

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**SISTEMA DE MONITOREO PARA LA RESPUESTA OPERACIONAL
POST-SISMO DE LA LÍNEA 1 DEL METRO DE LIMA**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

**ELABORADO POR
YHULIANO MELICEE FLORES ESPETIA
ID: 0000-0002-8635-2650**

**ASESOR
MSc. EDWARD SANTA MARÍA DÁVILA
ID: 0000-0001-6789-4983**

LIMA - PERÚ

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

Flores Espetia, Yhuliano Melicee

yflorese@uni.pe

974239143

DEDICATORIA:

*A C Melicio y Auría, mis padres,
a quienes debo todo mi esfuerzo y dedicación,
su cariño y amor permanecerán en cada paso que dé en la vida.*

AGRADECIMIENTOS

La redacción del presente documento representa, para mi, la culminación de un ciclo iniciado desde que decidí prepararme para ingresar a la UNI y ser admitido; ha sido una etapa llena de desafíos, retos en las aulas y arduos años de preparación. No obstante, viéndolo en retrospectiva, no podría haber superado este periodo sin la ayuda y motivación de mis padres, familia, profesores y amigos, no hay palabras suficientes para expresar mi eterna gratitud a quienes, de un modo u otro, han contribuido en este objetivo, y particularmente, en la culminación del presente documento:

Agradezco a la administración de la Concesionaria de la Línea 1, por el acceso a la información y su disposición para responder consultas.

Asi mismo extendiendo mi gratitud al Msc. Ing. Edward Santa María, principal colaborador durante todo este proceso, su dirección, conocimiento y enseñanza permitió el desarrollo de este trabajo.

A mi padre C Melicio y hermano Yhosmel, el recuerdo sus memorias y de tiempos pasados fueron evocados en las noches de desvelo; no sé que haya después de la vida, más allá de la existencia; solo anhelo que, al final de mi camino, volvamos a encontrarnos y estar de nuevo todos juntos.

A mi madre Auria, su cariño y afecto es fuente de mi felicidad y motivación para seguir adelante.

A mis queridas hermanas Melissa y Mireyya, gracias por su constante apoyo, por mostrarme que nada es difícil para quien tiene voluntad.

A mi familia: abuelos, abuelas, tíos, tías, primos, primas, cuñado, sobrinos y sobrinas, he sacrificado parte de nuestro tiempo de familia para redactar este documento, gracias por su paciencia y palabras de aliento.

A mis amigos, compañeros y profesores, por las enseñanzas y experiencias vividas, me hicieron mejor profesional y sobre todo mejor persona.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| Resumen | 3 |
| Abstract..... | 4 |
| Prólogo..... | 5 |
| Lista de cuadros | 6 |
| Lista de figuras | 7 |
| Lista de siglas..... | 10 |
| Glosario de términos | 12 |
| Capítulo I: Introducción..... | 14 |
| 1.1. Antecedentes | 14 |
| 1.2. Descripción del problema de investigación..... | 17 |
| 1.3. Justificación..... | 20 |
| 1.4. Objetivos del estudio | 21 |
| 1.4.1. Objetivo general | 21 |
| 1.4.2. Objetivos específicos..... | 21 |
| Capítulo II: Marco teórico | 23 |
| 2.1. Sistema de monitoreo estructural | 23 |
| 2.2. Sistema de alerta sísmica temprana..... | 26 |
| 2.3. Sistema de alerta sísmica peruano SASPERÚ..... | 28 |
| 2.4. Casos de aplicación de sistemas de monitoreo | 32 |
| 2.4.1. Port Mann Bridge British Columbia – Canadá | 32 |
| 2.4.2. Hong Kong – Shenzhen Western Corridor – China | 35 |
| 2.4.3. EWS Transport for Baden-Württemberg - Alemania | 39 |
| 2.4.4. The Shinkansen Viaduct – Japón | 41 |
| 2.5. Criterios para la estimación del daño..... | 43 |
| 2.5.1. Criterios basados en registros de desplazamiento | 43 |
| 2.5.2. Criterios basados en registros de frecuencia..... | 44 |
| 2.5.3. Criterios basados en registros de velocidad | 45 |
| 2.5.4. Criterios basados en registros de aceleración | 46 |
| 2.5.5. Criterios basados en escalas de intensidad sísmica..... | 47 |
| Capítulo III: Descripción del sistema estructural de la Línea 1 | 50 |
| 3.1. Pasos a nivel..... | 52 |
| 3.2. Viaductos elevados | 53 |
| 3.2.1. Tramo Antiguo..... | 53 |
| 3.2.2. Tramo I..... | 54 |
| 3.2.3. Tramo II..... | 57 |
| 3.3. Estaciones de la Línea 1 | 58 |
| 3.3.1. Tramo Antiguo..... | 58 |
| 3.3.2. Tramo I..... | 59 |

| | |
|--|------------|
| 3.3.3. Tramo II..... | 60 |
| 3.4. Análisis de normativa aplicable | 60 |
| 3.4.1. Especificaciones de resistencia estructural | 62 |
| 3.4.2. Especificaciones de diseño sísmico | 63 |
| 3.4.3. Especificaciones de durabilidad | 65 |
| Capítulo IV: Sistema de alerta sísmica para la Línea 1 del Metro de Lima .. | 66 |
| 4.1. Objetivo del sistema | 66 |
| 4.2. Arquitectura del sistema | 66 |
| 4.3. Sistema de instrumentación | 67 |
| 4.4. Estaciones instrumentadas | 70 |
| 4.5. Protocolo de medición | 71 |
| 4.6. Niveles de respuesta sísmica | 74 |
| 4.6.1. Criterios operacionales..... | 75 |
| 4.6.2. Criterio estructural | 80 |
| 4.7. Protocolo de respuesta sísmica..... | 85 |
| 4.7.1. Respuesta según registros de instrumentación: | 85 |
| 4.7.2. Respuesta según magnitud sísmica:..... | 86 |
| 4.7.3. Niveles de respuesta sísmica: | 86 |
| 4.8. Protocolo de inspección estructural..... | 90 |
| 4.8.1. Inspección básica o rutinaria: | 90 |
| 4.8.2. Inspección detallada o principal:..... | 91 |
| Capítulo V: Resultados de aplicación: Sismo de Chilca M5.5..... | 94 |
| 5.1. Descripción del sismo..... | 94 |
| 5.2. Procesamiento de señales | 95 |
| 5.2.1. Estación Bayóvar (BAY) | 96 |
| 5.2.2. Estación Pirámides del Sol (PIR)..... | 97 |
| 5.2.3. Estación Gamarra (GAM) | 99 |
| 5.2.4. Estación Angamos (ANG) | 100 |
| 5.2.5. Estación Atocongo (ATO)..... | 102 |
| 5.2.6. Estación Parque Industrial (PIN) | 103 |
| 5.3. Análisis de resultados..... | 105 |
| 5.3.1. Reporte de evento sísmico..... | 105 |
| 5.3.2. Mapa de sacudimiento del suelo | 106 |
| 5.3.3. Análisis de espectros de respuesta | 109 |
| 5.3.4. Análisis de fuerzas resultantes | 110 |
| Conclusiones | 114 |
| Recomendaciones | 118 |
| Referencias bibliográficas | 121 |
| Anexos | 130 |

RESUMEN

El potencial daño que puede producirse en la infraestructura luego de un evento sísmico es uno de los principales retos que tienen las infraestructuras catalogadas como esenciales, en particular, aquellas que, por su configuración estructural, antigüedad o extensión presentan complejidades para su evaluación, tal como ocurre con la infraestructura de la Línea 1 del Metro de Lima. El presente documento analiza los conceptos teóricos para el análisis de registros de aceleración que fueron empleados en viaductos de otros países, luego desarrolla la arquitectura del sistema de monitoreo que permita la activación de los protocolos de respuesta sísmica enfocado principalmente en proporcionar información de daño potencial en la infraestructura ferroviaria a partir de los registros de aceleración obtenidos de los sensores implementados en seis estaciones de la Línea 1, finalmente, se analizan los registros de aceleración obtenidos en el sismo Chilca Mw 5.5 que conllevan a concluir principalmente que el sistema implementado es funcional y consistente con los daños reportados, y se propone continuar con los registros para consolidar un sistema robusto y confiable.

ABSTRACT

The potential damage that can occur to the infrastructure after a seismic event is one of the main challenges faced by infrastructures classified as essential, in specific, those that due to their structural configuration, age or extension present complexities for evaluation, as occurs with the infrastructure of the project called "Línea 1 del Metro de Lima" (L1). This document analyzes the theoretical concepts for the analysis of acceleration records that were used in viaducts in other countries, then develops the architecture of the monitoring system that allows the activation of seismic response protocols focused mainly on providing information on potential damage in the railway infrastructure from the acceleration records obtained from the sensors implemented in six stations of L1, finally, the acceleration records obtained in the Chilca Mw5.5 earthquake are analyzed, which lead to the conclusion that the implemented system is functional. and consistent with the damages reported, and it is proposed to continue with the records to consolidate a robust and reliable system.

PRÓLOGO

La presente tesis, titulada “Sistema de Monitoreo para la Respuesta Operacional Post Sismo de la Línea 1 del Metro de Lima”, es el resultado de un esfuerzo académico y profesional dirigido a contribuir con la mejora de la seguridad y la resiliencia de infraestructuras críticas en nuestro país. La Línea 1 del Metro de Lima, siendo una arteria fundamental del transporte público en la capital peruana, requiere sistemas avanzados de monitoreo y respuesta que permitan una evaluación rápida y precisa de su estado tras eventos sísmicos, tan frecuentes en nuestra región.

Este trabajo se enmarca en el contexto de la ingeniería civil y la gestión de riesgos, y tiene como objetivo principal el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo estructural y alerta temprana que pueda activarse inmediatamente después de un sismo. La investigación se basa en el análisis de registros de aceleración obtenidos de sensores instalados en seis estaciones estratégicas de la Línea 1, proporcionando así datos esenciales para la toma de decisiones post-sismo.

Este documento representa no solo un avance para la gestión de riesgos, sino también un compromiso con la ingeniería civil y la seguridad operacional de las infraestructuras. Espero que los resultados y propuestas expuestos en el presente documento contribuyan de manera significativa a la protección y mejora continua de la Línea 1 del Metro de Lima y sirvan como base para futuras investigaciones en el campo de la gestión de riesgos sísmicos.

