un GNSS, logrando una conexión temporal estable y de alta precisión.
Puente de armadura del Puerto L=460.80 m Eslovaquia	28 acelerómetros (17 aceleraciones verticales en la estructura principal del puente, 8 aceleraciones horizontales en la estructura principal del puente y 3 aceleraciones horizontales en la plataforma de acero)
Puente atirantado Levantamiento Nacional Eslovaco L=431.80m Eslovaquia	11 acelerómetros (6 aceleraciones verticales en la viga del puente, 3 aceleraciones horizontales en la viga del puente y 2 aceleraciones en las bases de pilares)
Puente tipo viga ferroviario Arsta L=833.00 m Estocolmo	FOS, termopares, transductores.
Puente tipo viga Götaälvbron L= 950.00 m Suecia	FOS, SmarTape, sensor de temperatura, tres interrogatorios y conexión de banda ancha.
Puente en suspensión del río Yangtsé del sur de Runyang L= 1490 m China	Anemómetros, sensores de temperatura, sensores de deformación; acelerómetros, sistemas de posicionamiento global.
Puente en suspensión Jiangyin L=1385 m China	Anemómetros, sensores de temperatura, galgas extensométricas, acelerómetros, transductores de desplazamiento, sistemas de posicionamiento global, sensores elastomagnéticos, sensores de fibra óptica, estaciones totales.
Puente en suspensión Tsing Ma L= 1377 m China	Anemómetros, sensores de temperatura, sensores de deformación, acelerómetros, transductores de desplazamiento, sistemas de posicionamiento global, sistemas de pesaje en movimiento, sensores de nivel, cámaras de vídeo.
Puente en suspensión sobre el río Yangtsé de Ma'anshan L=1080 m China	Anemómetros, sensores de temperatura, higrómetros, sistemas de posicionamiento global, inclinómetros, sensores de deformación, acelerómetros, transductores de desplazamiento.
Puente atirantado sobre el río Sutong Yangtze L=1088 m China	Anemómetros, sensores de temperatura, sensores de deformación, acelerómetros, transductores de desplazamiento, sistemas de posicionamiento global, sistemas de pesaje en movimiento, sensores de corrosión, sensores elastomagnéticos, sensores de fibra óptica, inclinómetros, higrómetros, cámaras de vídeo.
Puente atirantado de los	Anemómetros, sensores de temperatura, sensores de

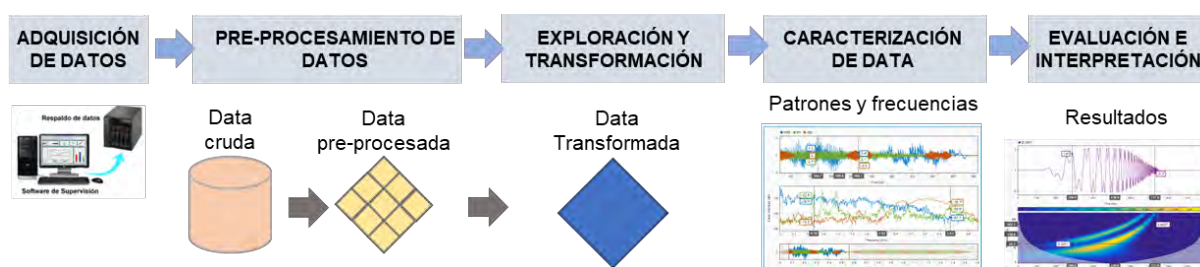
Picapedreros L=1018 m China	deformación, acelerómetros, transductores de desplazamiento, sistemas de posicionamiento global, sistemas de pesaje en movimiento, sensores de corrosión, sensores elastomagnéticos, inclinómetros, barómetros, higrómetros, pluviómetros, cámaras de vídeo.
Puente atirantado sobre el río Changjiang de Tongling Rail-cum-Road L=630 m China	Anemómetros, sensores de temperatura, higrómetros, velocímetros de radar, sismómetros, sistemas de posicionamiento global, inclinómetros, transductores de desplazamiento, flexómetros, sensores elastomagnéticos, acelerómetros, sensores de deformación, cámaras de vídeo.
2º Puente atirantado sobre el río Yangtsé de Nanjing L=628 m China	Anemómetros, sensores de temperatura, sensores de deformación, acelerómetros, sistemas de pesaje en movimiento, sensores elastomagnéticos, estaciones totales, higrómetros.
Puente Arco sobre el río Yangtsé de Chaotianmen L=552 m China	Anemómetros, sensores de deformación, estaciones totales, sensores elastomagnéticos, acelerómetros.
Puente Arco Dashengguan Yangtze L=336 m China	Sensores de temperatura, higrómetros, sensores de deformación, anemómetros, acelerómetros, transductores de desplazamiento, cámaras de vídeo, flexómetros, velocímetros de radar.

Nota. Elaborado a partir de resultado de investigaciones (An et al., 2019; Ároch et al., 2016; Bacuilima & Barbecho, 2022; Enckell, 2011; Han et al., 2021; Mudahemuka et al., 2024; Viviescas et al., 2018; Zhou et al., 2020)

4.6. ADQUISICIÓN, MANEJO Y PROCESAMIENTO DE DATOS

En esta sección se gestiona todo el proceso de la minería de datos desde la adquisición hasta la evaluación final. En la **Figura 50** se muestra el esquema general de 5 fases de un proceso de manejo de la data. Adicionalmente, se propone el uso de algoritmos de IA desde este ítem para cada fase o como toda una red neuronal que entrene todo el proceso.

Figura 50. Proceso de la minería de datos



Nota: Elaboración propia.

4.6.1. Adquisición de datos (DAQ)

En algunas investigaciones también será conocido por Sistema de Adquisición de Datos (DAS), mientras que otras son conocidas como llamado registrador de datos (DAQ) en el cual se recopila, demodula la señal, acondiciona y almacena físicamente los datos obtenidos de los sensores antes de ser transferidos a una ubicación externa para su análisis (Dong et al., 2010). El DAQ consta de la red de sensores, Unidad de Adquisición de datos (DAU) y computadora de obtención de datos (Enckell, 2011). A continuación, se presenta una serie de recomendaciones a tomar en cuenta:

- Se puede adicionar un “DAS interrogatorio”, un dispositivo electrónico que sirve para la obtención y transformación de datos (Enckell, 2011). En caso el sistema sea grande se propone conmutar y adaptar con varios canales de obtención
- Tener en cuenta que una red de sensores puede ser alámbrica o inalámbrica como alimentador al DAQ. Si la comunicación al DAQ es por cable se debe estudiar las técnicas de señalización diferencial y protección de cables para evitar efectos EMI; en caso este sea de conexión inalámbrica se debe aplicar en estructuras grandes en donde sea difícil tener un sistema de cableado aunque el tiempo del DAQ es más lento (Dong et al., 2010).

- Verificar si la salida del sensor es analógico o digital. Enckell (2011) propone para la mayoría de sensores la conversión de la señal analógica a digital mediante el convertidor (ADC), pero en caso se use sensores eléctricos implementar un filtro de señales adicionales al ADC.

En la **Figura 51** se observa tres flujos para la obtención de la data. El flujo tradicional se propone en color verde, pero este puede modificarse de acuerdo al sistema implementado. El flujo de proceso en amarillo abarca del sensor al “DAS interrogatorio” a la computadora debido a que el dispositivo del interrogatorio ya debe tener un ADC. En caso no lo tenga, adicionar un dispositivo que cumpla dicha función. Mientras que en el proceso celeste se proponer el flujo sin el “DAS interrogatorio”, pero la función de esta debe haber sido adaptada en la computadora principal. Cabe resaltar que aún puede ser modificable cualquiera de los sistemas que se proponen en la **Figura 51**, la finalidad es adquirir la data de manera segura e implementar de acuerdo a la necesidad del tipo de monitoreo y dispositivos de obtención de data usados.

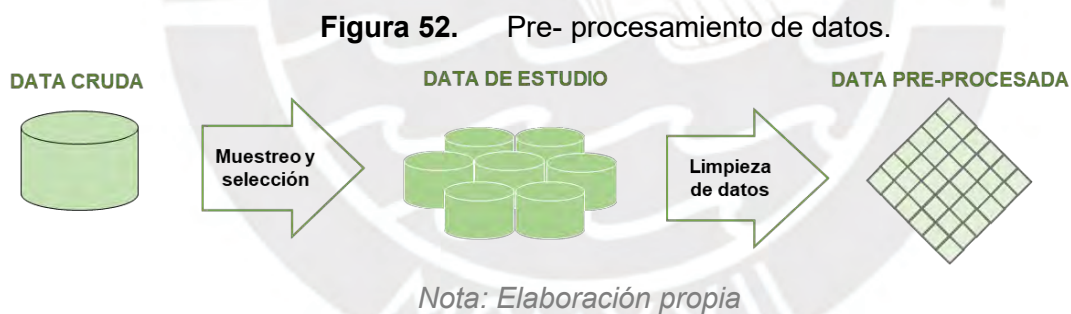


Se transfieren los DAQ a un lugar donde se observa, procesan y analizan (Dong et al., 2010). A esto hace referencia el SHM al proponer el procesamiento de datos remotamente sin necesidad de ir al mismo lugar del monitoreo. Como se mostró en el sistema dicho monitoreo debe tener una base de datos general y la

comunicación debe ser **“transparente”**, es decir, sin modificar la toma de datos para futuras investigaciones generando una copia nube de respaldo mientras que otra se utilizará para el procesamiento de datos.

4.6.2. Preprocesamiento de datos

Se procesan los datos para conocer la condición del puente mediante rango de daño, por ello este proceso es de los más delicados e importantes. Para procesar datos se debe implementar un control de calidad en múltiples niveles de la señal para seleccionar la data de efectos de ruido o información extraña que afecten a los resultados a obtener (Dong et al., 2010). Es importante verificar la data cruda antes de procesarlo, debido a la gran cantidad de datos mal tomados o inexistencia de data por tiempos, por ello en la siguiente figura se presenta el flujo del preprocesamiento de datos con el fin de generar un orden antes de tener la data de análisis.

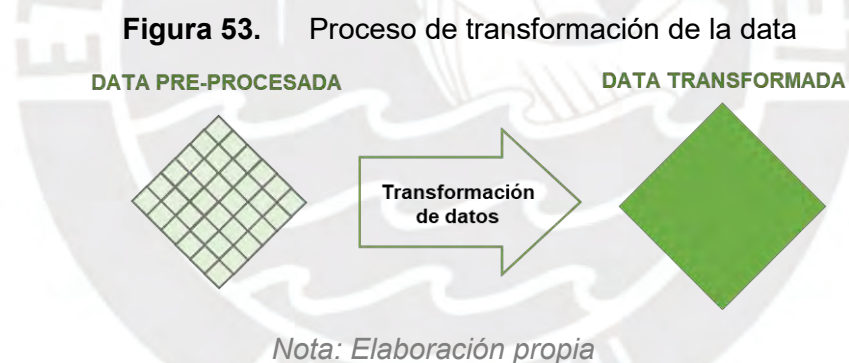


La data cruda obtenida del DAQ contiene data inconclusa, buena para procesar, ruidos, interferencias, vacíos, etc. Por ello se muestrea y selecciona con el objetivo de eliminar datos que solo generen espacio en almacenamiento mas no sirvan para el procesamiento y caracterización de data (Dong et al., 2010). Este proceso es como una previa caracterización para saber que datos se deben eliminar y cuales se deben filtrar.

Al tener la data de estudio caracterizada con datos que no existen, datos no clasificados, ruidos y datos extremos. Se realiza la limpieza de datos mediante la eliminación de ruidos, se generan los puntos mínimos y máximos si se trata de frecuencias para generar un intervalo de filtro de datos. En cuanto al tratamiento de datos atípicos, se realiza un análisis de datos mediante algoritmos de limpieza de data innecesaria sin sacrificar la integridad del sistema global (Dong et al., 2010).

4.6.3. Exploración y transformación

Al tener la data filtrada se necesita compactar toda la información en uno solo para caracterizarla por ello debe mantener una correlación de inicio a fin. Para lograr este fin, en la transformación de datos se debe reducir las dimensiones de estudio, crear características, normalizar datos, crear variables de correlación y discretizarlo. La data transformada quedará lista para su procesamiento y obtención de datos

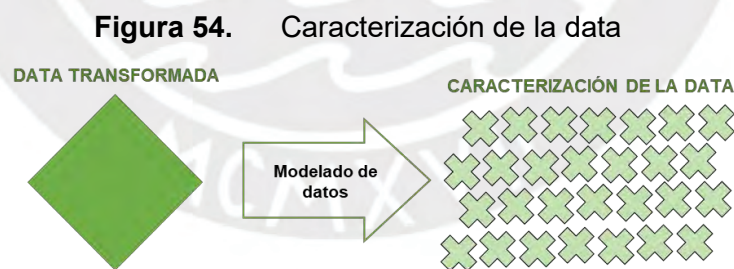


Aunque la obtención de datos generales procesados pueda crear una mayor cantidad de información y sea una data limpia, puede afectar al entendimiento de posteriores investigaciones para el desarrollo de nuevas hipótesis, tecnologías y método (Dong et al., 2010). Por ello, se recomienda guardar una base de datos de medición y registro de eventos (data cruda) desarrollando una buena tecnología de la información (IT). Como también tener en cuenta el tipo de prueba al que se somete, por ejemplo, con una prueba estática la data es mucho menor que con una

prueba de campo dinámica además de que algunos guarden solo la información de diagnóstico para esta última debido al gran volumen de datos generados.