ASESOR

LISTA DE CUADROS

| | |
|--|-----|
| Tabla N°1: Zonas de activación del sistema SASPERÚ..... | 31 |
| Tabla N°2: Estimación de daño empleando parámetros de desplazamiento..... | 44 |
| Tabla N°3: Estimación de daño empleando parámetros de velocidad..... | 45 |
| Tabla N°4: Estimación de daño empleando parámetros de aceleración. | 46 |
| Tabla N°5: Viaductos elevados en el tramo Antiguo. | 53 |
| Tabla N°6: Viaductos elevados en el tramo I. | 54 |
| Tabla N°7: Normatividad vigente para cada etapa del proyecto..... | 61 |
| Tabla N°8: Comparativa entre especificaciones AASHTO de durabilidad. | 65 |
| Tabla N°9: Especificaciones técnica del acelerómetro..... | 68 |
| Tabla N°10: Ubicación de estaciones instrumentadas. | 71 |
| Tabla N°11: Niveles de respuesta según la aceleración registrada..... | 85 |
| Tabla N°12: Niveles de respuesta según la magnitud del sismo. | 86 |
| Tabla N°13: Actividades a realizar según el nivel de acción. | 86 |
| Tabla N°14: Aceleraciones máximas registradas en el sismo del 12/05/2022.... | 95 |
| Tabla N°15: Nivel de respuesta en las estaciones de Línea 1. | 108 |
| Tabla N°16: Descripción de las escalas de intensidad sísmica. | 131 |
| Tabla N°17: Ficha técnica del acelerómetro en Parque Industrial. | 135 |
| Tabla N°18: Ficha técnica del acelerómetro en Atocongo..... | 136 |
| Tabla N°19: Ficha técnica del acelerómetro en Angamos..... | 137 |
| Tabla N°20: Ficha técnica del acelerómetro en Gamarra..... | 138 |
| Tabla N°21: Ficha técnica del acelerómetro en Pirámides del Sol. | 139 |
| Tabla N°22: Ficha técnica del acelerómetro en Bayóvar..... | 140 |
| Tabla N°23: Nivel de calificación empleada para puentes..... | 141 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura N°1: Analogía del Sistema de Monitoreo Estructural..... | 24 |
| Figura N°2: Mapa conceptual de gestión de infraestructura de puentes | 25 |
| Figura N°3: Implementación de Sistemas de Alerta sísmica temprana | 26 |
| Figura N°4: Esquema del funcionamiento de un Sistema de Alerta Temprana. . | 27 |
| Figura N°5: Red de acelerómetros desplegados por el IGP..... | 29 |
| Figura N°6: Diagramas de entrega y recepción de información. | 31 |
| Figura N°7: Fotografía del Puente Port Mann. | 33 |
| Figura N°8: Instrumentación en la zona atirantada del puente Port Mann..... | 34 |
| Figura N°9: Mapa de intensidad sísmica de un sismo de magnitud Mw4.8..... | 35 |
| Figura N°10: Fotografía del puente Hong Kong - Shenzhen Western Corridor. . | 36 |
| Figura N°11: Esquema del puente Hong Kong - Shenzhen Western Corridor.... | 37 |
| Figura N°12: Sensores desplegados en el caso de estudio | 38 |
| Figura N°13: Diagrama de flujo del sistema de salud estructural | 38 |
| Figura N°14: Monitoreo de los puentes de Baden-Württemberg | 40 |
| Figura N°15: Mapa de daños en la infraestructura. | 41 |
| Figura N°16: Mapas del sistema de Alerta Sísmica. | 41 |
| Figura N°17: Fotografía del viaducto Tohoku Shinkansen, Iwate. | 42 |
| Figura N°18: Disposición de sensores en los viaductos del Shinkansen Line. ... | 42 |
| Figura N°19: Curva de probabilidad de daño. | 43 |
| Figura N°20: Gráfica de evaluación de vibraciones..... | 45 |
| Figura N°21: Correlación entre intensidad sísmica – aceleración del suelo. | 48 |
| Figura N°22: Daño estructural entre diferentes escalas de intensidad sísmica .. | 49 |
| Figura N°23: Esquema del recorrido de la Línea 1..... | 52 |
| Figura N°24: Esquema de paso a nivel en el tramo Antiguo. | 52 |
| Figura N°25: Esquema del viaducto típico del tramo Antiguo..... | 54 |
| Figura N°26: Esquema del viaducto T1 del tramo I..... | 55 |
| Figura N°27: Esquema del viaducto T2 del tramo I..... | 55 |
| Figura N°28: Esquema del viaducto T3 del tramo I..... | 56 |
| Figura N°29: Esquema del viaducto T4 del tramo I..... | 56 |
| Figura N°30: Esquema del viaducto T2 del tramo I..... | 57 |
| Figura N°31: Esquema de la configuración típica del viaducto tramo II..... | 57 |
| Figura N°32: Fotografía del puente de Vía Evitamiento de la Línea 1..... | 58 |
| Figura N°33: Fotografía del puente del río Rímac de la Línea 1..... | 58 |
| Figura N°34: Esquema en corte de la estación a nivel superficial. | 59 |

| | |
|---|-----------|
| Figura N°35: Esquema en corte de la estación Angamos – Tramo I. | 59 |
| Figura N°36: Esquema en corte de la estación Bayóvar tipo viaducto elevado. . | 60 |
| Figura N°37: Esfuerzos admisibles según AASHTO estándar (1973). | 62 |
| Figura N°38: Factores empleados en AASHTO estándar (1973). | 62 |
| Figura N°39: Factores empleados en AASHTO LRFD 2007. | 63 |
| Figura N°40: Espectro de respuesta normativo del estándar AASHTO-1983. | 64 |
| Figura N°41: Espectro de respuesta normativo del estándar AASHTO 2007. | 64 |
| Figura N°42: Recubrimiento normativo del estándar AASHTO-1983. | 65 |
| Figura N°43: Esquema de la arquitectura del Sistema de Monitoreo | 67 |
| <i>Figura N°44: Equipo acelerométrico instalado.</i> | <i>68</i> |
| Figura N°45: Página web del registro de aceleraciones en tiempo casi-real. | 69 |
| Figura N°46: Esquema de la redundancia en el registro de datos. | 70 |
| Figura N°47: Diagrama de flujo del protocolo de alerta. | 72 |
| Figura N°48: Mensaje de alerta sísmica. | 73 |
| Figura N°49: Mensaje de alerta de avería del equipo. | 73 |
| Figura N°50: Gráfica de criterios de área de respuesta. | 74 |
| Figura N°51: Diagrama de flujo para establecer los niveles de respuesta. | 89 |
| Figura N°52: Cuadro descriptivo del evento sísmico. | 94 |
| Figura N°53: Mapa de aceleraciones máximas (%g). | 95 |
| Figura N°54: Registro de aceleraciones de la Estación BAY | 96 |
| Figura N°55: Espectro de Respuesta Sa de la Estación BAY | 96 |
| Figura N°56: Espectro de Respuesta Sa vs Sd de la Estación BAY | 97 |
| Figura N°57: Registro de aceleraciones de la Estación PIR. | 97 |
| Figura N°58: Espectro de Respuesta Sa de la Estación PIR | 98 |
| Figura N°59: Espectro de Respuesta Sa vs Sd de la Estación PIR. | 98 |
| Figura N°60: Registro de aceleraciones de la Estación GAM | 99 |
| Figura N°61: Espectro de Respuesta Sa de la Estación GAM | 99 |
| Figura N°62: Espectro de Respuesta Sa vs Sd de la Estación GAM | 100 |
| Figura N°63: Registro de aceleraciones de la Estación ANG. | 100 |
| Figura N°64: Espectro de Respuesta Sa de la Estación ANG. | 101 |
| Figura N°65: Espectro de Respuesta Sa vs Sd de la Estación ANG. | 101 |
| Figura N°66: Registro de aceleraciones de la Estación ATO | 102 |
| Figura N°67: Espectro de Respuesta Sa de la Estación ATO | 102 |
| Figura N°68: Espectro de Respuesta Sa vs Sd de la Estación ATO | 103 |
| Figura N°69: Registro de aceleraciones de la Estación PIN. | 103 |

| | |
|---|-----|
| Figura N°70: Espectro de Respuesta Sa de la Estación PIN | 104 |
| Figura N°71: Espectro de Respuesta Sa vs Sd de la Estación PIN..... | 104 |
| Figura N°72: Correo de alerta emitido por el sismo de Chilca 12/05/2022. | 105 |
| Figura N°73: Mapa preliminar de sacudimiento del suelo. | 106 |
| Figura N°74: Mapa de sacudimiento del suelo..... | 107 |
| Figura N°75: Espectro de respuesta elástica de pseudo aceleraciones. | 109 |
| Figura N°76: Espectro de respuesta elástica de pseudo velocidades. | 110 |
| Figura N°77: Espectro de respuesta de pseudo desplazamientos. | 110 |
| Figura N°78: Análisis dinámico sobre el tramo V del viaducto de la Línea 1. ... | 111 |
| Figura N°79: Envolvente de momentos flectores M3 y fuerzas cortantes V2. .. | 111 |
| Figura N°80: Envolvente de momentos flectores M2 y fuerzas cortantes V3. .. | 111 |
| Figura N°81: Diagrama momento curvatura del pilar 2.10x1.40m eje X. | 112 |
| Figura N°82: Diagrama momento curvatura del pilar 2.10x1.40m eje Y. | 112 |
| Figura N°83: Capacidad de resistencia a fuerzas cortantes en los pilares. | 113 |
| Figura N°84: Plano en planta acelerómetro PIN. | 135 |
| Figura N°85: Fotografía de acelerómetro PIN. | 135 |
| Figura N°86: Plano en planta acelerómetro ATO. | 136 |
| Figura N°87: Fotografía de acelerómetro ATO..... | 136 |
| Figura N°88: Plano en planta acelerómetro ANG..... | 137 |
| Figura N°89: Fotografía de acelerómetro ANG. | 137 |
| Figura N°90: Plano en planta acelerómetro GAM. | 138 |
| Figura N°91: Fotografía de acelerómetro GAM..... | 138 |
| Figura N°92: Plano en planta acelerómetro PIR. | 139 |
| Figura N°93: Fotografía de acelerómetro PIR. | 139 |
| Figura N°94: Plano en planta acelerómetro BAY. | 140 |
| Figura N°95: Fotografía de acelerómetro BAY..... | 140 |

LISTA DE SIGLAS

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials (siglas en inglés) o, Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes.

AIJ: Architectural Institute of Japan (siglas en inglés) o, Instituto de Arquitectura de Japón.

ASD: Allowable Stress Design (siglas en inglés), es un método de diseño por esfuerzos admisibles.

ATC: Applied Technology Council (siglas en inglés) o, Concilio de Tecnología Aplicada.

CCM: Centro de Control de Mantenimiento de la Línea 1 del Metro de Lima.

CEA: The China Earthquake Administration (siglas en inglés), es la entidad Administración China de Sismos.

CSIS: Escala de Intensidad Sísmica China.

EEW: Early Earthquake Warning (siglas en inglés) o, Sistemas Sísmicos de Alerta Temprana.

EMS: Escala Macrosísmica Europea.

ESC: European Seismological Commission (siglas en inglés) o, Comisión Sismológica Europea.

INDECI: Instituto de Defensa Civil del Perú.

JMA: Japan Meteorological Agency (siglas en inglés) o, Servicio Meteorológico del Gobierno de Japón.

JRA: Japanese Road Association (siglas en inglés) o, Asociación Japonesa de Carreteras.

L1: Abreviatura de Línea 1 del Metro de Lima.

LRDF: Load and Resistance Factor Design (siglas en inglés), es un método de diseño por factores de Carga y Resistencia.

MEMS: Micro-Electro-Mechanical Systems (siglas en inglés), se refiere a la tecnología electromecánica empleada en los sensores acelerométricos.

MMI: Escala de Intensidad de Mercalli Modificada.

MTC: Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Gobierno del Perú.

Mw: Escala sismológica de magnitud de momento (Mw)

NTP: Norma Técnica Peruana, establecen las especificaciones de calidad de productos, procedimientos y servicios.

OSITRAN: Organismo Supervisor de la Inversión en Infraestructura de Transporte de Uso Público.

PCO: Puesto Central Operativo, Área de Mantenimiento de Vías y Obras, Catenarias, Subestaciones, Señalización y Telecomunicaciones de la Línea 1 del Metro de Lima.

PGA: Peak Ground Acceleration (siglas en inglés), es el máximo valor absoluto de la aceleración horizontal producida por las ondas de un evento sísmico.

PGV: Velocidad pico partícula.

PROVIAS NACIONAL: Proyecto Especial de Infraestructura de Transporte Nacional del Gobierno del Perú.

S2HM: Monitoreo de Salud Estructural Sísmica.

SCAP: Sistema Computarizado de Administración de Puentes.

SHM: Sistemas de Monitoreo Estructural.

UrEDAS: Urgent Earthquake Detection and Alarm System (siglas en inglés) o, Sistema Urgente de Detección y Alarma de Sismos.

USGS: United States Geological Survey (siglas en inglés), es el Servicio Geológico de Estados Unidos.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Acelerómetro: Equipo que registra la variación de la velocidad por unidad de tiempo.

Daño: el daño puede definirse como el cambio en la integridad, entre dos estados uno inicial, ideal o sano, y otro modificado, real o afectado (Lui Kuan & Agüero Barrantes, 2017).

Elemento crítico: Elemento estructural que se encuentra afectado antes del evento sísmico (fisuras, grietas, cajoneo, corrosión, deformaciones, etc.) y/o elemento sin redundancia cuya falla implica el colapso parcial o total de la infraestructura del Metro de Línea 1.

Elemento Estructural: Elementos que brindan a la estructura de rigidez y/o estabilidad ante cargas gravitacionales, sísmicas, viento, etc., su deterioro puede causar el colapso parcial o total de la infraestructura de la Línea 1 del Metro de Lima, califican dentro de esta descripción: Pilares, apoyo entre vigas y pilares, y vigas.

Elemento no Estructural: Elementos que no brindan rigidez y/o estabilidad a la estructura, su deterioro no afecta la resistencia de la infraestructura de la Línea 1 del Metro de Lima, califican dentro de esta descripción: parapetos, sistema de sostenimiento de servicios de agua, electricidad, comunicaciones e instrumentación, ventanas, barandas, etc.

Exposición: Se genera por una relación no apropiada con el ambiente, a mayor exposición, mayor vulnerabilidad. Aquí se analizan las unidades sociales expuestas (como la población, la familia y la comunidad), unidades productivas (terrenos, zonas agrícolas, etc.), servicios públicos, infraestructura u otros elementos, que están expuestas a los peligros identificados (CENEPRED, s. f.).

Gal: Unidad de medida de aceleración, $1 \text{ gal} \leftrightarrow 1 \text{ cm/s}^2 \leftrightarrow 0.001 \text{ m/s}^2 \leftrightarrow 0.1\%$ la aceleración de la gravedad.

Integridad: puede definirse como la capacidad de un material, elemento o sistema de mantener sus características originales a lo largo del tiempo, es implícitamente la comparación de dos estados: uno inicial, ideal o sano y otro modificado, real o afectado (Lui Kuan & Agüero Barrantes, 2017).

Intensidad Sísmica: Es la medida cualitativa que describe los efectos que produjo el evento sísmico, toma en cuenta la percepción de las personas, caída de objetos, daños a la infraestructura, entre otros.

Magnitud Sísmica: Es la medida utilizada para cuantificar la energía liberada por el evento sísmico, se caracteriza por ser una medición objetiva.

Ondas P: También conocidas como ondas primarias, ondas de cuerpo o de propagación longitudinal, se propagan con mayor velocidad y sobre cualquier tipo de material: sólido o líquido. Contiene información de la localización y magnitud del sismo.

Ondas S: También conocidas como ondas secundarias, ondas de corte o de propagación transversal, se propagan con menor velocidad que las ondas P y sobre materiales no líquidos. Generan la mayor parte de los daños.

Peligro o amenaza: Probabilidad de que un fenómeno físico, potencialmente dañino, de origen natural o inducido por la acción humana, se presente en un lugar específico con una cierta intensidad y en un periodo de tiempo y frecuencia definidos (CENEPRED, s. f.).

Riesgo: Es la probabilidad de que la población y sus medios de vida sufran daños y pérdidas a consecuencia de su condición de vulnerabilidad y el impacto de un peligro (CENEPRED, s. f.).

Vulnerabilidad: Es la susceptibilidad de la población, la estructura física o las actividades socioeconómicas, de sufrir daños por acción de un peligro o amenaza (CENEPRED, s. f.).

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El inminente peligro sísmico en las costas peruanas hace necesario realizar evaluaciones constantes de las condiciones de vulnerabilidad de las infraestructuras calificadas como esenciales, (e.g. la infraestructura de Línea 1), normativas y códigos vigentes, como la Norma Técnica Peruana NTP E030, AASHTO LRDF Bridge Design Specifications, Eurocode 8-2: y Japanese Road Association (JRA), exigen que el comportamiento estructural ante eventos sísmicos calificados como extremos sea que la estructura continúe en operaciones previa inspección, no obstante, sigue siendo de gran interés para la gestión del funcionamiento, determinar si la estructura puede continuar operando luego de algún evento extraordinario en el más corto plazo, de acuerdo a Lee Y., 2007: “A lo largo de las décadas, los métodos de inspección de condición más utilizados se basan en evaluaciones visuales incrementales subjetivas o técnicas de prueba localizadas [...] que pueden no ser lo suficientemente sensibles como para identificar daños y/o deterioro a lo largo del tiempo”.

A esto debe sumarse que, alrededor del mundo los altos costos de mantenimiento de puentes y la asignación inadecuada de fondos provocan retrasos significativos en las actividades de mantenimiento, por lo que, actualmente se buscan soluciones tecnológicas que reduzcan los requisitos de mano de obra, los diagnósticos erróneos y reduzcan el costo de las intervenciones de mantenimiento para asegurar que tanto puentes nuevos como antiguos reciban un mantenimiento adecuado (Habeenzu et al., 2021).

El desarrollo del Sistema de Gestión de Puentes en el Perú ha tenido un impulso en los últimos años con la implementación del Sistema Computarizado de Administración de Puentes (SCAP), sin embargo, para una mayor efectividad es necesario mantener una base de datos actualizada y alineada a los módulos de comportamiento de las estructuras para preparar planes de mantenimiento a largo plazo (Pecho, 2017), por lo tanto, el problema no es cómo se presenta la información (virtual o no), sino cómo se recopila y alimenta esta base de datos para mantenerla constantemente actualizada.

Una situación similar ocurrió en Japón, de acuerdo a Fujino y Siringoringo (2008) y Fujino et al. (2019) el rápido crecimiento económico entre los años 1955 y 1975

permitió la construcción de alrededor de 650 000 puentes la mayoría ubicada cerca de las costas, es decir, expuesta a una alta concentración de sales clorhidrato y humedad, esta infraestructura masiva es esencial para el crecimiento económico, productividad y bienestar de la población, es así que según Kanda et al. (2021) en el 2003 se implementó Sistemas de Monitoreo Estructural (SHM) como una respuesta por parte del gobierno al deterioro de infraestructuras civiles, no obstante, su utilidad y beneficios no fueron comprendidos sino hasta los sismos de Kobe 1995 y Tohoku 2011 en el que se observa un crecimiento constante impulsado sobre todo por el sector privado, siendo los factores clave para motivar a los propietarios su implementación: (1) Bajo costo inicial, (2) Confiabilidad del sistema, (3) Mantenimiento periódico y, (4) Atención al momento de la emergencia.

Según describe (Koo et al., 2013), los sistemas de monitoreo fueron desarrollados inicialmente para comprender el comportamiento dinámico y sísmico (e.g., Brownjohn et al., 1999; Chang & Im, 2000), luego se fueron implementando para comprender los mecanismos de carga como, por ejemplo, efectos del viento (e.g., Hout et al., 2010), efectos de la temperatura (e.g., Wong K., 2004), tránsito pesado (e.g., Lynch et al., 2006), así como para realizar evaluaciones estructurales (e.g., Staquet et al., 2007, Koo et al., 2013), mientras en paralelo también fue necesario optimizar las capacidades computacionales existentes para la instrumentación, gestión de datos e interpretación (e.g., Li et al., 2006; Hout et al., 2010), con el paso del tiempo se fueron consolidando diversas metodologías basadas en los diferentes requisitos y necesidades: Sistemas Sísmicos de Alerta Temprana (EEW, siglas en ingles), Monitoreo de Salud Estructural (SHM, siglas en ingles) y Sistemas de Salud Estructural Sísmico (S2HM, siglas en inglés).

En el mismo sentido, la recopilación realizada por Limongelli et al. (2019) sobre programas nacionales europeos en Italia, Francia y Grecia sobre Monitoreo de Salud Estructural Sísmica (S2HM), también aquellos realizados en China (Wong, 2007), Japón (Fujino et al., 2019), Norteamérica (Kaya & Ventura (2019)), así como la implementación gubernamental de sistemas sísmicos de Alerta temprana (EEW) reflejado en la cooperación internacional de diez países para el lanzamiento de la plataforma de IP-EEWS (UNESCO, 2021), confirman que es una potente herramienta de soporte para la Gestión de riesgos, y en particular, la

evaluación estructural de infraestructura esencial en regiones propensas a eventos sísmicos, como lo es la Línea 1 del Metro de Lima.

Por otro lado, si bien la principal ventaja de los Sistemas de Monitoreo es la fiabilidad y precisión, no obstante, muchas de las actuales de investigaciones no contribuyen a la implementación del sistema y establecer parámetros de control para los administradores de la infraestructura, sino por el contrario se enfocan en mejorar el rendimiento y sofisticación de los algoritmos de toma de datos cuya finalidad difiere de la necesidad actual de los administradores de la infraestructura (Vardanega et al., 2016). Es decir, si bien se ha trabajado en disminuir las incertidumbres de las evaluaciones asociadas a la subjetividad del consultor (Çelebi, 2019), hace falta mejorar su aplicabilidad para situaciones reales dentro de la gestión de infraestructuras. Por lo tanto, en base a los estudios antes mencionados, se observan cuatro problemas aún en desarrollo dentro del campo de la gestión de puentes y viaductos:

- Urgente necesidad de automatizar procesos para la reducción de costos de mantenimiento e inspección.
- Escaso desarrollo de métodos de detección y predicción de patologías para asegurar la continuidad de las operaciones de infraestructura calificada como esencial.
- Falta de comprensión de la utilidad y beneficios de contar con sistemas de monitoreo estructural a largo plazo.
- Ausencia de parámetros claros en los protocolos de respuesta operativa ante situaciones extraordinarias de emergencia.

El presente documento está orientado a proponer un Sistema de Monitoreo cuyas características permitirán identificar zonas potencialmente afectadas, activar protocolos de acción inmediata, y registrar parámetros sísmicos para incrementar la velocidad y precisión de las inspecciones para la toma de decisiones luego de un evento sísmico, lo que finalmente se traduce en la reducción de tiempo de respuesta y costos asociados a la emergencia.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Para comprender la magnitud de la situación problemática, es necesario remontarse a sismos de gran magnitud ocurridos en ciudades muy pobladas como el sismo de Tohoku, Japón del 2011 cuya magnitud fue de 9.0Mw de acuerdo a Japan Meteorological Agency (JMA), en ese sentido Ochi & Suzuoki (2011) señala que el daño fue tremendo en grado y extensión, solo en la infraestructura de transporte se tuvieron que cerrar autopistas, carreteras nacionales, instalaciones portuarias, aeroportuarias entre otras instalaciones vitales de la costa del Pacífico que interrumpió la recopilación de información, el transporte de suministros, y paralizó las actividad socioeconómica de Japón, se resalta además que inmediatamente después del terremoto todas las líneas ferroviarias dejaron de funcionar, produciéndose una congestión de tráfico a gran escala, alrededor de 100.000 personas quedaron varadas en Tokio. Kanda et al., 2021 resalta que fueron alrededor de 5.15 millones de personas en Tokio tuvieron problemas para retornar a sus viviendas pues no era posible confirmar la seguridad estructural de los edificios donde vivían y varios peatones desbordaron las calles, en el 2013 el Gobierno Metropolitano de Tokio estableció una ordenanza para que los Administradores sean responsables de la confirmar la seguridad en edificios, sin embargo, como es de esperar en una ciudad grande que sufre de un evento sísmico de gran magnitud, muchas estructuras se dañarán al mismo tiempo por lo que habrá una escasez de ingenieros estructurales capaces de verificar la seguridad de estas, una encuesta realizada por Architectural Institute of Japan (AIJ) luego del evento sísmico señala que para completar evaluaciones visuales de daños en edificios de gran altura se requieren de dos a tres semanas, todas estas dificultades sugieren la implementación de un sistema automatizado de monitoreo.

El Perú no es ajeno a este escenario, sus costas occidentales se encuentran en el llamado Cinturón del Pacífico, algunos estudios como el desarrollado por Villegas-Lanza et al. (2016) han identificado hasta 4 Zonas de Máximo Acoplamiento sísmico que podrían dar origen a sismos de gran magnitud, una de estas zonas se presenta frente a las costas de Lima y Callao, donde se podría albergar un sismo de magnitud M8.8 y aceleraciones de hasta 0.50g (Hernando Tavera, 2020).

Por otro lado, muchos colapsos son producto de la falta de una adecuada inspección y mantenimiento para preservar la capacidad de carga de estos, lamentablemente, el número de puentes incrementa a un ritmo mayor que la disponibilidad de los recursos financieros para su inspección y mantenimiento (Scheer, 2010), esta realidad no es contraria en el Perú que posee alrededor de 109 Km de longitud de puentes, y solo en el año 2020 se han ejecutado alrededor de 76.4 millones de soles para el mantenimiento de puentes (Oficina de Planeamiento y Presupuesto PROVÍAS, 2020), es decir, se destina para el mantenimiento un aproximado de 700 soles por Km de puente anualmente, situación preocupante si se considera que solo se han inspeccionado 821 puentes de los 3697 puentes registrados dentro del inventario nacional, es decir, alrededor de un 22% (PROVÍAS Nacional, 2022).