4.6.4. Características de la data

Al transformar la data consolidada en una sola ya tiene características de picos generales por ello en esta fase se puede caracterizar los ruidos blancos. Existen investigaciones que utilizan el Peak Picking (PP) para seleccionar los picos conocidos, comúnmente se usa algún lenguaje de programación para ver dichas características de la data, además se considera a las vibraciones ambientales como un ruido blanco (Viviescas et al., 2018). Mientras que existen otros métodos para caracterizar la data, por ejemplo: el modelado predictivo se considera a la clasificación y las regresiones de la data, mientras que el modelado descriptivo se considera a la agrupación, asociación y secuenciación de la data. En la siguiente figura se muestra como la data transformada se descompone en modelos de datos, en los cuales se pueden caracterizar los ruidos ambientales o de entorno, data buena para la caracterización del material, dimensiones de estudio, etc.



Nota: Elaboración propia

Dentro de la caracterización se propone el uso de la IA mediante sus herramientas como el aprendizaje no supervisado. En Han et al., (2021), el uso del PCA (Principal Component Analysis) identifica daños mediante parámetros de características estáticas o dinámicas de la estructura filtrando el ruido (comprime e interpreta datos), muestra posibles componentes principales verificando si estas se

encuentran en el rango, reconoce el deterioro y tiene una alta sensibilidad para daños locales y globales. Esto es gracias a la caracterización de las señales dentro de la BD. Otra herramienta IA es el uso de Redes neuronales, por ejemplo, una de las técnicas estadísticas de procesamiento de señales es las redes neuronales artificiales (ANN) y están basadas en las características de aprendizaje de los sistemas biológicos es decir puede determinar el cambio de patrones de señales, determinar el cambio la lectura y comparar estadísticamente la respuesta de un posible daño generado (Dong et al., 2010). Las redes neuronales aprenden a través de la experiencia por eso es recomendable usar mayor data obtenida entrenando a la red para generar una mayor exactitud y precisión en los resultados.

4.6.5. Evolución e interpretación de datos

Para el BHM se toma en cuenta que la data obtenida mayormente está basada en ondas con picos altos y bajos que deben verificarse con el entendimiento simple y complejo, Dentro de este proceso se extrae y analiza cada característica de datos mediante algoritmos de IA con técnicas de análisis de señales, estos pueden estar por ejemplo en el dominio de la frecuencia. En la siguiente tabla se muestran técnicas de procesamiento de señales más aplicados en el BHM.

Tabla 28. Técnicas de procesamiento de señales

TECNICA	DESCRIPCIÓN
Descomposición En El Dominio De Frecuencia (FDD)	Técnica de análisis de señales que se utiliza para identificar y analizar las diferentes componentes de frecuencia presentes en una señal. Se usa para analizar vibraciones, análisis de audio, procesamiento de imágenes y comunicaciones inalámbricas.
Identificación Estocástica Del Subespacio (SSI)	Es una técnica de análisis de sistemas que utiliza datos de entrada - salida para identificar modelos matemáticos de sistemas dinámicos.
Funciones De Respuesta De Frecuencia (FRFs)	Este método aprovecha la posibilidad de medir simultáneamente los datos de vibración del vehículo y del puente para aumentar la precisión de la estimación de los modos más altos de vibración del puente. Estimar con precisión la frecuencia natural del puente en función de las funciones de

	respuesta de frecuencia del puente.
Transformada Rápida de Fourier (FFT)	Es una herramienta que permite descomponer una señal compleja en sus componentes de frecuencia facilitando la detección de daños, el pronóstico de problemas y la predicción de fallas en la estructura del puente.
Transformada Wavelet Continua (CWT)	Se analizan más a fondo en el dominio tiempo-frecuencia.
Littlewood-Paley modificada (MLP),	Esta base de ondículas ortogonales se desarrolló para optimizar simultáneamente las propiedades de localización de tiempo y frecuencia.
Dominio del tiempo - frecuencia	Analiza el comportamiento ante diferentes tipos de cargas y garantizar su seguridad y durabilidad. Este análisis permite identificar las frecuencias naturales del puente, evaluar su capacidad para resistir vibraciones y analizar el impacto de eventos como terremotos o fuertes vientos.
Método de curvatura modal (MCM)	Se usa este método para analizar las variaciones de rigidez y detectar daños, ya que las grietas reducirán la rigidez de la sección transversal, lo que resultará en un mayor valor de curvatura.
Algoritmo de aprendizaje automático supervisado: Máquina de Vectores de Soporte (SVM)	Es un algoritmo de aprendizaje automático supervisado para tareas de clasificación como de regresión. SVM es especialmente eficaz en espacios de alta dimensión.
Algoritmo de aprendizaje automático supervisado: k-nearest neighbours (kNN)	Es un algoritmo de aprendizaje automático supervisado utilizado para problemas de clasificación y regresión. Para la clasificación: El kNN clasifica un nuevo punto de datos basándose en la mayoría de los k puntos de datos más cercanos en el espacio de características. Para la regresión: El kNN predice el valor de un nuevo punto de datos basándose en los valores promedio de los k puntos más cercanos.
Algoritmo de aprendizaje automático supervisado: The random forests (RF)	Es una técnica de aprendizaje automático supervisado que se utiliza tanto para problemas de clasificación como de regresión. RF se basa en la construcción de múltiples árboles de decisión durante el proceso de entrenamiento y combina las predicciones de estos árboles para obtener una predicción final. Es mayormente usado en la toma de decisiones del mantenimiento.
Algoritmo de aprendizaje automático supervisado: the Gaussian naïve Bayes (NB)	Es un método de aprendizaje automático supervisado utilizado para la clasificación. Se basa en el teorema de Bayes y asume que las características de los datos son independientes entre sí dentro de cada clase.
Algoritmo de aprendizaje automático no supervisado: Mahalanobis squared	Es usado por su gran capacidad de procesamiento y clasificación de datos y bajo esfuerzo computacional.

distance (MSD)

Nota. Elaborado a partir de resultado de investigaciones (Cantero et al., 2019; Casas & Moughty, 2017; Mudahemuka et al., 2024; Svendsen et al., 2022)

4.7. SELECCIÓN DE MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE DAÑOS (MID)

En esta sección se mencionan los MID de acuerdo al objetivo de estudio. Para An et al. (2019), los MID se deben escoger de acuerdo al tipo de estructura, tipo de daño, presupuesto y accesibilidad. Dentro del tipo de estructura se estudia las condiciones estáticas mediante el análisis de la deformación unitaria conjuntamente a la variación de carga y la temperatura (Gómez et al., 2021). En un estudio se analiza la carga – daño – geometría como bases de la incertidumbre para seleccionar el método (Han et al., 2021). Por ello se presenta la tabla de definiciones de algunos métodos de identificación de daños para aplicar su uso en el BHM.

Tabla 29. Métodos de Identificación de daños

MID	SUB MID	DESCRIPCIÓN
Método de Identificación de daños basado en modales	El método modal se utiliza para describir las propiedades dinámicas de una estructura en términos de parámetros modales como la frecuencia natural, factor de amortiguamiento, masa modal y forma modal	
	Método basado en frecuencias naturales	Este método sirve para estimar con precisión las frecuencias naturales de los puentes. Esto se logra mediante la medición simultánea de datos de vibración por la aceleración de vehículos, el comportamiento ante este tipo de carga y la aplicación de la teoría de análisis modal.
	Método basado en la forma modal	Las formas de modo son particularmente ventajosas, ya que están menos influenciadas por los efectos ambientales contienen información local y global, lo que puede ayudar a la localización de daños.
Método de detección de daños por interpolación (IDDM)	Técnica que utiliza la interpolación para identificar y localizar daños en puentes. Se interpola para estimar el valor de una variable en un punto desconocido basándose en valores conocidos de puntos cercanos.	
	Se usan sensores para medir la deformación en la superficie del puente y luego se utiliza el IDDM para mapear la variación de deformaciones generando una versión de mapa de calor, pero con deformaciones en donde se indican zonas de vulnerabilidad.	
Método de identificación de daños basado en el dominio del	Es un método que combina el análisis de la respuesta de la estructura en el dominio del tiempo con el análisis de la frecuencia. Al aplicar ambas se vuelve más precisa y detecta con más exactitud daños.	
	De mayor robustez.	

Tiempo - Frecuencia	Se usan acelerómetros para medir las vibraciones del puente y luego analizar las variaciones en la frecuencia natural y la amortiguación en el dominio del tiempo-frecuencia mediante la Transformada de Fourier.
Método Basado En La Forma De La Onda De Índice De Daño En El Dominio Del Tiempo	Esta técnica analiza las características de la señal en el dominio del tiempo para detectar y localizar daños en los puentes. En general, de acuerdo a este método los daños como grietas y fisuras afectan la forma de onda de las señales vibratorias captadas por los sensores estas se considerarán como señales de respuesta general en el puente, por ello se recomienda instrumentaciones con mayor sensibilidad. En el BHM se propone el uso de sensores para medir la respuesta vibratoria del puente con interacción del paso de vehículos esto se le puede adicionar el estudio de sensores en el vehículo para verificar la forma de rebote.

Nota. Elaborado a partir de resultado de investigaciones (An et al., 2019; Casas & Moughty, 2017; Mudahemuka et al., 2024)

Una vez definidos los MID se toma en cuenta cual puede ser necesario de acuerdo al objetivo de estudio. Para poder usar y adaptar los MID al campo del monitoreo de puentes es necesario conocer las ventajas y desventajas, en la siguiente tabla se presenta las características de algunos MID.

Tabla 30. Ventajas y desventajas de MID

MID	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Método Modal Basado en frecuencias naturales	Identifica con precisión las frecuencias naturales en puentes. Utiliza instrumentos de monitoreo mediante vibraciones por lo cual no es invasivo a la estructura. Esta técnica puede resultar más económica que otras. Es versátil ya que se puede aplicar a diferentes tipos de puentes.	Las mediciones y resultados tienen variabilidad por los parámetros medioambientales como temperatura, viento, humedad, etc. Equipos específicos para la obtención de vibraciones. Requiere experiencia en la interpretación de datos y en el análisis modal.
Basado En Algoritmos Inteligentes	Mayor precisión ya que pueden aprender patrones complejos en los datos y realizar predicciones más exactas. Los algoritmos inteligentes pueden detectar daños en etapas tempranas. Mayor adaptabilidad a diferentes tipos de estructuras y daños. Automatiza el proceso de detección de daños mejorando la eficiencia.	Implementación compleja y requiere experiencia en el campo del ML e IA. Requieren grandes conjuntos de datos de entrenamiento para funcionar correctamente. Mayor incertidumbre en cajas negras dentro del algoritmo. Predicciones inexactas para los primeros datos. Puede ser costoso, especialmente para proyectos de investigación y desarrollo.
Método De Identificación De Daños Basado En El	Precisión al identificar cambios sutiles en la señal detectando tempranamente daños.	Se requiere conocimiento experimentado para implementar e interpretar resultados en el análisis Wavelet.

Análisis Wavelet	<p>Analiza la distribución de la energía de la señal en diferentes escalas de tiempo y frecuencia ubicando fácilmente los daños.</p> <p>Relativamente robusto al ruido en los datos perfecto para el ruido ocasionado por los parámetros de entorno.</p>	<p>Exigencia computacional para el procesamiento de señales y la gran cantidad de data a procesar.</p>
Método Basado En La Forma De La Onda De Índice De Daño En El Dominio Del Tiempo.	<p>Relativamente sencillo de implementar no requiere alguna técnica de transformación matemática.</p> <p>Sensible a cambios pequeños en la forma de onda de la señal.</p> <p>No requiere equipos o software especializado haciéndola de bajo costo.</p> <p>Relativamente fáciles de interpretar.</p>	<p>Las señales dependen del tipo de excitación esto las hace dependiente del agente externo con el cual baja la precisión.</p> <p>El ruido es uno de los problemas que afecta a la precisión en este método.</p> <p>No puede ubicar precisamente el daño.</p> <p>Solo agentes que afectan la onda son captados pero otros agentes pueden no ser captados perdiendo eficiencia en el estudio global.</p>
Método Basado En Desplazamiento – Deformación	<p>Es sensible a cambios pequeños en la rigidez de la estructura detectando el daño</p> <p>Estudia y detecta daños de grietas, fisura, corrosión y pérdidas de sección.</p> <p>De implementación fácil con un sistema simplificados de sensores de deformaciones y desplazamiento.</p>	<p>Depende de la carga externa a la que se someta, si esta es pequeña los resultados no serán precisos ni confiables.</p> <p>Pierde eficiencia por la presencia de factores ambientales.</p> <p>Sin precisión en la ubicación de daños.</p> <p>El ruido de los parámetros de entorno afecta al método perdiendo eficacia en los resultados.</p>
Método Basado En La Teoría Bayesiana	<p>Maneja la incertidumbre como un punto de inicio, parte y fin del método.</p> <p>Considera la incorporación de información previa sobre la estructura, el tipo de daño y la probabilidad de ocurrencia de daño.</p> <p>El análisis Bayesiano puede integrar diferentes fuentes de datos, como mediciones de desplazamiento, deformación, frecuencia natural, imágenes, etc., para obtener una evaluación más completa del estado de la estructura.</p> <p>Los resultados se presentan en términos de probabilidades, lo que facilita la interpretación y la toma de decisiones.</p>	<p>La implementación es compleja y experiencia en el conocimiento de la teoría de la probabilidad y de las técnicas de modelado estadístico.</p> <p>Se necesitan datos de entrenamiento para definir las distribuciones de probabilidad de las variables involucradas en el análisis.</p> <p>La recopilación y etiquetado de datos puede ser costoso y laborioso.</p> <p>Si la información de antecedentes no es precisa, los resultados del análisis pueden ser inexactos.</p> <p>Requiere implementación computacional.</p>
Método Basado En La Actualización Del Modelo FE	<p>Preciso en la detección y localización de daños.</p> <p>Los resultados obtenidos son con nivel de detalle alto en ubicación, tamaño y tipo de daño, lo que permite una evaluación más completa de la salud</p>	<p>Requiere alto conocimiento en el comportamiento estructural y la teoría de elementos finitos como también en el software de análisis FE.</p> <p>Mayor costo y uso computacional para la aplicación del modelo FE.</p>