En países en vías de desarrollo como el Perú, existe un auge de ejecución de infraestructura, sin embargo, se observan carencias en el sistema de gestión y mantenimiento de los puentes, en muchos casos estos se limitan a ordenar información en bases de datos y registros, relegando la asistencia a la toma de decisiones a criterios netamente ingenieriles para transformar del esquema actual es necesario desarrollar sistemas inteligentes que brinden datos para la toma de decisiones (Martínez Cañamares, 2016).

En el mismo sentido, las normativas y códigos tales como: Norma Técnica Peruana E030 Diseño Sismorresistente 2018, AASHTO LRDF Bridge Design Specifications 8th edition, Eurocode 8 Design of structures for Earthquake resistance - Part 2: Bridges CYS EN 1998-2:2005-ISS1 y Japanese Road Association JRA Specifications for Highway Bridges for Seismic Design 2017, coinciden en que ante un evento sísmico de gran magnitud la Infraestructura esencial, como la Línea 1 del Metro de Lima, debe permanecer estable y mantenerse en condiciones operativas, reaperturarse a todo tráfico previa inspección, la aplicación de esta filosofía presenta inconvenientes dado que los métodos de evaluación que se emplean actualmente en el Perú (basados en los procedimientos exigidos en la ATC-20) tienen una gran dependencia a una inspección visual que se limita a la observación de deformaciones, daños y fisuras, y puede llevar al evaluador a posturas equivocadas, o recomendar auscultaciones costosas e intrusivas que conllevan mucho tiempo, esto afecta a las partes interesadas (propietarios, concesionarias, funcionarios de la ciudad, equipos de

rescate, edificios aledaños, etc.) que requieren una evaluación rápida y precisa de la condición estructural y desempeño de la infraestructura luego de un evento sísmico (M. Limongelli & Çelebi, 2019).

Por lo tanto, si se analiza el caso de infraestructura esencial como la Línea 1 del Metro de Lima esta debe ser capaz de mantenerse estable y operativa inclusive luego de un evento sísmico extremo, requiriendo para ello de una evaluación estructural rápida y precisa de cada una de las 26 estaciones y los 34 Km infraestructura sobre superficie y elevada que además presentan ciertas características que la hacen vulnerable:

- Cerca del 80% de su infraestructura corresponde a viaductos elevados, estas estructuras se encuentran particularmente expuestas a daño por colisiones vehiculares, excavaciones cercanas, aniegos, entre otros de origen externo.
- Aproximadamente el 30% de su infraestructura ha sido construida entre 1986 a 1990, por lo que, se encuentran potencialmente expuestos a patologías producto de su antigüedad como la carbonatación y corrosión (usuales en estructuras antiguas).

En conclusión, es bastante conocido que en la zona costera de Lima se viene acumulando energía sísmica desde hace más de 275 años (Tavera H., 2022), sin embargo, la infraestructura de la Línea 1 del Metro de Lima que debe mantenerse estable y operativa luego de un evento sísmico presenta las siguientes dificultades:

- 1) Realizar inspecciones visuales luego de un evento sísmico sobre una infraestructura de por si compleja (por sus dimensiones, longitud, tipología estructural), puede llegar a ser costosa, imprecisa y lenta.
- 2) La automatización de los procesos de inspección y mantenimiento de Puentes se encuentra todavía en la frontera del conocimiento, por lo tanto, implementar un sistema de Monitoreo Estructural sin antecedentes de aplicación previa en el Perú puede llegar a ser un desafío.
- 3) Alrededor del 80% de la infraestructura de Línea 1 se encuentra expuesta a daños externos como aniegos, excavaciones, colisiones, entre otros, además que alrededor del 30% se ha construido hace más de 30 años por lo que se encuentran expuestos a patologías como la corrosión y carbonatación, en

ambos casos la capacidad resistente se encontrará reducida previo al evento sísmico.

Por lo tanto, cabe realizar las siguientes preguntas ¿Por qué es pertinente implementar un sistema de monitoreo para la respuesta operacional post sismo en la infraestructura de L1? ¿Cómo puede implementarse un sistema de monitoreo? ¿Qué criterios debería incorporar este sistema? ¿Cuál es el protocolo adecuado de respuesta operacional post sismo? la presente tesis está orientada a desarrollar y aplicar los conocimientos actuales para la implementación de un sistema de monitoreo para la evaluación post sismo de la Infraestructura de la Línea 1 del Metro de Lima.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Según Çelebi M. (2019), muchos de los sistemas de Monitoreo Estructural nacieron justamente de la necesidad de las partes interesadas (propietarios, administradores, ocupantes, funcionarios, equipos de rescate, etc.) de tener una evaluación rápida y precisa del daño en una estructura, dado que necesitaban determinar los siguientes cuatro puntos:

- 1) Seguridad de los usuarios, si hay daño la información se puede utilizar para decidir si es necesario una evacuación.
- 2) Deliberaciones y toma de decisiones para la reocupación después de las evacuaciones.
- 3) Aspectos económicos: Impacto financiero de una reducción de aforo, cierre prolongado, cierre permanente o reemplazo de la estructura.
- 4) Si se diagnostica daño: ¿Qué tan severo es?, ¿Cuál es su impacto en la ocupación, reparación y/o futuras modificaciones?

No obstante lo anterior, usualmente no queda claro cómo la información obtenida a partir del Sistema de monitoreo Estructural puede emplearse para beneficiar a los operadores/administradores del sistema (Webb et al., 2014). Muchos de los proyectos de monitoreo reportados actualmente son simplemente registros de las capacidades y despliegue de nuevos sensores (Vardanega et al., 2016).

Por lo tanto, es importante definir el alcance de implementación, que, de acuerdo con Sivasuriyan et al. (2021) pueden realizarse hasta tres fases de implementación de un sistema de monitoreo estructural: 1) Diagnóstico, 2)

Pronóstico y 3) Extensión de la Vida y mantenimiento predictivo, siendo el alcance generalmente identificar cambios perjudiciales en la unidad de un sistema mecánico y ayudar a mejorar el nivel de seguridad de una estructura (Gharehbaghi et al., 2020).

Por otro lado, las investigaciones de Tavera H. (2020) señalan que el próximo sismo podría tener una magnitud de 8.8Mw, bajo este escenario Villegas-Lanza et al. (2016) estima que el 100% de las viviendas de Lima Metropolitana y Callao estarán sometidas a intensidades mayores a VIII en la escala de Mercalli Modificada, entonces es necesario que la infraestructura de Línea 1 (catalogada como esencial) tenga un plan de respuesta ante la emergencia, dado que las pérdidas económicas podrían ser superiores a la recaudación por el servicio de transporte, que asciende a 237 millones de soles anuales (OSITRAN, 2021), es decir, alrededor de 600 mil soles diarios, además de los costos asociados por el ahorro de tiempos de viaje, reducción del tráfico entre otros beneficios indirectos que se perderían como consecuencia de una inesperada detención del servicio.

Finalmente, el presente documento se enfoca en el desarrollo de un Sistema de monitoreo que permita realizar una evaluación estructural preliminar post sismo lo suficientemente precisa y en tiempo casi real, considerando umbrales de aceleración obtenidos del estado del arte de infraestructura similar, para que se puedan activar los protocolos de emergencia y acciones adecuadas en uno de los principales medios de transporte masivo, como la Línea 1 del Metro de Lima. Si bien se concluye que los resultados son consistentes, se recomienda profundizar en un análisis más refinado para establecer umbrales más realistas con la infraestructura existente y las condiciones de sitio

1.4. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar una propuesta de Sistema de Monitoreo semiautomatizado mediante acelerómetros para la activación de protocolos operacionales post sismo de la infraestructura de Línea 1 del Metro de Lima.

1.4.2. Objetivos específicos

- Exponer los avances disponibles en el Monitoreo Estructural para la mejora de la Gestión de la infraestructura de la Línea 1 del Metro de Lima.

- Explorar los métodos de detección de anomalías estructurales que podrían implementarse con el análisis de la información acelerométrica.
- Proponer umbrales de alerta, actividades de inspección, procedimientos y protocolos a realizar luego de un evento sísmico.
- Verificar la efectividad del protocolo implementado en puntos estratégicos de la infraestructura de la Línea 1 del Metro de Lima.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. SISTEMA DE MONITOREO ESTRUCTURAL

Un Sistema de Monitoreo Estructural puede definirse, según Derriso et al. (2016), como un método automatizado para detectar cambios en la integridad de sistemas mecánicos cuyo objetivo es proveer una evaluación automatizada en tiempo real de la capacidad de una estructura para cumplir con su propósito de diseño. El objetivo del monitoreo puede ser múltiple: puede dar en cada momento de la vida útil de una estructura, un diagnóstico del estado de los materiales constituyentes, sus componentes, o del sistema global conformado por los mismos como un todo, involucra la integración de sensores, materiales transmisión de información, capacidad computacional, y tecnología de materiales Balageas et al. (2006).

La implementación de un Sistema de Monitoreo Estructural, en complemento de Inspección Visual, queda enmarcada dentro de las estrategias de la Gestión de la Infraestructura de Puentes para determinar el estado de conservación de un puente, dependiendo del nivel de detección de daños puede proveer de información básica o detallada para comparar, evaluar y/o predecir daños tomando como base modelos estructurales, códigos y criterios ingenieriles (Yi Cheng & Aguero Barrantes, 2017).

Por lo tanto, para detectar los cambios en la integridad estructural o daño se emplean: (1) Sensores que extraen datos que son almacenados en una (2) Unidad de Procesamiento para ser analizados por un (3) Sistema de Interpretación de Información. Tal como se muestra en la Figura N°1, El funcionamiento de un sistema de monitoreo puede equipararse al sistema nervioso del cuerpo humano: los nervios actúan como sensores que transmiten diferentes señales al cerebro el cual procesa e interpreta la necesidad que presenta el cuerpo y las acciones que debe tomarse (Speckmann & Henrich, 2004).

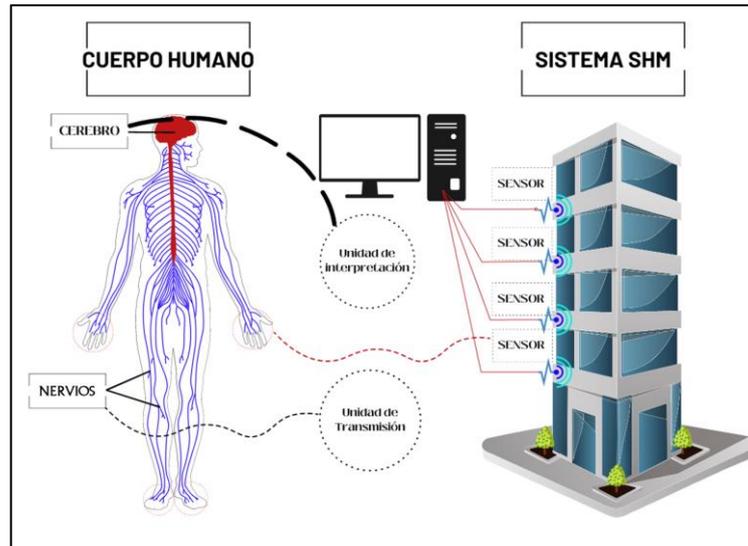


Figura N°1: Analogía del Sistema de Monitoreo Estructural con el cuerpo humano. Adaptado de: Gharehbaghi et al. (2021)

Actualmente, es bastante aceptada la definición de los niveles de detección en el campo del monitoreo Estructural propuesto por Rytter (1993), el mismo que incorpora Yi Cheng & Agüero Barrantes (2017) para la gestión de puentes (véase Figura N°2), existen hasta cuatro niveles:

- Nivel 1.- Detección: El método detecta la existencia de daños a escala global, ¿Se ha dañado la estructura?
- Nivel 2.- Localización: El método determina la ubicación del daño, ¿En qué área se encuentra el daño?
- Nivel 3.- Cuantificación: El método determina la severidad del daño, ¿Cuál es la severidad del daño?
- Nivel 4.- Predicción: El método estima la vida remanente de la estructura, ¿Cuál sería la vida útil remanente de la estructura? O ¿Cuál sería el desempeño ante un determinado evento?