	<p>estructural del puente.</p> <p>Se adapta a diferentes tipos de estructuras y daños.</p> <p>Simula el comportamiento de la estructura con y sin daños, lo que ayuda a comprender mejor el impacto de los daños y a evaluar las opciones de reparación.</p>	<p>Mayor tiempo de intervención en la creación y actualización del modelo FE.</p> <p>Dependencia del modelo FE, si este no está al detalle los resultados pueden ser inexactos.</p>
Método Basado En Inteligencia Artificial.	<p>Los algoritmos de IA pueden aprender patrones complejos en los datos y realizar predicciones más precisas que los métodos tradicionales, lo que lleva a una detección de daños más precisa en ubicación, magnitud de daño y comportamiento de daño.</p> <p>Los algoritmos de IA pueden detectar daños en etapas tempranas, cuando aún son pequeños y no se pueden detectar fácilmente con métodos tradicionales.</p> <p>La IA puede automatizar el proceso de detección de daños, lo que reduce la necesidad de intervención humana y aumenta la eficiencia.</p> <p>La IA puede manejar grandes conjuntos de datos complejos, lo que permite un análisis más completo de la respuesta de la estructura.</p>	<p>El desarrollo e implementación de algoritmos de IA requiere de persona capacitadas con experiencia en ML e IA.</p> <p>Los algoritmos de IA requieren grandes conjuntos de datos de entrenamiento para funcionar correctamente.</p> <p>La recopilación, caracterización y etiquetado de datos puede ser costoso y laborioso.</p> <p>Se debe tener cuidado con las cajas negras existentes dentro de los algoritmos de IA debido a que si estos no tienen una interpretación correcta modificarán el resultado.</p> <p>La interpretación de los resultados de los algoritmos de IA puede ser desafiante, ya que los modelos pueden ser complejos y opacos.</p> <p>Los algoritmos de IA pueden sobre ajustarse a los datos de entrenamiento, por ello se pide un adecuado preprocesamiento de datos y caracterización de la misma. Para evitar predicciones inexactas para nuevos datos.</p> <p>El desarrollo e implementación de algoritmos de IA puede ser costoso por la demanda computacional.</p>
Método Teniendo En Cuenta Las Variaciones De Las Temperaturas	<p>Al considerar las variaciones de temperatura, los métodos de identificación de daños pueden eliminar las señales falsas que se generan por los cambios de temperatura, lo que lleva a una detección más precisa de los daños reales.</p> <p>La capacidad de eliminar las señales falsas permite detectar daños en etapas tempranas, cuando aún son pequeños y no se pueden detectar fácilmente con métodos tradicionales.</p> <p>Interpretación más confiable: La eliminación de la influencia de la temperatura en los datos permite una interpretación más confiable de los resultados, lo que facilita la toma de</p>	<p>La consideración de las variaciones de temperatura puede aumentar la complejidad del método de identificación de daños, lo que puede requerir modelos más complejos y algoritmos más sofisticados.</p> <p>Se necesitan datos adicionales sobre las variaciones de temperatura para compensar su influencia en la respuesta de la estructura.</p> <p>No solo depende de la temperatura, existen otros entornos que van directamente con la temperatura que requiere mayor estudio para evitar el ruido de otro agente ambiental.</p> <p>La recopilación y el análisis de estos datos pueden ser costosos y laboriosos debido a mayor cantidad de instrumentación de</p>

decisiones.

monitoreo.

La interpretación de los resultados puede ser más desafiante, ya que se deben considerar tanto los efectos de los daños como los efectos de la temperatura.

Nota. Extraído y adaptado (An et al., 2019; Darban et al., 2021)

En la siguiente tabla se puede observar que para el puente tipo viga se usa diferentes tipos de MID, eso quiere decir que todos los métodos anteriormente mencionados pueden ser aplicables a los 5 tipos de puentes propuestos. Se debe tener en cuenta el objeto de estudio, tipo de instrumentación a usar, parámetros de entorno y técnicas de procesamiento de datos.

Tabla 31. MID aplicado a puentes casos aplicativos.

TIPO DE PUENTE	MID	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA
Puente tipo viga	EFDD	Puente Gómez Ortiz de tipo viga cajón	(Vargas et al., 2018)
	Método modal basado en frecuencia natural	Puente Z-24	(An et al., 2019)
		Puente tipo viga losa de 30,82 m de longitud.	(Mudahemuka et al., 2024)

Nota. Elaborado a partir de resultado de investigaciones

Se debe tener en cuenta que un MID puede complementar varias técnicas de procesamiento de datos para mejorar su exactitud en el desarrollo de datos. En la siguiente tabla se observa dos métodos más usados en el BHM y como para cada caso se aplica una combinación de técnicas para minimizar el ruido por diferentes agentes de entorno.

Tabla 32. MID con técnicas y herramientas de procesamiento de datos

MID	TECNICA DE PROCESAMIENTO DE DATOS	REFERENCIA
Método modal basado en frecuencia natural	FDD, SSI, FRF, sistema de interacción vehículo- puente (VBI).	(Mudahemuka et al., 2024)
Método basado en la forma modal	criterio de aseguramiento modal (MAC), criterio de aseguramiento modal de coordenadas (COMAC), MCM, el estimador del determinante de covarianza	(Casas & Moughty, 2017)

4.8. MÉTODOS DE SIMULACIÓN Y CALIBRACIONES

Para modelar el deterioro de puentes se pueden realizar usando las técnicas estocásticas o deterministas de acuerdo al objetivo y tipos de eventos que se estudien. El inspector debe tomar en cuenta el método de análisis apropiado con lo considerado en el ítem 6.5 Análisis Estructural de estructuras existentes en el que menciona las condiciones generales de diseño, carga y entorno (llegando al ítem verificar si se necesita explicar) (ACI, 2019b). Estos métodos ayudan a mejorar la calibración de datos y predecir el comportamiento de la estructura. Existen modelos determinísticos que tienen la metodología en la que no existe incertidumbre en el proceso, mientras que el enfoque del modelado estocástico son más adecuados para abordar la incertidumbre inherente al desgaste estructural de los puentes (Calvert et al., 2021). Para la calibración de estos métodos se necesita las mediciones experimentales de puentes, data histórica del mantenimiento y monitoreos previos. La aplicación de daño gradual en componentes de un puente estudiado con métodos estocásticos y Red Bayesianas Dinámicas generan un comportamiento de deterioro no constante cuyas característica se utiliza para evaluar los efectos de múltiples estrategias de mantenimiento (Calvert et al., 2021)

4.8.1. Métodos de simulación numérica y tridimensionales

Dentro de este ítem se propone el uso de softwares y lenguajes de programación aplicadas en otras investigaciones. Por ejemplo, se usa programas para crear algoritmos de filtrado de data y se complementa con el uso de softwares con simulaciones tridimensionales y otros métodos de elementos finitos. En la **Tabla**

33 se muestra las aplicaciones de softwares para crear algoritmos y modelamientos tridimensionales.

Tabla 33. Aplicación de técnicas y herramientas de simulación numérica

Tipo de software	Uso	Referencia de estudio
ARTeMIS de Structural Vibration Solutions y Matlab	Se utilizó el para aplicar los métodos de identificación planteados FDD y SSI.	(Viviescas et al., 2018)
Matlab	Se aplica el sistema VBI para calibrar con el caso experimental.	(Mudahemuka et al., 2024)
OpenSees	Software para modelado numérico de código abierto para simular la respuesta sísmica de sistemas estructurales.	(Prendergast et al., 2018)
ANSYS	Para calcular frecuencias y formas modales	(Ároch et al., 2016)

Nota. Elaborado a partir de resultado de investigaciones

4.8.2. Calibración de modelos simulados

La calibración es la parte de la compatibilidad de datos experimentales captadas por sensores comparadas con datos extraídos de softwares, en muchos otros casos, las propiedades analizadas mediante la constitución de materiales de sensores son agregadas al modelo numérico para predecir daño a futuro. Se verifica la información dinámica teórica con los ensayos realizados en campo para comprobar si tienen concordancia, el modelo numérico debe calibrarse hasta que represente los datos obtenidos en campo (Viviescas et al., 2018). Cuando no se identifica alguna forma modal asociado a un modo de vibración puede deberse a la falta o baja excitación de puente (Viviescas et al., 2018). Para calibrar considerar los datos básicos como la sección transversal, la densidad y el módulo de elasticidad de los materiales, condiciones de contorno de conexión y apoyos (Viviescas et al., 2018). El ACI propone el procedimiento mediante calibraciones para generar la precisión de los modelos y verificar del tiempo de vida útil (ACI, 2019b). Por ello, se

propone una actualización constante en la parte experimental con los modelos numéricos dependiendo el objetivo de estudio. Con dicha calibración se obtendrá con mayor precisión la localización, intensidad y tipo de daño para predecir el avance de daño.

4.9. VERIFICACIÓN DE LA CONDICIÓN DE LA ESTRUCTURA

Al verificar la calibración del modelo número se toma en cuenta algunos parámetros de daño que debemos obtener de acuerdo al rango de daño que se obtuvo por ello en este ítem se muestran dichas medidas. Además, dentro del procesamiento de datos que se definió en el ítem 4.6. al 4.8 se pueden ir mostrando algunos datos obtenidos:

- Modos de vibración
- Dirección (X, Y y Z)
- Frecuencia (Hz)
- Periodo (s)
- Amortiguamiento (%)
- Ancho de banda (%)
- Decrecimiento logarítmico (%)
- Participación masas (%)
- Participación de masas acumuladas en las direcciones X, Y y Z.

4.9.1. Parametrización de daño

Algunas parametrizaciones pueden ser alfanumérica como la Extensión de gravedad (SevEx) el cual registra la condición de cada elemento estructural menor de un puente teniendo en cuenta la gravedad y extensión del daño (Calvert et al., 2021). Las características del índice de daño se complementan descriptivamente

con la **Tabla 13**. En Darban et al.(2021) menciona el índice de condición de los puentes (BCI) para verificar la condición de daño global de puentes. En la siguiente tabla se muestra una complicación de lo propuesto en el índice de daño planteado anteriormente con la compatibilidad del BCI.

Tabla 34. Estados de daño y nivel de desempeño

PARAMETROS DE INVESTIGACIONES Y NORMATIVAS	INDICE DE DAÑO				
	Perfecto	Bueno	Regular	No calificado	Peligroso
	En buenas condiciones	daño menor o problemas menores en elementos secundarios	daño mediano o problema menor en elementos primarios	gran daño o problemas en elementos primarios	problema grave en elementos primarios
China					
Dr y BCI	$95 \leq Dr < 100$	$80 \leq Dr < 95$	$60 \leq Dr < 80$	$40 \leq Dr < 60$	$0 \leq Dr < 40$
Citado en Darban et al. (2021)	$90 \leq BCI$	$80 \leq BCI < 90$	$66 \leq BCI < 80$	$50 \leq BCI < 66$	$BCI < 50$
Korea					
ID	$0 \leq ID < 0.13$	$0.13 \leq ID < 0.26$	$0.26 \leq ID < 0.49$	$0.49 \leq ID < 0.79$	$0.79 \leq ID$
Citado en Darban et al. (2021)					
Brasil					
(en porcentaje)	10-30	30-40	-	40-50	50-60
Citado en Casas & Moughly (2017)					
Steffens (1974) citado en Casas & Moughly (2017)	<17.5	17.5-40	-	40-72.5	72.5
Intensidad (vibración)					
Koch (1953) citado en Casas & Moughly (2017)	<20	20-30	30-40	40-50	>50
Intensidad (vibración)					

Nota. Elaborado a partir de resultado de investigaciones

4.9.2. Posibles alertas

Las alertas tempranas solo dependen de un indicador, la cual no es muy segura y aumenta la incertidumbre. Por ello Han et al. (2021) recomienda usar alertas tempranas con múltiples indicadores, es decir , mostrar que el puente está en

estado vulnerable después de tres sobrepasos consecutivos lo que puede reducir las falsas alarmas.