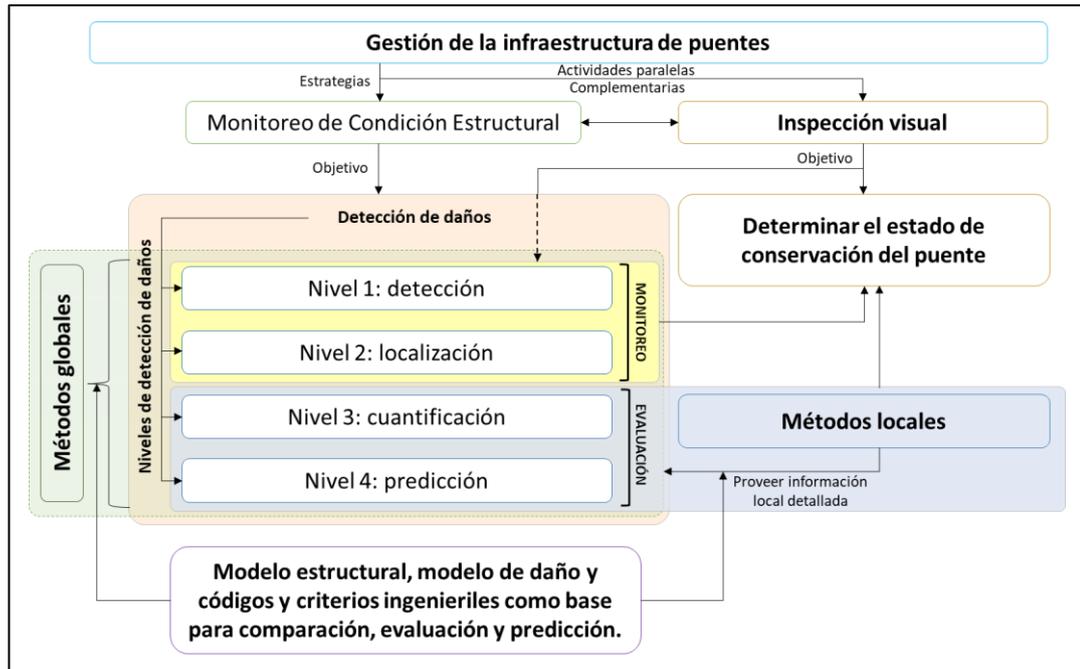


Figura N°2: Mapa conceptual de gestión de infraestructura de puentes empleando el Monitoreo de Condición Estructural. Adaptado de: Yi Cheng & Aguero Barrantes (2017)

Los dos primeros niveles pueden definirse como diagnóstico del daño, dado que el nivel 1 requiere monitorear las propiedades estructurales y alertar de posibles daños en la infraestructura, en complemento, el nivel 2 requiere determinar la ubicación y posición, a diferencia de estos niveles el nivel 3 puede requerir de un modelado numérico dado que se evalúan parámetros del daño, derivando de este análisis el nivel 4 que requiere reconocer la mecánica de falla, analizar la fatiga o evaluar el diseño estructural (Gharehbaghi et al., 2021).

Como puede observarse, cada etapa conlleva una complejidad mayor a la anterior, siendo las dos primeras etapas las que se encuentran más estudiadas, en cambio la última etapa presenta un número reducido de publicaciones dado que es un proceso más complejo, no obstante lo anterior, muchos investigadores concluyen que la evaluación de la severidad del daño (etapa de pronóstico) es información necesaria para tomar decisiones adecuadas sobre la seguridad de la estructura y prevenir fallas catastróficas (Gharehbaghi et al., 2021).

2.2. SISTEMA DE ALERTA SÍSMICA TEMPRANA

El desarrollo de sistemas de alerta temprana produjo la evolución de metodologías modernas de prevención y seguridad ante desastres sísmicos, de acuerdo con Nakamura & Saita (2007), los primeros conceptos fueron concebidos por el Dr. Cooper en 1868 como “un simple sistema que ante ondas sísmicas capaces de generar daños pueda emitir una alarma hacia la ciudad casi instantáneamente”.

No obstante, esta idea no fue implementada sino hasta 1991 con la instalación del primer Sistema de Alerta Sísmica (SAS) en Ciudad de México y la puesta en servicio en 1992 del UREDAS (sic, por las siglas Urgent Earthquake Detection and Alarm System) en la Línea Tokaido Shinkansen – Japón.

Es a partir de estos esfuerzos que ha implementado estos sistemas en diferentes regiones alrededor del mundo, de acuerdo Berkeley Seismology Lab (2014) (véase Figura N°3) actualmente México, Japón, Corea del Sur y Taiwán proporcionan alertas públicas, en tanto, Rumania, Turquía y Estados Unidos brindan alertas limitadas a ciertos usuarios, en cambio en Chile, China, Costa Rica, El Salvador, Israel, Italia, Nicaragua y Suiza vienen implementando este sistema.

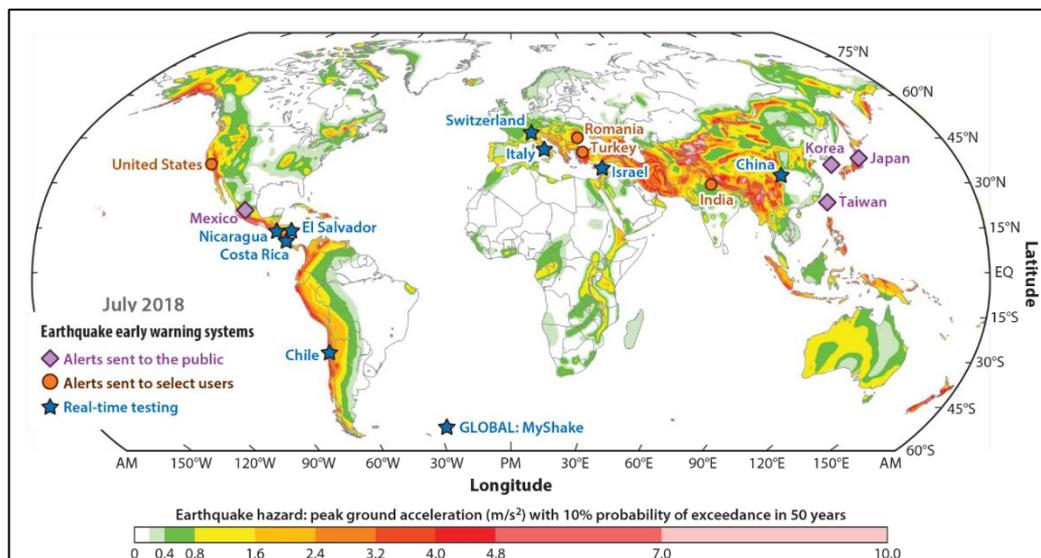


Figura N°3: Implementación de Sistemas de Alerta sísmica temprana alrededor del mundo se observa en escala de colores el peligro sísmico.

Fuente: Berkeley Seismology Lab (2014).

El sistema se fundamenta en que durante un evento sísmico, se producen varios tipos de ondas, entre ellas las ondas P (también conocidas como primarias o

longitudinales) que viajan aproximadamente al doble de velocidad que las ondas tipo S (secundarias o de corte) cuya energía es mucho más destructiva, por lo tanto, tal como puede observarse en la Figura N°4, el sistema se desarrolla en tres etapas: 1) Los sensores detectan las ondas tipo P y transmiten información hacia un centro de alerta sísmica, 2) Esta información es procesada para caracterizar la ubicación, magnitud e intensidad, 3) Se remite un mensaje con las características para que se tomen las acciones prevención y protección que se requieran.

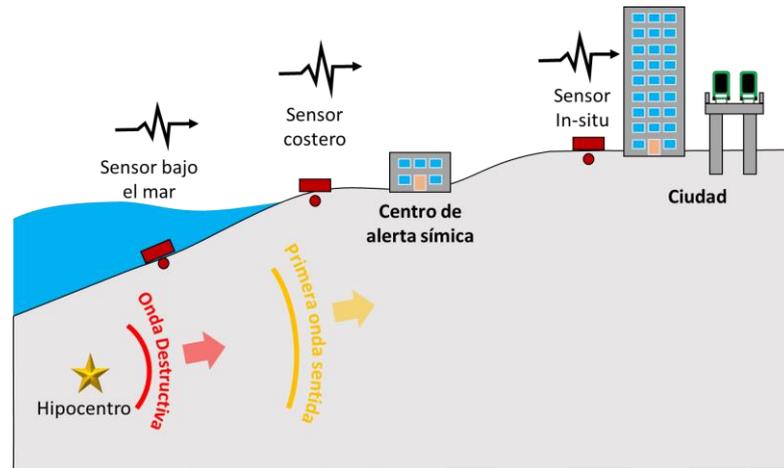


Figura N°4: Esquema del funcionamiento de un Sistema de Alerta Temprana.
Adaptado de: Burkett et al. (2017).

De acuerdo con Minson et al., 2021, los sistemas de Alerta Sísmica Temprana se encuentran divididos principalmente en:

- 1) Metodologías basadas en parámetros de fuente: Los sensores se ubican cerca del área epicentral, que posteriormente, se usan para advertir sobre posibles áreas dañadas lejos del epicentro, estudios recientes señalan que existen dificultades para proporcionar alerta temprana para niveles de movimiento especialmente fuertes.
- 2) Metodologías basadas en parámetros in situ: Es decir, se ubican sensores cerca de los objetos a ser alertados, cuya principal limitación es la cantidad de advertencias dado que activan alertas en zonas específicas por lo que deben colocarse estratégicamente para cubrir espacios largos como una vía férrea.

Así mismo, para Hilbring et al., 2014 es importante definir los requisitos del sistema, en este caso establece tres sistemas que tienen diferentes metodologías de trabajo que reflejan los principales requisitos que puede tener un sistema de alerta temprana aplicado en una línea de transporte:

- 1) Alerta sísmica temprana: Definida por la principal tarea de identificar rápidamente las ondas P para la estimación del riesgo para la operación del tren.
- 2) Monitoreo de Salud Estructural: Se compilan los mapas de aceleraciones y se estiman los daños para la infraestructura ferroviaria.
- 3) Monitoreo Permanente de la Infraestructura: Se usan sensores permanentes para monitorear los elementos de la infraestructura.

En el mismo sentido, W. H. K. Lee & Espinosa-Aranda (2003) señala que estos sistemas, dependiendo de las condiciones geológicas locales, son capaces de proveer valiosos segundos antes de un movimiento telúrico fuerte, este breve tiempo debe emplearse para:

- 1) Minimizar el daño a la propiedad y la pérdida de vidas humanas en áreas metropolitanas y,
- 2) Ayudar a la respuesta y recuperación, adicionalmente, en el caso de vías de transporte.

En ese sentido, (Minson et al., 2021) señala que el principal beneficio de la aplicación de un sistema de alerta temprana no es evitar el descarrilamiento en sí mismo (el tiempo no es suficientemente significativo para reducir la velocidad, inclusive si el tren estuviese detenido podría volcarse durante un evento sísmico), sino que es la reducción de la velocidad dado que podrían encontrar daños en la vía.

2.3. SISTEMA DE ALERTA SÍSMICA PERUANO SASPERÚ

El SASPERÚ, es un sistema de alerta Sísmica temprana o EEW (siglas en inglés), que se encuentra en proceso de implementación, cuyo objetivo es monitorear la actividad sísmica que ocurre frente a la costa peruana y emitir un mensaje de alerta mediante una red de acelerómetros desplegados por el IGP (véase Figura N°5), para ello establece cuatro componentes:

- 1) Conocimiento del peligro por sismo: Estudios sísmicos, recurrencia, zonas de acoplamiento, generación de escenarios teóricos y vulnerabilidad de la población.
- 2) Monitoreo y alerta: Monitoreo permanente de la ocurrencia de sismos mediante una red de sensores para identificar y dar alertas oportunas a la población.

- 3) Difusión y comunicación: Emitir advertencias a autoridades y población sobre la proximidad de un peligro.
- 4) Capacidad de respuesta: Realizar actividades de preparación para fortalecer la capacidad de respuesta de la población y autoridades.



Figura N°5: Red de acelerómetros desplegados por el IGP.
Fuente: Norabuena y Tavera (2017)

De acuerdo con el protocolo operativo del sistema de alerta sísmica peruano (Norabuena Ortiz et al., 2020), este sistema se compone de dos subsistemas:

- Subsistema de Monitoreo y Alerta del Peligro ante Sismo: Mediante el cual el Instituto Geofísico del Perú (IGP) realiza las siguientes actividades:
 - Optimización del catálogo sísmico e intensidades nacional
 - Monitoreo de los Instrumentos de información para la generación de la alarma por sismo.
 - Monitoreo, procesamiento e identificación de actividad sísmica de magnitud mayor o igual a 6Mw.

- Generación de información en el menor tiempo posible para alertar a la población y autoridades.
- Subsistema de difusión y Comunicación de Alerta Temprana: Empleado por el Instituto de Defensa Civil (INDECI) para la difusión y comunicación de alertas y alarmas a nivel nacional para un determinado ámbito geográfico

El procedimiento operativo para la emisión de alarmas ante sismos críticos es la siguiente:

1. Detección de sismo crítico:
 - a. Registro permanente de las ondas sísmicas mediante la Red Sísmica Inteligente (RSI).
 - b. Detectar ondas sísmicas críticas (sismos de magnitud igual o superior a 6Ms).
 - c. Transmitir los datos de la onda hacia los Nodos Regionales y Centro Sismológico Nacional (IGP)
 - d. Responsable IGP.
 - e. Producto: Parámetros sísmicos en tiempo real.
2. Generación de formato de mensaje estándar (CAP)
 - a. Recepcionar mensaje en los Nodos Regionales y/o Centro Sismológico Nacional (IGP).
 - b. Procesar datos y elaborar formato de mensaje estándar.
 - c. Transmitir formato de mensaje estándar hacia INDECI, este mensaje tiene los siguientes datos: (i) ID del Evento. (ii) Fecha Local. (iii) Hora Local. (iv) Magnitud. (v) Latitud. (vi) Longitud.
 - d. Responsables de la Red Sísmica Inteligente (RSI) o Nodo Regional IGP.
 - e. Producto: Formato de mensaje estándar
3. Generación de orden de Activación
 - a. Recibir y validar Mensaje Estándar.
 - b. Identificar zonas de activación de las alarmas sísmicas (véase el radio de activación en la Tabla N°1).
 - c. Generar orden para la activación de las sirenas electrónicas.
 - d. Responsable: INDECI.
 - e. Producto: Orden de activación de sirenas.

4. Activación de sirenas electrónicas
 - a. Recibir orden.
 - b. Comunicar y difundir alarmas sísmicas.
 - c. Responsable: INDECI.
 - d. Producto: Alerta sísmica.

Tabla N°1: Zonas de activación del sistema SASPERÚ.
Fuente: (Norabuena Ortiz et al., 2020)

| Magnitud del Sismo crítico (M) | Radio de activación (Km) |
|--------------------------------|--------------------------|
| 6.0 | 60.00 |
| 6.5 | 75.00 |
| 7.0 | 100.00 |
| 7.5 | 130.00 |
| 8.0 | 175.00 |
| 8.5 | 230.00 |

Tal como se puede observar en la Figura N°6, este sistema está dedicado íntegramente para la difusión del mensaje de alerta sísmica hacia la población, no obstante, es también información valiosa para la gestión de desastres en infraestructuras esenciales según la clasificación de importancia de la NTP E030, tal como lo es la Línea 1 del Metro de Lima.

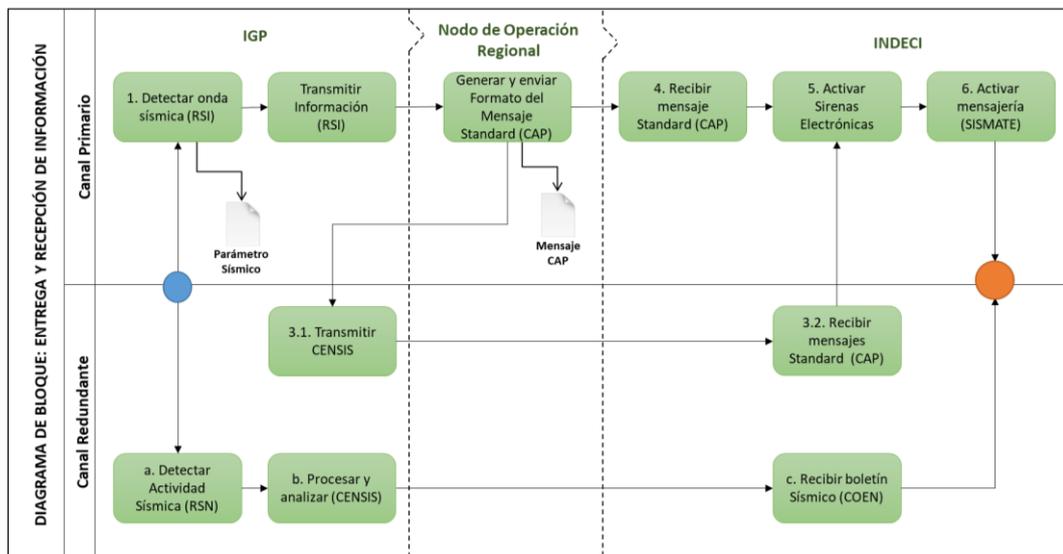


Figura N°6: Diagramas de entrega y recepción de información.
Adaptado de: Norabuena Ortiz et al. (2020).

2.4. CASOS DE APLICACIÓN DE SISTEMAS DE MONITOREO

El sistema de monitoreo estructural de puentes es un concepto relativamente nuevo que se encuentra en desarrollo, algunas infraestructuras que han instalado este sistema son los siguientes:

- Port Mann Bridge en British Columbia – Canadá, caso descrito por Kaya & Ventura (2019) y, Kaya et al. (2017).
- Baden-Württemberg Transport System – Alemania, descrito por (Hilbring et al., 2014).
- Hong Kong – Shenzhen Western Corridor – China, descrito por Wong (2007).
- Tohoku Shinkansen line – Japón, descrito por Nakamura (2017) y, Yamamoto & Tomori (2013).

A continuación, se presenta una breve reseña de las publicaciones anteriormente mencionadas:

2.4.1. Port Mann Bridge British Columbia – Canadá

El puente Port Mann tiene una longitud total de 2020 metros y un ancho de 65 metros, cruza el río Fraser y conecta las ciudades de Surrey y Coquitlam en British Columbia, Canadá. Se construyó en 2012, está compuesto de 3 sectores: un atirantado de 850m y dos viaductos de acceso de 190m cada uno, tal como puede observarse en la Figura N°7.

- El sector atirantado tiene dos tableros de paneles de concreto armado prefabricado sobre vigas acero que se encuentran separadas y se conectan solo a través de puntales, y se sostienen mediante 288 cables instalados a dos pilones o torres.
- De otro lado, los viaductos están compuestos por vigas cajón de concreto armado que se apoyan sobre pilares de concreto en juchos de los cuales se han instalado amortiguadores viscosos para prevenir un excesivo movimiento longitudinal.



Figura N°7: Fotografía del Puente Port Mann.
Fuente: (Google., s. f.-h)

El objetivo del monitoreo fueron los siguientes tres (3):

- 1) Proporcionar un sistema de respuesta estructural sísmica en tiempo real para permitir un despliegue rápido e inspecciones priorizadas de los puentes y túneles del Ministerio de Transportes e Infraestructura (MOTI, siglas en inglés).
- 2) Desarrollar e implementar un programa de monitoreo de la salud estructural para dirigir la necesidad de operación rentable de estructuras en British Columbia.
- 3) Establecer una plataforma de trabajo en tiempo real que pueda integrar muchos aspectos de la sismicidad en Columbia Británica.

Tal como se puede observar en la Figura N°8, para el cumplimiento de estos objetivos se han desplegado, en el sector atirantado, alrededor de 34 acelerómetros, 12 transductores de desplazamiento, y dos estaciones climáticas dispuestas.

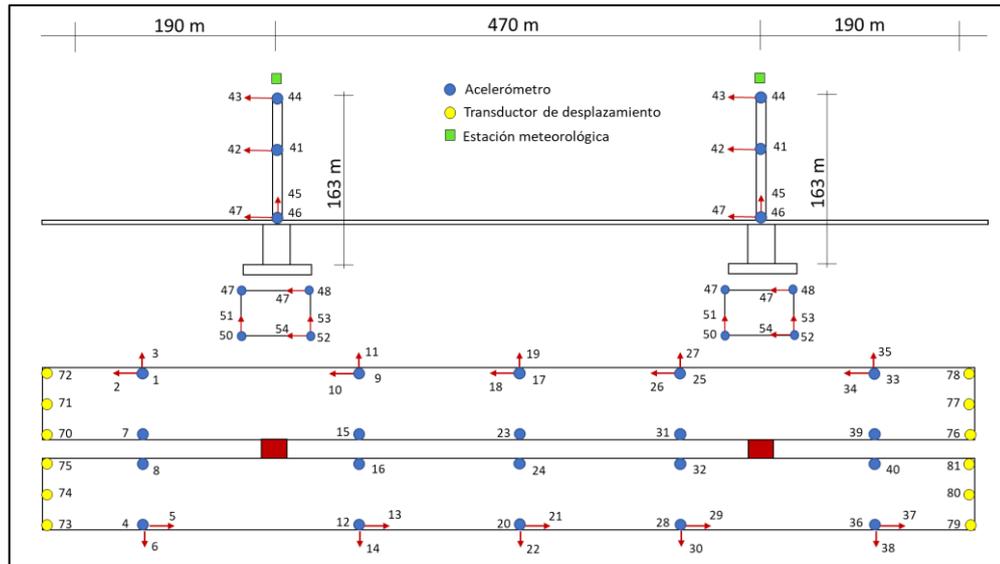


Figura N°8: Instrumentación en la zona atirantada del puente Port Mann.

Se observa arriba vista frontal: torres, tablero y cimentación. Se observa abajo vista en planta: solamente tablero. Adaptado de: Kaya et al. (2017).

El sistema puede activarse por impactos, colisiones vehiculares o de barcos, vientos fuertes o una evaluación estructural programada, en el caso específico de un evento sísmico el sistema se activa siempre que se cumplan los siguientes tres criterios:

- El epicentro se encuentra a menos de 200Km de la estación acelerométrica (IA) más cercana.
- La magnitud del sismo es mayor de 3.
- Se activa al menos una estación IA.

Luego de registrar la información de los sensores, analiza y genera un reporte de estructural en un promedio de 10 minutos, y envía una notificación inmediata por correo a una lista predefinida de suscriptores como: Ingenieros de inspección de puentes, gerentes del Ministerio de Transportes e Infraestructura con un informe que incluye lo siguiente:

- 1) Parámetros característicos del terremoto (ubicación, magnitud, profundidad, etc.).
- 2) Área afectada por el sismo en un mapa de intensidad sísmica a nivel urbana y regional, con la capa de infraestructuras importantes superpuestas.
- 3) Valores de PGA esperados en la ubicación de cada estructura y su comparación con varios umbrales predefinidos de riesgo sísmico.

- 4) Lista de estaciones acelerométricas que han sido activadas por el evento sísmico y sus respuestas máximas: desplazamientos, velocidades, aceleraciones (los datos sísmicos se analizan automáticamente y los resultados también se incluyen en este informe).
- 5) Recomendaciones de acciones a tomar.

Estos mapas permiten a los servicios de emergencia y personal de mantenimiento evaluar rápidamente la intensidad de sísmica en el área urbana y ubicar la infraestructura crítica, logrando con ello priorizar y maximizar el uso de los recursos disponibles.

Es importante mencionar que estos mapas y reportes se publican en una página web, con capas superpuestas de puentes, escuelas, edificios, etc., para que puedan ser visualizados por organizaciones e instituciones públicas y privadas, para que se activen protocolos de respuesta y rescate, así como ejercicios de preparación y planificación de desastres (Véase la Figura N°9).