4.9.3. Toma de decisiones

Se recomienda usar el BBN (Redes de Creencias Bayesianas) con las cadenas de Márkov para analizar la confiabilidad, evaluar riesgos y estudiar toma de decisión de acuerdo al tipo de mantenimiento. Calvert et al., 2021 desarrollo un DBN el cual es una mejora del BBN con la variabilidad dinámica abarcado a una data de inspección visual con un modelo que ayude a la toma de decisiones versátiles. Los indicadores de alerta temprana pueden realizarse por método de estadísticos y de condicionales con múltiples alertas estáticas y dinámicas.

Se propone el grado de evaluación para el estudio de la decisión que se debe tomar (Darban et al., 2021): El Índice de Salud del Puente (BHI) en el cual se estudia a la estructura, hidrología y clima, seguridad, rendimiento del puente (impacto de carga), geotecnia y sismicidad, importancia estratégica, instalaciones, tráfico y pavimento. Mientras que Honfi et al. (2020) estudia la evaluación sucesiva de la gravedad de daño y la importancia de la estructura para la toma de decisiones. Con ello se verifica el índice de daño con los parámetros propuestos en la **Parametrización de daños**. En la siguiente tabla se presenta los parámetros globales para el resultado en la condición del puente global contrastado por investigaciones y normativas.

Tabla 35. Condición de puente global

Índice de daño	Severidad de daño	Descripción de la condición
0	Condición fallida	Fuera de servicio se necesita más que acción correctiva, colapso inminente.
1	Condición de falla	El puente debe cerrarse al tráfico para las acciones correctivas o solo restablecer el tránsito para unidades ligeras. Seguridad

	inminente	de ocupantes comprometido con presencia de pre - colapso. Se necesita investigaciones de seguimiento.
2	Condición crítica o pésima	Cerrar puente al menos que se monitoree con el tráfico de uso y se analice las medidas correctivas. Se necesita investigaciones a profundidad. Acción de emergencia: Posibilidad de problemas o problemas existentes en el funcionamiento del puente, necesidad de acciones de emergencia
3	Estado grave o muy malo	Reparaciones necesarias durante los trabajos de mantenimiento regular Reparaciones inmediatas durante los trabajos de mantenimiento regular.
4	Condición pobre o malo	Nivel de desempeño operacional con daños ligeros se puede interrumpir por un tramo de tiempo, pero de recuperación inmediata. Se necesitan acciones inmediatas en conjunto con otros factores. Acción temprana: Posibilidad de problemas en el funcionamiento del puente, necesidad de actuar con prontitud
5	Condición justa o regular	Se requiere acciones inmediatas desde el punto de vista de la seguridad estructural.
6	Condición satisfactoria	Se requiere reparaciones inmediatas desde el punto de vista de la seguridad estructural.
7	Buen estado	Reparación necesaria durante trabajos de mantenimiento regular preventivo. No hay problemas en el funcionamiento del puente, pero se requiere mantenimiento desde el punto de vista del mantenimiento preventivo.
8	Muy buena condición	No necesita reparaciones inmediatas
9	Excelente condición	Estado de daño despreciable, totalmente operacional. No hay problemas en las funciones del puente. No necesita reparación

Nota: Extraído y adaptado (Ahlborn et al., 2010; Calvert et al., 2021; Darban et al., 2021; MTC, 2006)

4.10. ALTERNATIVAS DE POSIBLES SOLUCIONES

Según el ACI propone el análisis estructural también para el proceso de reparación contando con la variación de las propiedades de los materiales y efectos

de cargas. En la **Tabla 36** se proponen las normativas que se encargan de la reparación de materiales.

Tabla 36. Normativas de reparación de materiales

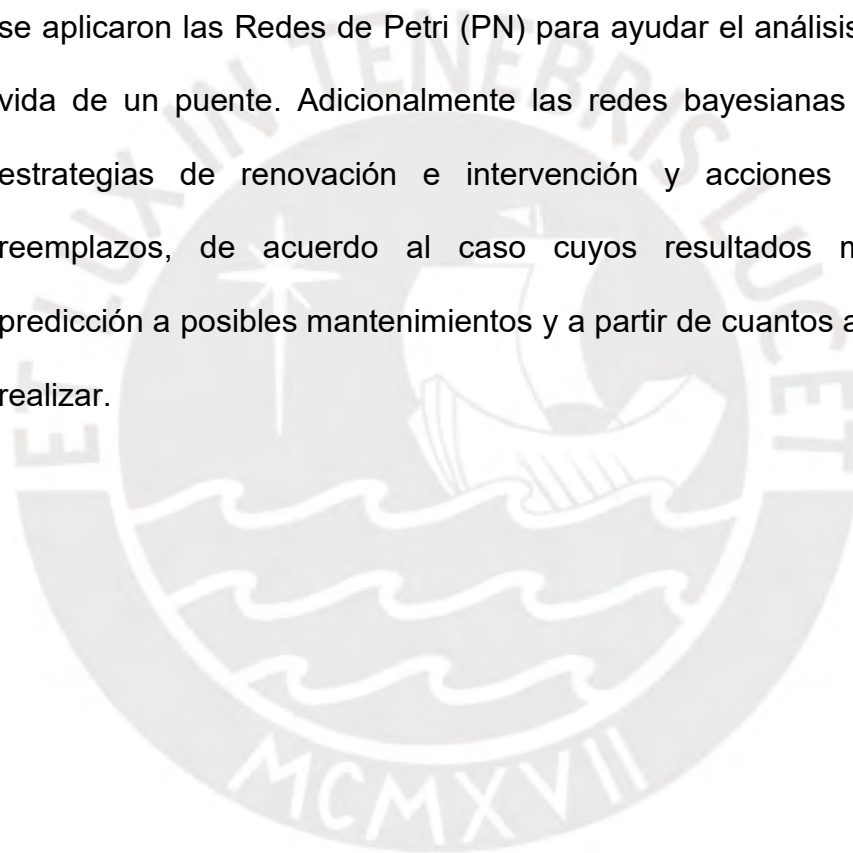
NORMATIVA	DESCRIPCIÓN
ACI PRC 440.2-17	Guía para el diseño y construcción de sistemas FRP adheridos externamente para fortalecer estructuras de concreto
ACI 546.3R	Esta guía proporciona parámetros y orienta sobre la selección de materiales para la reparación de concreto
ACI 549.1 R	Esta guía proporciona información técnica sobre las propiedades físicas y mecánicas, los criterios de diseño y las pruebas del ferrocemento.
ICRI 320.2 R	Esta guía ayuda a diseñadores, especificadores, contratistas y fabricantes a tomar las mejores decisiones posibles al seleccionar materiales para la reparación de superficies de concreto.
ICRI 320.3 R	Esta guía proporciona un protocolo estandarizado para las pruebas y la presentación de información en la Hoja de Datos de Materiales, lo que permite una selección y especificación más precisa de los materiales de reparación
ICRI 330.1	Esta guía describe varios métodos de refuerzo de estructuras, incluyendo sistemas de unión externa, postensado, etc.

Nota. Elaborado a partir de resultado de investigaciones

Algunas recomendaciones de posibles soluciones extraídas de investigaciones se proponen a continuación:

- Para la corrosión en el acero: La soldadura por arco es el método más común para la reparación de estructuras corroídas, pero según este tipo de reparaciones pueden modificar las propiedades mecánicas del material (resistencia, tenacidad y resistencia a la corrosión) esto ocurre debido a la sobreexposición al calor sometido por la soldadura, por ello propone el uso de la reparación mediante la fabricación aditiva con láser es decir una impresión 3D con acero en polvo para modificar la microestructura de la estructura corroída (S. Zhang et al., 2023) .

- La protección catódica previene el deterioro de acero en el concreto armado y en perfiles de acero de los puentes creando una red química de protección (Enckell, 2011). Aunque este método solo retrasa los posibles daños a futuro.
- Se menciona el uso de FRP para evitar la vulnerabilidad de la corrosión del acero (Ahlborn et al., 2010)
- Estrategia en toma de decisiones: En el estudio de Calvert et al., 2021 se aplicaron las Redes de Petri (PN) para ayudar el análisis del ciclo de vida de un puente. Adicionalmente las redes bayesianas generan las estrategias de renovación e intervención y acciones de posibles reemplazos, de acuerdo al caso cuyos resultados mejoraron la predicción a posibles mantenimientos y a partir de cuantos años se debe realizar.



LINEAMIENTOS PARA EL PLAN DE MONITOREO

TECNOLOGICO

Al tener la data histórica completa de acuerdo a la **Tabla 2** y la **Sección I: Obtención de la data histórica**, se propone la creación de un **“Plan de monitoreo tecnológico”** para aplicar la parte metodológica del BHM. Está tomará en cuenta lo plasmado en la **Sección II: Metodología BHM** en la que se especifican los objetivos, metodología, aplicaciones y sugerencias del monitoreo de puentes. Los lineamientos propuestos en esta sección tienen como objetivo la creación de un documento técnico en el que se planifica el monitoreo de un puente tomando las consideraciones mínimas de aplicación.

01. El alcance del plan de monitoreo tecnológico está determinado y elaborado con los límites propuestos en el **Capítulo 4. Manual de monitoreo de la salud estructural de puentes en el Perú**. Se recomienda los siguientes contenidos dentro del Plan de monitoreo tecnológico:

- ❖ Objetivo y características del monitoreo.
- ❖ Frecuencia de monitoreos y plazos para completar el trabajo de inspección.
- ❖ Actividades dentro de la inspección.
- ❖ Análisis y constitución de materiales observados.
- ❖ Elementos estructurales observados para los estudios.
- ❖ Instrumentos para el monitoreo, orden de colocación y procedimiento de medición dentro de la estructura.
- ❖ Metodología para procesar datos y análisis de resultados.

❖ Medidas de seguridad para garantizar la colocación de sensores, obtención y procesamiento de data.

❖ Lista de documentos de informes técnicos y plazos para presentarlos.

02. El “**Plan de monitoreo tecnológico**” debe cumplir y plasmar un informe con características de las siguientes etapas:

02.01. Primera etapa. Se describen los antecedentes del puente a monitorear, dicha información se recopila mediante la **SECCION I: OBTENCIÓN DE LA DATA HISTÓRICA.**

02.02. Segunda etapa. Se propone el tipo de monitoreo a aplicar, esto puede ser de acuerdo a su objetivo de estudio, duración de monitoreo o ciclo de vida. Además, los requerimientos mínimos se deben tomar en cuenta.

02.02.01. Para el monitoreo por su objetivo de estudio se expone:

02.02.01.01. Es un monitoreo de control preventivo e investigativo en el que se estudian las apariciones de desgastes para proyectar el daño ante fenómenos plasmados en el ítem **Factores Externos** que causen daños extremos o de emergencia.

02.02.01.02. Se puede proponer y aplicar nuevos diseños, métodos y soluciones en tecnología dentro de la ingeniería civil como modelos matemáticos, numéricos, algoritmos IA, etc.

02.02.02. Para el monitoreo de acuerdo a la duración de la obtención de la información se expone lo siguiente:

02.02.02.01. Este monitoreo se realiza en un periodo de tiempo de acuerdo a la necesidad de la información y estado del puente.

02.02.02.02. Se exponen dos tipos de monitoreo:

- ❖ Monitoreo periódico se realiza en un plazo corto de tiempo, pero con mayor frecuencia de estudio.
- ❖ Monitoreo continuo donde la obtención de data es de manera permanente y se analiza en un estado de tensión – deformación.

02.02.03. Para el monitoreo de acuerdo al ciclo de vida se consideran tres tipos de inspecciones:

02.02.03.01. Monitoreo durante el periodo de construcción para verificar si las condiciones de calidad de material, ejecución de obra, diseño estructural van acorde a lo plasmado. Además, este monitoreo propone obtener una base amplia de antecedentes para futuros monitoreos en el que se puede aplicar metodologías como el BIM y gemelos digitales para un monitoreo permanente que continúe durante la etapa de operación.

02.02.03.02. Monitoreo durante el periodo de operación del puente.

02.02.03.03. Monitoreo cuando el puente se encuentra en el estado de inoperatividad que sirve como investigación para el desarrollo de la ingeniería civil.

02.02.04. En el informe se debe sustentar el monitoreo escogido teniendo en cuenta y sustentando lo siguiente:

- ❖ Propósito general del monitoreo.
- ❖ Tiempo y velocidad de monitoreo.
- ❖ Cambios en el tiempo.
- ❖ Duración de mediciones.
- ❖ Errores de medición.
- ❖ Parámetros de entorno.

❖ Factores de daño (de acuerdo al **ítem 4.3.1**).

02.02.05. Además, al escoger el tipo de monitoreo, se establecen categorías para los elementos estructurales y objetivos de estudio mediante el uso de data histórica. Esto facilitará los sectores de vulnerabilidad estructural para proponer un monitoreo eficiente. Este ítem se puede orientar con los **Tipos de daños** propuestos en la primera sección.

02.03. Tercera etapa. El informe debe plasmar el sistema de instrumentación para el monitoreo, por ello se debe tener en cuenta lo siguiente:

02.03.01. Se considera lo formulado en el **Estudio de parámetros de entorno** como lo primero que debe tomarse al escoger las instrumentaciones debido a las condiciones extremas cambiantes, los monitoreos de corto o largo plazo para corregir y compensar la data variable por agentes como temperatura, humedad, etc.

02.03.02. En el informe técnico se debe sustentar el tipo de dispositivo de monitoreo a usarse, por ello se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- ❖ Número y composición de parámetros monitoreados.
- ❖ Condiciones ambientales o parámetros de entorno.
- ❖ Requisitos para su uso (de acuerdo al **ítem 4.4**)
- ❖ Viabilidad económica.
- ❖ Rango de medición.

02.03.03. Dentro del informe se deberá especificar una lista con información sobre las marcas, tipos, cantidades y especificaciones técnicas de equipos de medición y telecomunicaciones a usar.

02.03.04. Para el posicionamiento de instrumentos de monitoreo se deben tener las siguientes consideraciones:

02.03.04.01. Se debe tomar en cuenta las consideraciones generales:

- ❖ La cantidad de dispositivos a usar
- ❖ La ubicación relativa entre instrumentos
- ❖ Distancias de los sitios de obtención de data, adquisición de data y procesamiento de data.
- ❖ Tipos de instalación de equipos (verificar si están en lugares donde se necesita empotrar, inaccesibles, en repisas, pedestales o inaccesibles).
- ❖ Velocidad del proceso del sistema de monitoreo
- ❖ Cambios y reubicación dependiendo al tiempo de monitoreo
- ❖ Duración de la medición
- ❖ Errores de mediciones

02.03.04.02. Verificar el grado de redundancia para que el sistema no se altere por fallas o cambios en ubicación de dispositivos es decir si un sensor falla otros deben obtener la data faltante sin alterar el funcionamiento del sistema.

02.03.04.03. En caso que el sistema falle por agentes no previstos como choques o fenómenos ambientales debe garantizarse la restauración inmediata. Por ello se recomienda el uso de algoritmos de IA para optimizar la ubicación de sensores y otros dispositivos (ver el **ítem 4.5** para las técnicas de posicionamiento de sensores)

02.04. Cuarta etapa. Desarrollar las herramientas tecnológicas como algoritmos de IA para el seguimiento detallado del monitoreo.

02.04.01. Se debe obtener una lista de hardware y software para el procesamiento, visualización y almacenamiento de la data obtenida para aplicar la mejor establecida dentro del sistema.

02.04.02. Realizar las pruebas preliminares en gabinete para verificar que las herramientas tecnológicas no fallen en la aplicación ya que en este proceso se puede modificar la red de sensores, cambiar los dispositivos de adquisición de data y actualizar software.

02.05. Quinta etapa. Para la instalación de instrumentos de monitoreos se deben tener en cuenta tanto en el documento técnico como en el campo lo siguiente:

02.05.01. Al plantearse la ubicación y tipo de instrumentación se verifica la posibilidad de acceso seguro y viable para la instalación por parte del personal que da servicio al sistema de monitoreo.

02.05.02. En el informe se debe presentar planos de trabajo para la ubicación de instrumentos de monitoreo: sensores, transductores primarios, amplificadores, controladores, sistemas de cableado, equipos de sala de control y otros equipos.

02.05.03. En caso de sensores que están integrado a un elemento estructural en lugares inaccesibles se debe tomar en cuenta la seguridad al instalarlos y detallar la ubicación en los planos.

02.05.04. Para el montaje de los instrumentos se debe garantizar las condiciones ambientales evitando precipitaciones y extremas

radiaciones, ya que la mayoría de los dispositivos son eléctricos y vulnerables ante la presencia de agua.

- 02.05.05.** El uso de soporte de sensores para la instalación, desinstalación y reinstalación es lo más viable para los lugares inaccesibles. Es necesario realizar una nueva verificación, calibración y análisis para constatar que se ha colocado adecuadamente.
- 02.05.06.** En el informe se debe proponer un kit de repuestos ante fallas en donde se especifique herramientas, accesorios y repuestos con las mismas informaciones del **ítem 02.03.03.**
- 02.05.07.** Además, debe incluir medidas para proteger equipos, líneas de comunicación antes, durante y después del monitoreo ante los parámetros de entorno y daños mecánicos accidentales.
- 02.06. Sexta etapa.** Calibración de los equipos instalados y puestos en servicio de acuerdo a al **ítem 4.6.**
- 02.06.01.** Se realiza el procesamiento de los datos durante el proceso de calibración de manera preliminar para verificar si el sistema funciona o existen fallas. En caso no existan fallas, el sistema se pone en servicio y los datos obtenidos son los definitivos.
- 02.06.02.** Se permite la implementación de hardware y software del intercambio de información con sistemas automatizados interconectados que sirven para mejorar la exactitud de resultados. Dicha interacción y protocolos de intercambio de datos se debe especificar para que no exista confusión en la data procesada.

02.07. Séptima etapa. El seguimiento de la herramienta tecnológica como algoritmos IA y softwares de métodos numéricos considerados de acuerdo a **ítem 4.8.**

02.07.01. Para la aplicación del algoritmo IA para los datos se debe garantizar la confiabilidad e integridad del sistema.

02.07.02. La finalidad de usar la IA:

- ❖ Recopilación, procesamiento y automatización de datos.
- ❖ Implementación del análisis y visualización de resultados de los datos complejos obtenidos.
- ❖ Mayor rapidez en el procesamiento de datos
- ❖ Programar para emitir información de advertencia ante situaciones anormales y de emergencia

02.07.03. Para analizar la data existen la fase de preprocesamiento de datos, se toma en cuenta:

02.07.03.01. El preprocesamiento puede incluir transformaciones de fórmulas de datos, filtrado de ruido ambiental, validación de datos, aplicación de modelos matemáticos, análisis espectral, análisis comparativo, procesamiento estadístico, etc.

02.07.04. Se requiere especialistas en implementación de la IA para autenticar los algoritmos IA y realizar un correcto seguimiento de los resultados obtenidos.

02.07.05. En caso se realice el uso de software de modelos informáticos, se recomienda ajustar constantemente los parámetros obtenidos de las instrumentaciones con los modelos para pronosticar con mayor exactitud el comportamiento estructural.

02.08. Octava etapa. Análisis de resultados

02.08.01. Al plantear el número y composición de parámetros monitoreados en el **ítem 02.03.02.** se escogen los MID de acuerdo al **ítem 4.7** para el objetivo de estudio de la estructura.

02.08.02. Para la automatización de datos:

02.08.02.01. Se propone el uso de algoritmos IA para analizar, caracterizar y procesar la data sobre el estado del puente de manera rápida mediante la automatización.

02.08.02.02. El algoritmo IA implementado debe tener medidas para proteger contra errores al ingresar y procesar la data asegurando la calidad de procesamiento.

02.08.02.03. Se necesita la transparencia y explicabilidad en el lenguaje de programación, contenido y la posible caja negra que contenga el algoritmo IA de monitoreo.

02.09. Novena etapa. Se propone el desmontaje del equipo por tiempos en caso sea una red de dispositivos cuantiosa que dependa al tipo de monitoreo, tiempo de desmontaje y aprovechamiento de data cruda.

03. Para la seguridad.

03.01. Dentro del informe considerar la seguridad laboral para las fases de instalación, puesta en servicio y mantenimiento del sistema de monitoreo.

03.02. Para el cuidado de la instrumentación se proporciona la protección ante la influencia de campos eléctricos y magnéticos externos, así como de interferencias en los circuitos de suministro de energía.

03.03. Se propone gestionar la seguridad en el preprocesamiento, procesamiento y almacenamiento de la data para resultados confiables y futuras investigaciones.

04. Para el almacenamiento.

04.01. Toda la información obtenida como resultado de la recopilación y procesamiento inicial de datos se deberá sistematizar y colocar en una base de datos común.

05. Para la confiabilidad.

05.01. Se debe tener las siguientes consideraciones para que el sistema tenga un grado de confiabilidad:

- ❖ Duplicación de sensores de acuerdo al nivel de redundancia.
- ❖ Duplicación de canales de comunicación y DAQ.
- ❖ Control de varios parámetros de la estructura.
- ❖ Tener un protocolo de emergencia en caso uno de los procesos de trabajo falle y pueda notificarse y resolverse de manera inmediata.
- ❖ Implementar al software copia de seguridad de la base de datos, recuperación automática del sistema después de una falla, etc.

05.02. Se debe considerar una vida útil del sistema de monitoreo permanente de al menos 5 años con un periodo de garantía de 12 meses desde el momento de la puesta en servicio. Estos son variables ante las especificaciones técnicas de cada instrumento, sensor, DAQ, software y algoritmos IA.

06. Todas las inconsistencias detectadas en la etapa de instalación deben documentarse para su posterior aprobación y cambios al programa de monitoreo.



Capítulo 5. Análisis de resultados.

Los estándares propuestos en BHM e IA se toma en cuenta de acuerdo a la segunda sección de la guía, la cual debe ser seleccionada dependiendo de los antecedentes obtenidos de las normativas que especifican al monitoreo tradicional de puentes. Por ello, en los lineamientos propuestos son reunidos mediante normativas internacionales, lineamiento nacionales e importancia. En la siguiente tabla se observa los lineamientos usados de acuerdo a las normativas usadas:

Tabla 37. Normativas usadas para la guía.

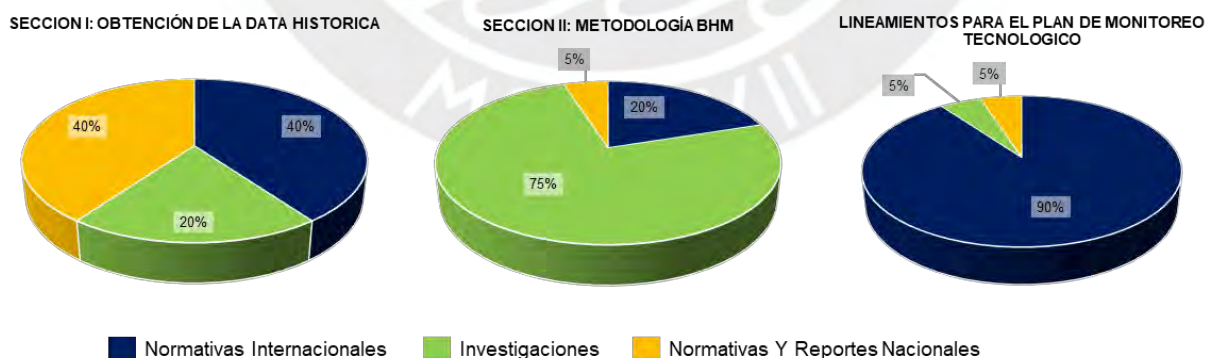
Normativa	Dispositivos	Procesamiento de datos	Análisis estructural	IA
Condiciones técnicas del monitoreo de puentes de Rusia. (Ministry Of Construction And Housing And Communal Services Of The Russian Federation, 2016)	X	X	X	
Lineamientos de la inspección periódica de puentes de Japón. (Ministry of Land, Infrastructure, Transport, 2019)	X	X		
Directrices éticas para una IA fiable (Comisión Europea, 2018)				X
Manual de evaluación de puentes en Estados Unidos (AASHTO, 2018)	X	X	X	
JT/T 1037-2022: Especificaciones técnicas para el monitoreo de la salud estructural de puentes en China (Ministry of Transportation of the People's Republic of China, 2022)	X	X	X	
Directrices para la clasificación y gestión de riesgos, evaluación de la seguridad y seguimiento de puentes existentes (Ministero de Ile Infrastrutture e dei Trasporti, 2020)	X	X	X	
Plan IA de implementación al 2030 en China (Cheng & Zeng, 2023)				X
Guía para Inspección de puentes en el Perú (MTC, 2019a)	X			
Ley sobre el uso de la IA en el Perú (El peruano, 2023)				X

Nota: Elaboración propia.

Las normativas internacionales en BHM que estudiaron en Italia, Estados Unidos, Japón y China mencionan: primero, el uso de sensores, drones y otros dispositivos tecnológicos como principal herramienta de monitoreo; segundo, el cuidado del procesamiento de datos mencionando el uso de algoritmos inteligentes sin especificarlos; tercero, el análisis estructural para la calibración y validación de resultados mediante el uso de modelos tridimensionales y resultados de la constitución de material realizada por los sensores.

En cuanto a la IA dentro de la ingeniería civil no existen lineamientos explícitos, por ello se utilizaron las normativas de éticas y planes de Europa y China, los cuales vienen desarrollando investigaciones regidas a estas normas. Cabe resaltar, que la presente guía propuso dos secciones generales y lineamientos generales para el plan de trabajo BHM. Por ello en la siguiente figura se presenta el porcentaje de correlación y contribución dentro de cada sección de la guía propuesta en el **Capítulo 4**. en el que se utilizaron normativas internacionales, investigaciones mundiales, normativas y reportes nacionales.

Figura 55. Bibliografía usada para guía BHM.



Nota: Elaboración propia.

Dentro de la primera sección el aporte de normativas internacionales y nacionales fueron las primordiales para la guía, mientras que en la segunda parte

se resumió el uso de diferentes sistemas BHM exployados en investigaciones. Finalmente, para los lineamientos se orientaron mediante las normativas explicadas en la anterior tabla.





Capítulo 6. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

CONCLUSIONES

La presente investigación ha desarrollado una guía de inspección para la implementación del sistema de monitoreo de la salud estructural de puentes en el Perú, basada en la metodología del Bridge Health Monitoring (BHM). Este trabajo ha logrado integrar los conocimientos de la ingeniería civil, la ingeniería estructural, la tecnología de sensores y la gestión de datos para crear una herramienta práctica que contribuya a la seguridad y durabilidad de las infraestructuras viales del país.