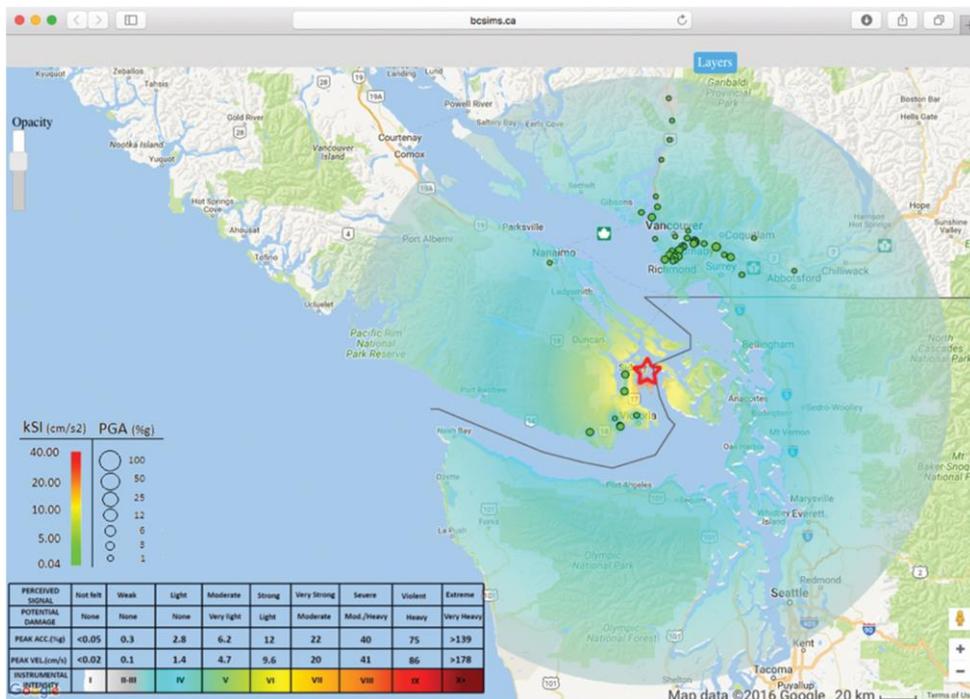


Figura N°9: Mapa de intensidad sísmica de un sismo de magnitud Mw4.8
 obsérvese que los acelerómetros registraron hasta 0.04g (< 39 gals).

Fuente: Kaya et al. (2017).

2.4.2. Hong Kong – Shenzhen Western Corridor – China

El departamento de carreteras de Hong Kong desarrolló e implementó un sistema conceptual de Monitoreo Estructural Integrado en seis (6) puentes, uno de ellos

fue el puente Hong Kong - Shenzhen Western Corridor construido en 2007, cruza la bahía Deep Bay y une las ciudades de Shenzhen y Hong Kong, tiene una longitud total de 5500 m y un ancho de 37.60 metros (véase Figura N°10 y Figura N°11), su sistema estructural se compone de dos sectores:

- El sector atirantado tiene una longitud total de 458m, con un tramo principal de 210m, el tablero es una viga cajón de acero con dos bordes en voladizo de 4.1 metros de peralte y 38.6 de ancho, los cables que soportan la infraestructura se anclan al centro del tablero para mejorar la accesibilidad de mantenimiento, protección contra corrosión y estética.
- De otro lado, los viaductos están compuesto por vigas cajón de concreto armado preesforzado, que se apoyan sobre pilares en paños de 70m típicamente.



Figura N°10: Fotografía del puente Hong Kong - Shenzhen Western Corridor.
Fuente: Google. (s.f.-c) (2022).

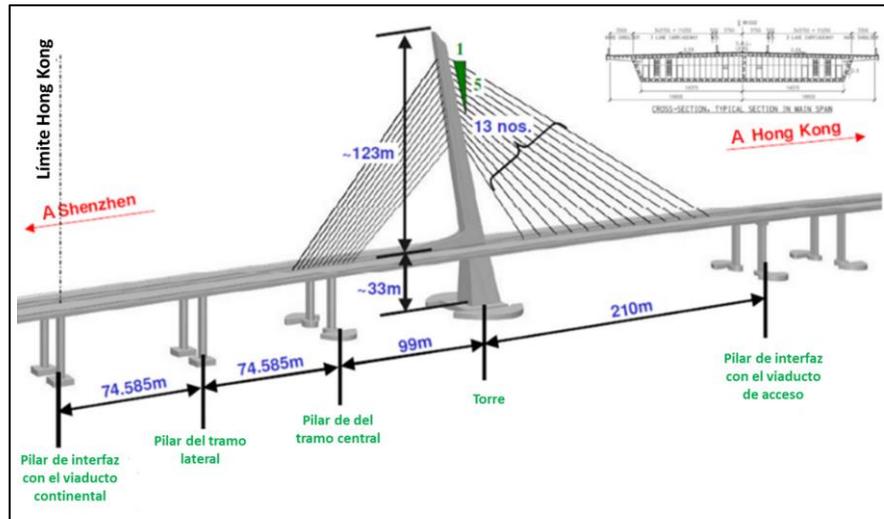


Figura N°11: Esquema del puente Hong Kong - Shenzhen Western Corridor.
Adaptado de: Kong et al. (2006)

Los objetivos por los procesos de monitoreo y evaluación son:

- 1) Proceso de Monitoreo Estructural
 - a. Monitorear las respuestas del puente, las cargas ambientales y aplicadas, al correlacionar los resultados medidos y derivados directamente con los criterios de monitoreo y diseño del puente.
 - b. Actualizar y calibrar modelos numéricos y estadísticos para futuros trabajos de monitoreo predictivo.
 - c. Actualizar la base de datos sin procesar para la posterior extracción de datos y análisis de correlación.
- 2) Proceso de Evaluación de Salud Estructural
 - a. Predecir las respuestas del puente en ubicaciones clave y/o componentes con o sin sistemas sensoriales en base a los modelos numéricos y estadísticos actualizados y/o calibrados.
 - b. Predecir los efectos potenciales del daño local y/o la inestabilidad en los componentes del puente bajo cargas extremas derivadas de los datos medidos

Para ello se desplegaron cuatro (4) grupos de sensores (véase Figura N°12):

- a. Sensores de estado y efectos ambientales (anemómetros, sensores de temperatura, celdas de corrosión, higrómetros, pluviómetros, etc.).
- b. Sensores de monitoreo de cargas de tráfico (estacionales dinámicas de peso en movimiento, cámaras de video digitales y medidores de tensión, etc.).

- c. Sensores de características del puente (acelerómetros, estaciones de nivel, medidores de tensión).
- d. Sensores de Monitoreo de respuesta de puente (galgas extensiométricas, transductores de desplazamiento)

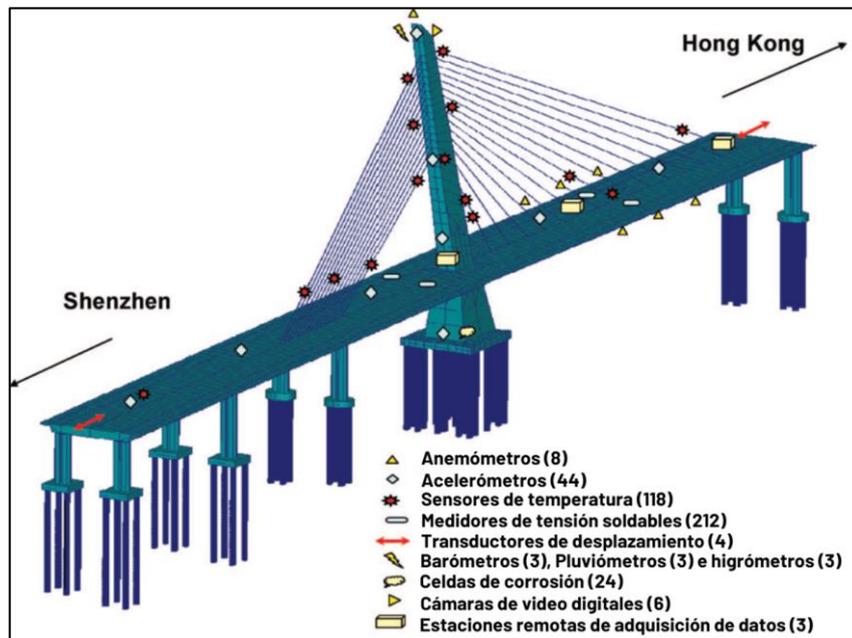


Figura N°12: Sensores desplegados en el caso de estudio puente Hong Kong – Shenzhen Western Corridor. Adaptado de: Wong (2007).

Para conseguir los requerimientos funcionales y operacionales, la arquitectura del sistema de monitoreo se divide en seis módulos integrados (véase *Figura N°13*):

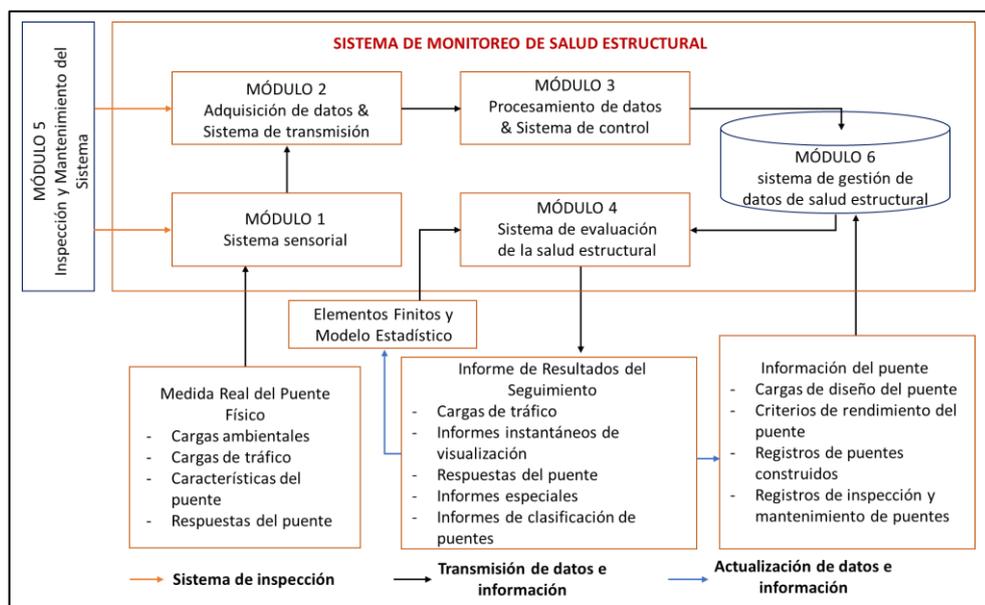


Figura N°13: Diagrama de flujo del sistema de salud estructural de los puentes de Hong Kong. Adaptado de: Wong, 2007.

El sistema es operado bajo dos procesos:

- Proceso de monitoreo de salud estructural: referido al monitoreo continuo del desempeño del puente realizando comparativas entre los análisis estadísticos y numéricos y datos de diseño. Este proceso está compuesto por el módulo del sistema de sensores, adquisición y transmisión de datos, así como, procesamiento y control de datos todos ellos deben operar en tiempo real.
- Proceso de evaluación de salud estructural: también conocido como proceso de condición, se refiere al diagnóstico de la integridad del sistema estructural después de la ocurrencia de un evento extremo y pronóstico de la vida residual del puente, para ello se compone del módulo de los sistemas de evaluación de salud estructural y gestión de datos de salud estructural, ambos pueden operar con desfases de tiempo.

2.4.3. EWS Transport for Baden-Württemberg - Alemania

El proyecto “Earthquake Early warning for Transport Lines” (EWS Transport) fue un proyecto desarrollado con el apoyo del gobierno alemán que analiza el desarrollo de un sistema de Alerta Sísmica temprana para la definición de las acciones apropiadas para las vías férreas, además de las medidas de rescate mediante información rápida y precisa sobre los posibles daños y la limpieza de las vías férreas para minimizar las pérdidas económicas.