La guía, estructurada en diez capítulos, aborda la inspección de cinco tipos de puentes: tipo viga, arco, armadura, tirantes y suspensión. Se ha realizado un análisis exhaustivo del estado del arte, incluyendo las mejores prácticas internacionales en monitoreo de puentes, así como las particularidades del contexto peruano.

La metodología del BHM, implementada en la guía, se ha adaptado a las necesidades específicas de Perú, considerando parámetros de entorno como las condiciones climáticas, la actividad sísmica y las características de los materiales utilizados en la construcción de puentes para proponer la clasificación de los instrumentos y el posicionamiento en el monitoreo de puentes. Además, se expone el tiempo del monitoreo de acuerdo al tipo de instrumento para tener en cuenta la seguridad del posicionamiento de los instrumentos.

Se propusieron dos factores de daños: los factores internos a agentes que actúan internamente en la estructura de un puente y los factores externos aquellas fuerzas que aparecen de manera intempestiva y generan mayores daños en un mínimo tiempo.

Se ha enfatizado la importancia de la integración de tecnologías como los sistemas de adquisición de datos, el análisis de imágenes y el procesamiento de

señales, para optimizar la eficiencia y la precisión del monitoreo. Además, la guía tiene aspectos fundamentales de la inspección visual, estudio de parámetros de entorno, uso y selección de dispositivos de monitoreo, gestión de la minería de datos, métodos de identificación de daños, modelos numéricos, calibraciones, verificaciones del estado del puente y alternativas de solución mediante el conocimiento del BHM e IA.

Finalmente, la guía de inspección desarrollada en esta investigación representa un valioso aporte al campo de la ingeniería estructural en Perú. Su aplicación permitirá ampliar estudios en el monitoreo los puentes, garantizando la seguridad de los usuarios y la sostenibilidad de las inversiones en puentes.

RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda incorporar la integración de sistemas de monitoreo desde la etapa de diseño con el afán de tener modelos tridimensionales con los detalles y calidad de materiales, esto facilitará la implementación de la guía en la fase de la **Obtención de Data Histórica** y la optimización del mantenimiento.
- ❖ Se recomienda la creación del sistema de gestión de puentes (BMS) en el cual se detalle inspecciones generando un banco de pruebas de monitoreo de puentes con data cruda, para futuras investigaciones.
- ❖ Investigar la integración de la guía con otras tecnologías emergentes como lo gemelos digitales para mejorar la eficiencia del monitoreo y la gestión de las estructuras.

- ❖ Investigar el campo de la gestión del mantenimiento de infraestructuras viales (IMM) en el que se gestiona el mantenimiento y posibles soluciones antes factores que puedan ocasionar colapso inminente.

TRABAJOS FUTUROS

- ❖ Realizar estudios de caso específicos para evaluar la efectividad de la guía de inspección en diferentes tipos de puentes y condiciones climáticas. Esto permitirá validar la metodología de la guía propuesta y optimizar su aplicación.
- ❖ Realizar un análisis de costos de implementación en un caso real para el Perú, comparar las ventajas y desventajas que conlleva entre la inspección tradicional peruana y la propuesta tecnológica de la guía.
- ❖ Profundizar en el análisis de datos de monitoreo con la aplicación de la Inteligencia Artificial, utilizando técnicas de aprendizaje automático y análisis predictivo para identificar patrones de comportamiento de los puentes y anticipar posibles daños.
- ❖ Realizar una evaluación del impacto de la implementación de la guía en la seguridad, la eficiencia y la sostenibilidad de la infraestructura vial peruana para ver los beneficios de la metodología y justificar su aplicación a gran escala.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AASHTO. (2018). *The manual for bridge evaluation* (American Association of State Highway and Transportation Officials (ed.)).
- ACI. (2015). ACI 440.1R-15 Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. In *American Concrete Institute* (Issue 4).
- ACI. (2019a). ACI 318-19: Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario de requisitos de reglamento. In *American Concrete Institute*.
- ACI. (2019b). ACI 562-19: Code requirements for assessment, repair, and rehabilitation of existing concrete structures and commentary. In *American Concrete Institute*.
- Acito, M., Buzzetti, M., Chesi, C., Magrinelli, E., & Milani, G. (2023). Failures and damages of historical masonry structures induced by 2012 northern and 2016–17 central Italy seismic sequences: Critical issues and new perspectives towards seismic prevention. *Engineering Failure Analysis*, 149, 107257. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107257>
- Ahlborn, T. M., Shuchman, R. A., Sutter, L. L., Brooks, C. N., Harris, D. K., Burns, J. W., Endsley, K. A., Evans, D. C., Vaghefi, K., & Oats, R. C. (2010). *The state of the practice of modern structural health monitoring for bridges: A comprehensive review*. 48105(734). [http://www.mtri.org/bridgecondition/doc/State-of-PracticeSHMforBridges\(July2010\).pdf](http://www.mtri.org/bridgecondition/doc/State-of-PracticeSHMforBridges(July2010).pdf)
- Al-Khateeb, H. T., Shenton, H. W., Chajes, M. J., & Aloupis, C. (2019). Structural Health Monitoring of a Cable-Stayed Bridge Using Regularly Conducted Diagnostic Load Tests. *Frontiers in Built Environment*, 5. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00041>
- Alarcón, E., Ramirez, A., & Santos, S. (2016). *Investigación de la falla hidráulica del puente Bella Unión para el análisis comparativo de costo de falla y costos de prevención, brindando lineamientos para el análisis del fenómeno de socavación en otros puentes* [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/620548>

- An, Y., Chatzi, E., Sim, S. H., Laflamme, S., Blachowski, B., & Ou, J. (2019). Recent progress and future trends on damage identification methods for bridge structures. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(10), 1–30. <https://doi.org/10.1002/stc.2416>
- Ároch, R., Sokol, M., & Venglar, M. (2016). Structural Health Monitoring of Major Danube Bridges in Bratislava. *Procedia Engineering*, 156, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.263>
- ASCE. (2022). *ASCE Grand Challenge*. ASCE.
- ASTM. (2008a). ASTM A36: Norma de especificacion del acero estructural al carbono. *ASTM International*, 1–4.
- ASTM. (2008b). ASTM C616-8 Standard Specification for Quartz-Based Dimension Stone. *ASTM International*, 7–8.
- ASTM. (2009). ASTM C1353-08: Standard Test Method Using the Taber Abraser for Abrasion Resistance of Dimension Stone Subjected to Foot Traffic. *ASTM International*, 04, 7–8.
- ASTM. (2011). ASTM A992: Standard Specification for Structural Steel Shapes. *ASTM International*, 11–13. <https://doi.org/10.1520/A0992>
- ASTM. (2012). ASTM A615M-12: Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement. *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/A0615>
- ASTM. (2013). ASTM A709: Standard Specification for Structural Steel for Bridges. *ASTM International*, November, 7. <https://doi.org/10.1520/A0709>
- ASTM. (2019a). ASTM C67-19: Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. *ASTM International*, 08(Reapproved 1989), 3–4. <https://doi.org/10.1520/C1709-18>.
- ASTM. (2019b). ASTM D245-06: Standard Practice for Establishing Structural Grades and Related Allowable Properties for Visually Graded Lumber. *ASTM International*, i(Reapproved), 4–5. <https://doi.org/10.1520/D0245-06R19.2>
- ASTM. (2021). ASTM A572: Standard Specification for High-Strength Low Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel. *ASTM International*, 1–3.

<https://doi.org/10.1520/A0572>

- Avci, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M., & Inman, D. J. (2021). A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107077>
- Bacuilima, M. A., & Barbecho, J. (2022). Sistemas de Monitoreo de Salud Estructural de Estructuras Civiles: una revisión bibliográfica. *MQRInvestigar*, 6(3), 1641–1667. <https://doi.org/10.56048/mqr20225.6.3.2022.1641-1667>
- Banco de Desarrollo de América Latina. (2020). Impacto de la Infraestructura Vial sobre el crecimiento económico utilizando imágenes satelitales. In *Resumen de Políticas Públicas*. <https://scioteca.caf.com/handle/123456789/1670>
- Bao, X., & Chen, L. (2012). Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors. *Sensors*, 12(7), 8601–8639. <https://doi.org/10.3390/s120708601>
- Bardales, H. (2012). *Conservación de Puentes de Piedra en el Perú: Criterios para su intervención Estructural*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Barrias, A., Casas, J. R., & Villalba, S. (2016). A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications. *Sensors (Switzerland)*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/s16050748>
- Bedriñana, L. (2021). *Sismo en Amazonas: ¿cuál es su impacto en la infraestructura?* UTEC. <https://utec.edu.pe/blog-de-carreras/ingenieria-civil/terremoto-sismo-en-amazonas-peru-noviembre-daños-impacto-en-la-infraestructura-ingenieria-civil-utec>
- Bisby, N. (2006). *SAMCO Final Report 2006 - An Introduction to Structural Health Monitoring*. www.samco.org%5Cnwww.isiscanada.com
- Brencich, A., & Morbiducci, R. (2007). Masonry arches: Historical rules and modern mechanics. *International Journal of Architectural Heritage*, 1(2), 165–189. <https://doi.org/10.1080/15583050701312926>
- Brownjohn, J. M. W. (1994). Estimation of damping in suspension bridges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*,

104(4), 401–415. <https://doi.org/10.1680/istbu.1994.27199>

- Calla, F. J. (2020). *Evaluación estructural y propuesta de refuerzo del puente La Capilla en Moquegua (Perú)*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Calvert, G., Neves, L., Andrews, J., & Hamer, M. (2021). Incorporating defect specific condition indicators in a bridge life cycle analysis. *Engineering Structures*, 246(August), 113003. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113003>
- Cantero, D., McGetrick, P., Kim, C. W., & O'Brien, E. (2019). Experimental monitoring of bridge frequency evolution during the passage of vehicles with different suspension properties. *Engineering Structures*, 187(January), 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.065>
- Casas, J. R., & Moughty, J. J. (2017). Bridge damage detection based on vibration data: Past and new developments. *Frontiers in Built Environment*, 3(February), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00004>
- Castañeda, J., Fecundo, A., Gaona, C., Vásquez, G., & Martínez, A. (2001). *Inspeccion De La Corrosion En Puentes De Concreto Reforzado Mediante Un Monitoreo Autonomo a Distancia*. 16, 18. <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/10129>
- CESMA. (2016). *Puente sobre el río Pachitea en Puerto Inca*. <http://cesmaingenieros.com/index.php/project/puente-sobre-el-rio-pachitea-en-puerto-inca/>
- Chang, P. C., Flatau, A., & Liu, S. C. (2003). Review paper: Health monitoring of civil infrastructure. *Structural Health Monitoring*, 2(3), 257–267. <https://doi.org/10.1177/1475921703036169>
- Chen, H.-P. (2018). Structural health monitoring of large civil engineering structures. In *Progress in Structural Engineering and Materials* (Vol. 1, Issue 3). <https://doi.org/10.1002/pse.2260010313>
- Cheng, J., & Zeng, J. (2023). Shaping AI's Future? China in Global AI Governance. *Journal of Contemporary China*, 32(143), 794–810. <https://doi.org/10.1080/10670564.2022.2107391>
- CNN. (2019). *Sismo de magnitud 8,0 sacude el norte de Perú y se siente en*

- Ecuador, Colombia y Venezuela. CNN.
<https://cnnespanol.cnn.com/2019/05/26/terremoto-de-magnitud-80-sacude-el-norte-de-peru/>
- Comisión Europea. (2018). *Directrices éticas para una IA fiable*.
<https://doi.org/10.2759/14078>
- Comisu, C. C., Taranu, N., Boaca, G., & Scutaru, M. C. (2017). Structural health monitoring system of bridges. *Procedia Engineering*, 199, 2054–2059.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.472>
- Concesionaria Vial de los Andes. (2018). *Informe de investigación determina que el colapso de la Torre B del puente Chirajara obedeció a error de diseño*. COVIANDES. <https://www.coviandes.com/noticias/informe-de-investigacion-determina-que-el-colapso-de-la-torre-b-del-puente-chirajara>
- Construcción y Vivienda. (2016). *San Martín: Construcción de puente atirantado vehicular Atumpampa*. <https://www.construccionyvivienda.com/2016/01/18/en-la-region-san-martin-puente-atirantado-vehicular-atumpampa/>
- Construcción y Vivienda. (2021a). *Puente Continental, el más largo del Perú: 723 metros en acero y concreto*. Construcción Y Vivienda.
- Construcción y Vivienda. (2021b). *Puente vehicular Bellavista: Infraestructura atirantada de 320 m de luz*. <https://www.construccionyvivienda.com/2021/12/07/puente-vehicular-bellavista-infraestructura-atirantada-de-320-m-de-luz/>
- CONTRALORÍA. (2016). *-Informe de acción simultanea N° 157-2016-CG/MPROY-AS*.
- Córdova Krugg, A. I. (2022). Tecnología, prevención y atención de la población damnificada en caso de desastres naturales en Perú. *Revista de Ciencia e Investigación En Defensa - CAEN*, 2(3), 80–87.
<https://doi.org/10.58211/recide.v2i3.66>
- Correa, K., Castro, A., Rivera, P., Porras, P., Mesias, J., Yucra, J., & Calixto, K. (2024). *INFORME TECNICO N° D000004-2024-SENAMHI-SPC-ACN*.
- Correo. (2019). *Urge cambio de barandas en el puente Cáceres porque son un*

- peligro para la población*. Periodico El Correo. <https://diariocorreo.pe/edicion/piura/urge-cambio-de-barandas-en-el-puente-caceres-porque-son-un-peligro-para-la-poblacion-887524/>
- Cremona, C., & Santos, J. (2018). Structural health monitoring as a big-data problem. *Structural Engineering International*, 28(3), 243–254. <https://doi.org/10.1080/10168664.2018.1461536>
- Darban, S., Tehrani, H. G., Karballaezadeh, N., & Mosavi, A. (2021). Application of analytical hierarchy process for structural health monitoring and prioritizing concrete bridges in iran. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(17), 1–33. <https://doi.org/10.3390/app11178060>
- Das, R., Gonzalez, G., de la Llera, J. C., Saez, E., Salazar, P., Gonzalez, J., & Meneses, C. (2020). A probabilistic seismic hazard assessment of southern Peru and Northern Chile. *Engineering Geology*, 271, 105585. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105585>
- Delgadillo, R. (2022). *Development of a machine learning based methodology for bridge health monitoring*. January. <http://www.tdx.cat/?locale->
- Deng, Z., Huang, M., Wan, N., & Zhang, J. (2023). The Current Development of Structural Health Monitoring for Bridges: A Review. *Buildings*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/buildings13061360>
- Dong, Y., Song, R., & Liu, H. (2010). *Bridges Structural Health monitoring and Deterioration Detection Synthesis of Knowledge and Technology*.
- DVBA. (2007). *Manual para inspecciones rutinarias de puentes y alcantarillas en servicio* (vivienda y servicios públicos Ministerio de Infraestructura (ed.)).
- El Comercio. (2015). *Puente Topará será reconstruido desde diciembre*. El Comercio. <https://elcomercio.pe/peru/ica/puente-topara-sera-reconstruido-diciembre-238855-noticia/?ref=ecr>
- El peruano. (2023). Ley que promueve el Uso de la Inteligencia Artificial en favor del desarrollo económico y social del país (ley nº 31814). In *Publicación oficial el peruano*.
- El Peruano. (2020). Aprueban Normas Técnicas Peruanas sobre materiales

- refractarios en su versión 2020. In *Normas legales de El Peruano* (Issue 5, pp. 10–13).
- Enckell, M. (2011). *Lessons Learned in Structural Health Monitoring of Bridges Using Advanced Sensor Technology*. December. <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?searchId=1&pid=diva2:456855>
- Escudero, J., Segura, L., & Gresia, J. (2022). Evaluation of the seismic vulnerability of the “Moche” road bridge located on the PE1N National highway using the capacity spectrum method. *TECNIA*, 32(December), 147–152. <https://doi.org/https://doi.org/10.21754/tecnica.v32i2.1405> TECNIA
- EU Road Federation. (2022). *Road Network, Road Maintenance and Investment*. European Union Road Federation. <https://erf.be/statistics/>
- European Union Road Federation. (2023). *Road Network 2023*. Statistics. <https://erf.be/statistics/road-network-2023/>
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 303–315. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1928>
- FHWA. (2022). *Specifications for the National Bridge Inventory*. March, 0–354.
- Flores, R. (2020). *Procedimiento de Evaluación de Operatividad para Puentes Incorporando el Modelamiento Numérico porm medio de Prueba de Carga Estática y Dinámica*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Forbes Staff. (2020). *Puente de Chirajara no solo cayó por error de diseño, según Tribunal de Arbitramento*. Forbes Colombia. <https://forbes.co/2020/03/02/actualidad/puente-de-chirajara-no-cayo-por-error-de-diseno-segun-tribunal-de-arbitramento>
- Garita, C. (2016). Enfoques de integración de información para sistemas de monitoreo de salud estructural de puentes. *Revista Tecnología En Marcha*, 29(1), 96. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i1.2542>
- Glisic, B., & Inaudi, D. (2008). *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*. <https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=0dPYmueNAToC&oi=fnd&pg=>

PR7&dq=Fibre+optic+methods+for+structural+health+monitoring.&ots=YaiB8T2
_Vt&sig=ueIMWtGUnB_t8tetURj6bu-4KhE#v=onepage&q&f=true

Gómez, J., Casas, J. R., & Villalba, S. (2021). Strain-monitoring of a concrete tunnel lining with distributed optical fiber sensors. *International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure: Transferring Research into Practice, SHMII, 2021-June*, 879–886.

Government of India Ministry of Railways. (1998). *Indian Railways Bridge Manual*.

Guo, H., Xiao, G., Mrad, N., & Yao, J. (2011). Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Air Platforms. *Sensors*, 11(4), 3687–3705. <https://doi.org/10.3390/s110403687>

Gupta, B. D. (2006). *Fiber optic sensors: principles and applications*. New India Publishing.

https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=3fmkOUvir0MC&oi=fnd&pg=PA1&ots=WxQv4Mzm5T&sig=nHd1RHP3KP_LBsWWyq0zDnCLZ6U&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Han, C., Luo, X., Li, X., Fu, X., Gu, L., & Ouyang, Z. (2021). Study on modern bridge structure health monitoring system based on damage identification. *Tehnicki Vjesnik*, 28(1), 151–159. <https://doi.org/10.17559/TV-20200415104728>

Hawk, H. (2002). Bridge life-cycle cost Analysis, NCHRP Report 483. In (No. 483) *Transportation Research Board*.

Hijar, G., Bonilla, C., Munayco, C. V., Gutierrez, E. L., & Ramos, W. (2016). Fenómeno El Niño y desastres naturales: intervenciones en salud pública para la preparación y respuesta. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 33(2), 300. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2016.332.2205>

Honfi, D., Björnsson, I., Ivanov, O. L., & Leander, J. (2020). Informed successive condition assessments in bridge maintenance. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 10(4), 729–737. <https://doi.org/10.1007/s13349-020-00415-2>

Hutchinson, C. (2021). *Documentary about Tacoma Narrows bridge collapse gets more footage, wider release; here's how to stream it*. The Seattle Times. <https://www.seattletimes.com/seattle-news/documentary-about-tacoma-narrows-bridge-collapse-gets-more-footage-wider-release-heres-how-to-stream-it/>

- INDECI. (2017). *Compendio Estadístico del INDECI 2017*.
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1048401/20180227171454120200726-15599-1ptpifw.pdf>
- ISO. (2006). 14040: Environmental management–life cycle assessment—Principles and framework. *International Organization for Standardization, 2006*.
- Jiang, C., Xiong, W., Wang, Z., Cai, C., & Yang, J. (2023). Transverse Connectivity and Durability Evaluation of Hollow Slab Bridges Using Surface Damage and Neural Networks: Field Test Investigation. *Applied Sciences, 13*(8), 4851. <https://doi.org/10.3390/app13084851>
- Jiménez, C., & Moggiano, N. (2020). Numerical simulation of the 1940 Lima-Peru earthquake and tsunami (Mw 8.0). *Journal of Seismology, 24*(1), 89–99. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09887-2>
- Ke, X., Lin, J. Y., Fu, C., & Wang, Y. (2020). Transport Infrastructure Development and Economic Growth in China: Recent Evidence from Dynamic Panel System-GMM Analysis. *Sustainability, 12*(14), 5618. <https://doi.org/10.3390/su12145618>
- Khedmatgozar Dolati, S. S., Caluk, N., Mehrabi, A., & Khedmatgozar Dolati, S. S. (2021). Non-destructive testing applications for steel bridges. *Applied Sciences (Switzerland), 11*(20), 1–34. <https://doi.org/10.3390/app11209757>
- La Opinion. (2022). *Puentes de Palpa presentan grietas y fisuras limitando el tránsito por un solo carril*. Diario La Opinion. <https://diariolaopinion.pe/2022/02/04/puentes-de-palpa-presentan-grietas-y-fisuras-limitando-el-transito-por-un-solo-carril/>
- La Razón. (2024). *Cusco: Daños en puente restringen paso en carretera a Abancay*. <https://larazon.pe/cusco-danos-en-puente-restringen-paso-en-carretera-a-abancay/>
- La República. (2023). *El puente más largo de Perú: ¿cuánto mide y en dónde se ubica?* La República. <https://larepublica.pe/datos-lr/respuestas/2023/03/12/cuales-el-puente-mas-largo-del-peru-donde-se-encuentra-y-por-que-termina-en-un-huerto-de-frutas-loreto-puente-nanay-evat-226440>
- Lardé, J. (2021). Invertir en infraestructura sostenible , resiliente e inclusiva para la recuperación económica. *Facilitación Comercio y Logística En América Latina y*

- Laurance, W. F., Clements, G. R., Sloan, S., O’Connell, C. S., Mueller, N. D., Goosem, M., Venter, O., Edwards, D. P., Phalan, B., Balmford, A., Van Der Ree, R., & Arrea, I. B. (2014). A global strategy for road building. *Nature*, 513(7517), 229–232. <https://doi.org/10.1038/nature13717>
- León, J., Melchor, C., & Sánchez, V. (2022). Metodos de identificacion modal en puentes atirantados caso de estudio: Puente Rayitos de Sol. *TECNIA*, 32(2), 101–111. <https://doi.org/10.21754/tecnica.v32i2.1437>
- Linea 1 del Metro de Lima. (2019). *¿Qué avenidas principales cruza LÍNEA1?* <https://www.lineauno.pe/preguntas/que-avenidas-principales-cruza-linea1/>
- Liu, C., Gong, Y., Laflamme, S., & Fares, B. (2017). *Measurement Science and Technology Bridge damage detection using spatiotemporal patterns extracted from dense sensor network Manuscript version : Accepted Manuscript Bridge damage detection using spatiotemporal patterns extracted from dense sensor network*. 0–21.
- Macharé, J., & Ortlieb, L. (1993). Registros del fenómeno El Niño en el Perú. *Bulletin de l’Institut Français d’Études Andines*, 1(22), 35–52.
- Menn, C. (1990). *Prestressed Concrete Bridges*.
- Ministero de Ile Infrastrutture e dei Trasporti. (2020). *Linee Guida per la Classificazione e Gestione del Rischio, la Valutazione de lla Sicurezza ed il Monitoraggio dei Ponti*. <https://cslp.mit.gov.it/circolari-e-linee-guida/linee-guida-la-classificazione-e-gestione-del-rischio-la-valutazione-della>
- Ministry Of Construction And Housing And Communal Services Of The Russian Federation. (2016). *Bridges Technical condition monitoring*. <https://meganorm.ru/Data2/1/4293746/4293746920.htm>
- Ministry of Land, Infrastructure, Transport, R. B. and T. (2019). *Road bridge periodic inspection guidelines*.
- Ministry of Transportation of the People’s Republic of China. (2022). *Technical specifications for structural monitoring of highway bridges (JT/T 1037-2022)*. 1,

1–60.

Mishra, M., Lourenço, P. B., & Ramana, G. V. (2022). Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review. *Journal of Building Engineering*, 48(January), 103954. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103954>

Moreno, G. (2018). *Derrumbamiento del Puente Morandi: La inversión en carreteras en Europa*. Statista. <https://es.statista.com/grafico/15083/inversion-en-carreteras-en-europa-de-2007-a-2015/>

Moreu, F., Li, X., Li, S., & Zhang, D. (2018). Technical specifications of structural health monitoring for highway bridges: New chinese structural health monitoring code. *Frontiers in Built Environment*, 4(March), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00010>

Moses, R. S. (2020). *Aashto Guidelines for the Operation of Movable Bridges From Remote Locations*. August.

MTC. (2006). Guía para la inspección de puentes. In *Guía para la inspección de puentes*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

MTC. (2016). *Manual de puentes*.

MTC. (2018). *Manual de Puentes* (RD N° 19-2).

MTC. (2019a). Guía para Inspección de Puentes. In *Directiva N°001-2006-MTC/14*. Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

MTC. (2019b). *MTC: Construcción del Puente Virú iniciará el último trimestre de 2019*. <https://www.gob.pe/institucion/regionalalibertad/noticias/102546-mtc-construccion-del-puente-viru-iniciara-el-ultimo-trimestre-de-2019>

MTC. (2021). *Nuevo puente Maranura se pone en servicio en Cusco*. Plataforma Digital Única Del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/noticias/323569-nuevo-puente-maranura-se-pone-en-servicio-en-cusco>

Mudahemuka, E., Miyagi, M., Shin, R., Kaneko, N., Okada, Y., & Yamamoto, K. (2024). Estimating Bridge Natural Frequencies Based on Modal Analysis of Vehicle–Bridge Synchronized Vibration Data. *Sensors*, 24(4).

<https://doi.org/10.3390/s24041060>

- Muñoz-Barrantes, J., Vargas-Alas, L. G., Vargas-Barrantes, S., Agüero-Barrantes, P., Villalobos-Vega, E., Barrantes-Jiménez, R., & Loria-Salazar, L. G. (2015). *Guía para la determinación de la condición de puentes en Costa Rica mediante inspección visual*. 34.
- Omar, T., & Nehdi, M. L. (2018). Condition assessment of reinforced concrete bridges: Current practice and research challenges. *Infrastructures*, 3(3), 1–23. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3030036>
- Omenzetter, P., Bush, S., & McCarten, P. (2015). *Guidelines for data Collection and Monitoring for asset Management of New Zealand road bridges*. March.
- Palomino, E. (2022). *Evaluación de daños empleando fotogrametría en el puente Sotoqchaca de la Alameda Marques Valdelirios de Ayacucho*. Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.
- Pecho, Y. (2017). Importancia del mantenimiento preventivo de puentes en el Perú. *Revista Institucional Pirhua*, 14.
- Perú Construye. (2018a). *Puente Ñaña: Integradora superestructura vial*. <https://peruconstruye.net/2018/11/16/puente-nana-integradora-superestructura-vial/>
- Perú Construye. (2018b). *Puente Perené: Elemento estructural colgante*. <https://peruconstruye.net/2018/11/16/puente-perene-elemento-estructural-colgante/>
- Perú21. (2019). *Puente colapsa en la Panamericana Sur*. Perú 21. <https://peru21.pe/opinion/puente-colapsa-panamericana-sur-116393-noticia/>
- Perú21. (2021). *Puente peatonal de la Costa Verde: recorrido a la estructura y sus funciones inclusivas que generaron polémica*. <https://peru21.pe/lima/puente-peatonal-de-la-costa-verde-recorrido-a-la-estructura-y-sus-funciones-que-ha-generado-opiniones-divididas-jorge-munoz-nndc-noticia/>
- Pianigiani, G., Povoledo, E., & Perez Peña, R. (2018). *Italy Bridge Was Known to Be in Trouble Long Before Collapse*. New York Times. <https://www.nytimes.com/2018/08/15/world/europe/italy-genoa-bridge->

collapse.html

Prendergast, L. J., Limongelli, M. P., Ademovic, N., Anžlin, A., Gavin, K., & Zanini, M. (2018). Structural health monitoring for performance assessment of bridges under flooding and seismic actions. *Structural Engineering International*, 28(3), 296–307. <https://doi.org/10.1080/10168664.2018.1472534>

Project Management Institute. (2021). Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos y El Estándar para la Dirección de Proyectos. In *Guía del PMBOK*.

PROVIAS. (2022). *Estado de los puentes nacionales*. <https://www.pvn.gob.pe/conservacion/estado-y-ubicacion-de-puentes/>

Provías Nacional. (2022). *Provías Nacional viene ejecutando proyectos en 1440 kilómetros de carreteras nacionales en el 2022*. GOB.PE. <https://www.gob.pe/institucion/pvn/noticias/684070-provias-nacional-viene-ejecutando-proyectos-en-1440-kilometros-de-carreteras-nacionales-en-el-2022>

Provías Nacional. (2023). *Visor de Emergencias Viales*. Proviasnac.Gob.Pe. http://wsgcv.proviasnac.gob.pe/wsgcv_emerenciavial%0A%0A

RCR. (2017). *Sismo: Colapsa puente, dos colegios y afecta medio centenar de viviendas en Andamarca*. Red de Comunicación Regional. <https://www.rcrperu.com/sismo-colapsa-puente-dos-colegios-y-afecta-medio-centenar-de-viviendas-en-andamarca/>

Redacción Diario Correo. (2022). Puno: Puente Colonial se cae a pedazos debido a fuertes lluvias en Lampa. *Diario Correo*. <https://diariocorreo.pe/edicion/puno/lampa-puente-colonial-se-cae-a-pedazos-debido-a-fuertes-lluvias-noticia/>

Redacción EC. (2019). *Moquegua: la magnitud de los daños causados por el desborde del río*. El Comercio. https://elcomercio.pe/peru/moquegua/moquegua-magnitud-danos-causados-desborde-rio-fotos-noticia-nndc-605986-noticia/#google_vignette

Redacción Gestión. (2019). *Sismo en Loreto: Declaran en Estado de emergencia provincia del Alto Amazonas por desastre*. Gestión. <https://gestion.pe/peru/sismo-loreto-ejecutivo-declara-emergencia-provincia-alto-amazonas-desastre-nndc-268232-noticia/>

- Redacción RPP. (2016). *¿Cuánto avanzó el Perú en carreteras desde 1990 al 2016?* RPP. <https://rpp.pe/peru/actualidad/cuanto-avanzo-el-peru-en-carreteras-desde-1990-al-2016-noticia-979260>
- Redacción RPP. (2018). *La caída de puente Solidaridad causó un perjuicio de 5 millones de soles según Contraloría.* RPP. <https://rpp.pe/lima/actualidad/la-caida-de-puente-solidaridad-causo-un-perjuicio-de-5-millones-de-soles-segun-contraloria-noticia-1124514?ref=rpp>
- Redacción RPP. (2022). *Ayacucho: Contraloría realiza inspección preliminar para identificar causas del colapso del puente Kutinachaca.* RPP. <https://rpp.pe/peru/ayacucho/ayacucho-contraloria-realiza-inspeccion-preliminar-para-identificar-causas-del-colapso-del-puente-kutinachaca-noticia-1431053>
- Salas, R. (2018). *Revisión y análisis crítico del diseño estructural del puente peatonal solidaridad ubicado en el malecón Checa, límite entre los distritos de San Juan de Lurigancho y el Agustino (Lima).* (Issue 1) [Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/11733>
- Salcedo, C. (2021). *Evaluación del comportamiento sísmico del Puente Villena construido en 1967 usando un método basado en el desempeño* [Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/22733>
- Salinas, S. L., Fox, S. V., & Gutiérrez, R. M. (2022). "Local scour analysis around a group of pillars with diverse geometries applying 2D modeling - Piura - Peru." *2022 Congreso Internacional de Innovación y Tendencias En Ingeniería (CONIITI)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CONIITI57704.2022.9953642>
- Samayca Ingenieros. (2021). *SAMAYCA INGENIEROS SAC PARTICIPA EN LA EJECUCIÓN DE PUENTES DE GRAN LONGITUD SIN JUNTAS EN LA COSTA PERUANA.* <https://coovias.com/samayca-ingenieros-sac-participa-en-la-ejecucion-de-puentes-de-gran-longitud-sin-juntas-en-la-costa-peruana/>
- Saracho, J. A. (2012). *Evaluación de puentes.* <https://www.facet.unt.edu.ar/iest/wp-content/uploads/sites/22/2019/10/TESIS-EVALUACION-DE-PUENTES.pdf>
- Seguel, J. I. (2019). Bases Metodológicas para Implementación de Sistemas de Instrumentación y Monitoreo de Salud Estructural en Tiempo Real de Puentes

- en Chile. *Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil*, 1–107. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173750>
- SENAMHI. (2020a). Climas del Perú - Mapa de Clasificación Climática Nacional. In *Ministerio del Ambiente* (Vol. 53, Issue 9). <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- SENAMHI. (2020b). *Mapa de clasificación Climática Nacional y Resumen Ejecutivo*. 1–7.
- SENAMHI. (2021). Air temperature and precipitation atlas of Peru. In *Repositorio Institucional* - SENAMHI. <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1339>
- Song, D., Kim, W., Kwon, O. K., & Choi, H. (2022). Vertical and torsional vibrations before the collapse of the Tacoma Narrows Bridge in 1940. *Journal of Fluid Mechanics*, 949, 1–23. <https://doi.org/10.1017/jfm.2022.748>
- Statista Research Department. (2022). *Amount of money invested in road transport infrastructure in Italy from 2004 to 2019*. Statista. <https://www.statista.com/statistics/438623/investment-in-road-transport-infrastructure-in-italy/>
- Sun, L., Shang, Z., Xia, Y., Bhowmick, S., & Nagarajaiah, S. (2020). Review of Bridge Structural Health Monitoring Aided by Big Data and Artificial Intelligence: From Condition Assessment to Damage Detection. *Journal of Structural Engineering*, 146(5). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002535](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002535)
- Svendsen, B. T., Frøseth, G. T., Øiseth, O., & Rønnquist, A. (2022). A data-based structural health monitoring approach for damage detection in steel bridges using experimental data. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 12(1), 101–115. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00530-8>
- The State Council Information Office The People's Republic of China. (2022). *China's transport infrastructure greatly improves over last decade*. The State Council Information Office The People's Republic of China (SCIO CHINA). http://english.scio.gov.cn/pressroom/2022-09/22/content_78432721.htm
- U.S. Department of Transportation. (2021). 50th Anniversary Edition of the National

- Transportation Statistics. In *National Transportation Statistics*.
<https://www.bts.gov/nts/50th>
- UCSP. (2021). *Falta de mantenimiento pone en riesgo integridad de puentes en Arequipa*. Universidad Católica San Pablo. <https://ucsp.edu.pe/falta-mantenimiento-pone-en-riesgo-integridad-puentes-arequipa/>
- UE. (2016). EN 338:2016 - Madera estructural. Clases resistentes. *European Committee for Standardization*, 2(11), 21.
- Valdez, L. M., & Vivanco, C. (2021). Tinkuqchaka: A Suspension Bridge over the Upper Pampas River, Ayacucho, Peru. *Journal of Anthropological Research*, 77(2), 208–233. <https://doi.org/10.1086/713655>
- Vargas, L. A., Carrillo, J., & Viviescas, A. (2018). Structural health monitoring baseline of Gómez Ortiz bridge using ambient vibration tests Línea base para el monitoreo de salud estructural del puente Gómez Ortiz a partir de pruebas de vibración ambiental Structural health monitoring baseline of Gómez Or. *Inge Cuc*, 14(Junio), 52–65.
- Veit-Egerer, R., H., W., & Dreitler, V. (2009). Monitoring based traffic loading model for steel bridges with fatigue threat -Discussion & comparison to Eurocode 1-2. *Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, EVACES'09, October*.
- Vela, P. (2020). *EVALUACIÓN DEL ESTADO DEL PUENTE HUALLAGA KM. 00+310 CARRETERA CENTRAL PE 3N, A EFECTOS DE SU INTERVENCIÓN PREVENTIVA-2020. Tesis Profesional*.
- Velazco, F. (2022). *Gestión de riesgos para la optimización del sistema constructivo de puentes de grandes luces en el Perú, año 2021*. Universidad Ricardo Palma.
- Villani, P. (2016). El puente de Morandi colapsado en el puerto italiano de Génova: dinámica y causas. *26th World Road Congress*, 6(August), 128.
- VIVIENDA. (2019a). E.060 Concreto armado. *Reglamento Nacional de Edificaciones*, 17. <https://www.cip.org.pe/publicaciones/2021/enero/portal/e.060-concreto-armado-sencico.pdf>
- VIVIENDA. (2019b). Norma Técnica E.030 Diseño Sismorresistente. *Reglamento*

Nacional de Edificaciones, 80.
https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/299950/d289856_opt.pdf

VIVIENDA. (2021). Norma Técnica E.010 Madera Del Reglamento Nacional De Edificaciones. *Reglamento Nacional de Edificaciones*.
[https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2079964/NORMA TÉCNICA E.010 MADERA DEL REGLAMENTO NACIONAL DE EDIFICACIONES.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2079964/NORMA_TÉCNICA_E.010_MADERA_DEL_REGLAMENTO_NACIONAL_DE_EDIFICACIONES.pdf)

Viviescas, A., Carrillo, W. J., & Vargas, L. A. (2018). Structural health monitoring baseline of Gómez Ortiz bridge using ambient vibration tests. *INGE CUC*, 14(1), 52–65. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.1.2018.05>

Wenzel, H. (2008). *Health Monitoring of Bridges* (Wiley (ed.)).
<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=pclv2jOWBx8C&oi=fnd&pg=PR5&dq=monitoring+bridges&ots=wmYlaDL7zh&sig=O5Yg6EQwZILn6zsRSh9wet2iV Dk#v=onepage&q&f=true>

Wong, K.-Y., & Ni, Y.-Q. (2009). Modular Architecture of SHM Systems for Cable-Supported Bridges. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, 2089–2106.

Yglesias-González, M., Valdés-Velásquez, A., Hartinger, S. M., Takahashi, K., Salvatierra, G., Velarde, R., Contreras, A., Santa María, H., Romanello, M., Paz-Soldán, V., Bazo, J., & Lescano, A. G. (2023). Reflections on the impact and response to the Peruvian 2017 Coastal El Niño event: Looking to the past to prepare for the future. *PLOS ONE*, 18(9), e0290767.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290767>

Zhang, R., Gao, C., Pan, S., & Shang, R. (2020). Fusion of GNSS and speedometer based on VMD and its application in bridge deformation monitoring. *Sensors (Switzerland)*, 20(3). <https://doi.org/10.3390/s20030694>

Zhang, S., Hou, P., Kang, J., Li, T., Mooraj, S., Ren, Y., Chen, C. H., Hart, A. J., Gerasimidis, S., & Chen, W. (2023). Laser additive manufacturing for infrastructure repair: A case study of a deteriorated steel bridge beam. *Journal of Materials Science and Technology*, 154, 149–158.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2023.01.018>

Zhao, L., Yang, Y., Xiang, Z., Zhang, S., Li, X., Wang, X., Ma, X., Hu, C., Pan, J., Zhou, Y., & Chen, M. (2022). A Novel Low-Cost GNSS Solution for the Real-

Time Deformation Monitoring of Cable Saddle Pushing: A Case Study of Guojiatuo Suspension Bridge. *Remote Sensing*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/rs14205174>

Zhou, G. D., Yi, T. H., Li, W. J., Zhong, J. W., & Zhang, G. H. (2020). Standardization construction and development trend of bridge health monitoring systems in China. *Advances in Bridge Engineering*, 1(1), 1–18. <https://doi.org/10.1186/s43251-020-00016-5>