En ese sentido se han planteado tres casos de uso que reflejan los objetivos del sistema:

- Earthquake Early Warning: Establece las tareas que inician con la detección de las ondas P, continua con la estimación del riesgo para la operación del tren y finaliza con la notificación a la compañía responsable de la operación.
- Structural Health Monitoring: Realiza una compilación de los mapas de intensidad sísmica basados en los valores picos de aceleración PGA de las ondas S, continúa con la estimación del daño en la infraestructura de las vías férreas.
- Permanent Infrastructure Monitoring: Desarrolla el uso potencial de sensores integrados para el monitoreo permanente de infraestructuras.

Así mismo, el sistema emite tres alertas diferentes para informar a las instituciones interesadas.

- Mapas de Alerta: Informa sobre la detección de ondas P y los parámetros sísmicos esperados para el evento sísmico (magnitud, hipocentro, región afectada, etc.).
- Mapas de Intensidad Sísmica: Informa los parámetros reales medidos, pueden utilizarse para la estimación del daño y las acciones que deben coordinarse con el equipo de respuesta a la emergencia.
- Mapa de daño: Informa sobre los potenciales daños causados por el sismo obtenidos a partir del procesamiento de los datos medidos, pueden publicarse para el apoyo del equipo de respuesta a la emergencia.

Para probar las funcionalidades del Sistema de Alerta Temprana, se ha seleccionado el estado federal de Baden-Württemberg en el suroeste de Alemania, que es uno de los estados con mayores magnitudes sísmicas se han reportado en el histórico, en la Figura N°14 se observa los viaductos monitoreados.



Figura N°14: Monitoreo de los puentes de Baden-Württemberg se observa en líneas rojas el trazo de las vías ferrocarriles, en triángulos azules los sensores desplegados. Fuente: Hilbring et al. (2014)

La estimación del daño se realizó en función a dos aspectos: i) Daño a la infraestructura y, ii) Daños del tren en operación ambos relacionados con valores de Aceleración pico del suelo (PGA, siglas en inglés).

De acuerdo a Hilbring et al. (2014), para la evaluación del daño de puentes se basaron en los análisis de Basöz y Mander (1999) y, Meskouris et al. (2007), que establecen 5 niveles de daño (ninguno, menor, moderado, mayor, y completo) correspondiente a valores de PGA y longitudes de puentes (Puentes cortos Luz <

150m y Puentes largos Luz > 150m), a continuación, se observa en la Figura N°15, un ejemplo de los resultados obtenidos:

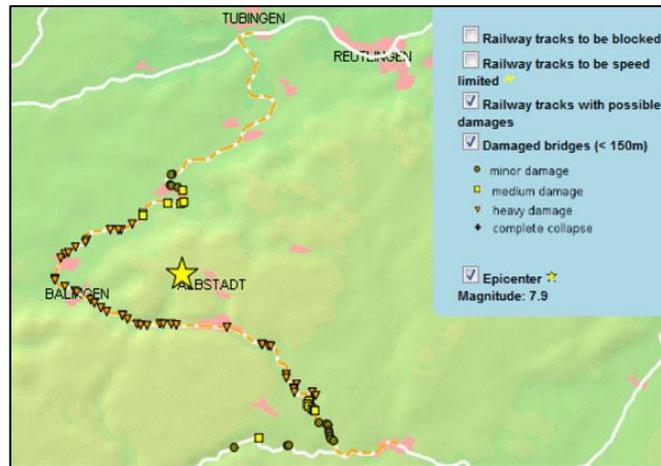


Figura N°15: Mapa de daños en la infraestructura.
Fuente: Hilbring et al. (2014)

Por otro lado, para la evaluación de daños del tren en operación, se establecieron límites de velocidad para evitar i) descarrilamientos, mediante la reducción de la velocidad de operación del tren cuando el PGA supera 1.00 m/s^2 , y daños en la vía férrea mediante el cálculo de la fuerza lateral resistente, que en el caso de balasto con durmientes de concreto se establece un umbral de aceleración de 10 m/s^2 . Luego, se obtuvieron los resultados de alerta para un sismo sintético producido para la demostración (véase Figura N°16):

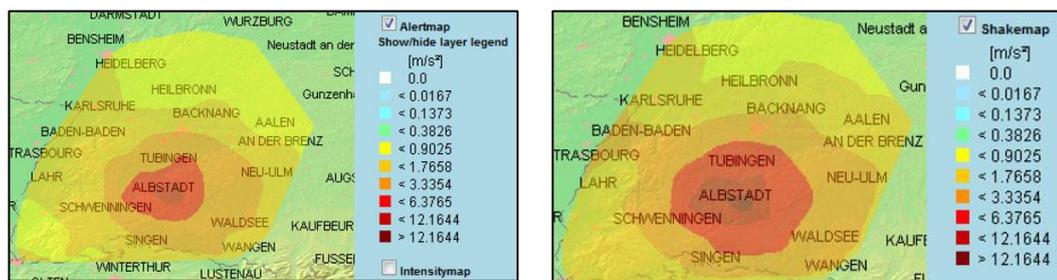


Figura N°16: Mapas del sistema de Alerta Sísmica.
(Izquierda) Estimación de picos de aceleración del suelo. (Derecha) Mapa de intensidades sísmicas medidos. Fuente: Hilbring et al. (2014)

2.4.4. The Shinkansen Viaduct – Japón

Como consecuencia de los extensos daños ocasionados por el sismo de Kobe 1995, fue necesario renovar el sistema de alerta sísmica de The Shinkansen Line, para ello se optó por implementar el primer sistema de alerta sísmica temprana basada en ondas P llamado UrEDAS, en los siguientes tramos: Tokaido Shinkansen y San'yo Shinkansen.

- Los viaductos están contruidos en bloques de 24m de largo de concreto reforzado, es un sistema monolítico de 3 marcos rígidos de pilares bicolumna y vigas en luces de 6 m y vigas en voladizo de 3m (véase Figura N°17).



Figura N°17: Fotografía del viaducto Tohoku Shinkansen, Iwate.

Fuente: (Google., s. f.-a, s. f.-b)

El objetivo del monitoreo son los siguientes:

- Estimación de la magnitud y localización, el método debe ser capaz de estimar estos dos parámetros mediante el análisis de las ondas P.
- Evaluar la vulnerabilidad y alerta en pocos segundos luego de la llegada de las ondas P, en base a las estimaciones anteriores el sistema debe ser capaz de alertar al sistema ferroviario sobre movimientos fuertes y el protocolo de acción inmediata.

Para ello se han instalado hasta 20 sismómetros UrEDAS de acuerdo con la siguiente Figura N°18:

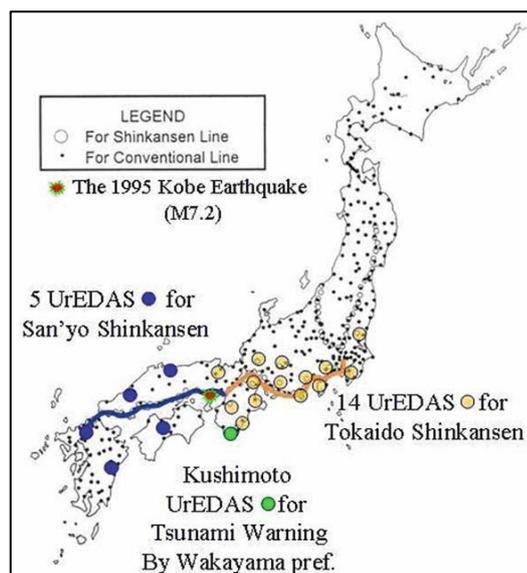


Figura N°18: Disposición de sensores en los viaductos del Shinkansen Line.

Fuente: Nakamura y Saita (2007)

De acuerdo a Shimamura y Yamamura (2006), el sistema de monitoreo ha sido parametrizados en función a la escala del movimiento llamada Intensidad Espectral (SI, siglas en ingles) para caracterizar el nivel de daño a cada registro sísmico, en ese sentido, se utilizaron once registros de eventos sísmicos que fueron escalados para obtener 19 grupos de registros con los mismos valores de SI (Valores de intensidad SI del 10, 15, 20, 25 hasta 100 cm/s) para evaluar los diferentes estados estructurales que se producen por cada grupo, obteniendo finalmente una gráfica de Valor SI versus Probabilidad de daño (véase Figura N°19).

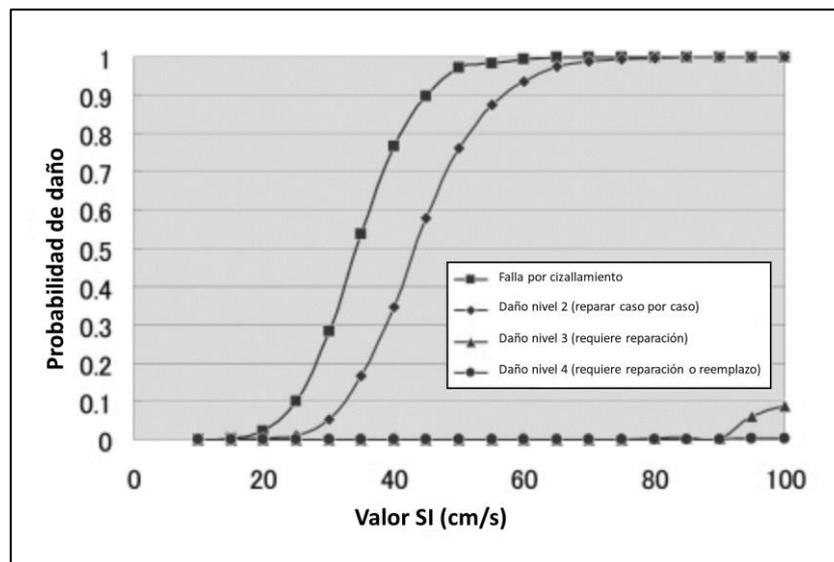


Figura N°19: Curva de probabilidad de daño.
Fuente: Shimamura y Yamamura (2006).

2.5. CRITERIOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL DAÑO

2.5.1. Criterios basados en registros de desplazamiento

El desplazamiento estructural se emplea como parámetro de daño en diversas literaturas y son usualmente limitadas por las normativas de edificaciones, no obstante, los códigos de diseño y especificaciones de diseño de puentes presentan criterios más amplio basados en categorías de desempeño sísmico, por tanto, este criterio solo puede aplicarse para estructuras que hayan sido previamente analizadas considerando la no linealidad de los materiales, cabe resaltar además, que de acuerdo a Kaya y Safak (2015), la obtención de desplazamientos mediante la doble integración de registros acelerométricos, conlleva a errores por la amplificación del ruido, por lo que no es el parámetro

adecuado si se emplea acelerómetros. A continuación, se presentan algunos criterios empleados por otros autores (véase la Tabla N°2):

Tabla N°2: Estimación de daño empleando parámetros de desplazamiento.
Fuente: Elaboración propia.

| AUTOR | CRITERIO |
|--|---|
| Kaya y Safak (2015) Edificaciones y puentes | Alarma Nivel 1: Daño mínimo/ocupación inmediata, deriva límite 0.005. Alarma Nivel 2: Daño reparable/seguridad de vida, deriva límite 0.010 Alarma Nivel 3: Daño mayor / Prevención del colapso, deriva límite 0.020 |
| FEMA (2003) Edificaciones | Daño ligero: deriva límite 0.002 Daño moderado: deriva límite 0.0042 Daño extensivo: deriva límite 0.0116 Daño completo: Deriva límite 0.030 |

2.5.2. Criterios basados en registros de frecuencia

El registro de frecuencias son particularmente empleadas para determinar las formas modales fundamentales los cambios en las frecuencias modales, simbolizan un cambio en la rigidez de la estructura, algunos códigos como la AASHTO establecen rangos mínimo de 3Hz para las frecuencias modales verticales dado que podrían entrar en resonancia con la frecuencia del paso de vehículos y peatones, otros estudios como el realizado por (Kong et al., 2006) y (Kaya & Ventura, 2019), requieren incluir instrumentos de medición de tráfico y temperatura, debido a que estas variables afectan las mediciones de rigidez.

En la Figura N°20, Andrews et al. (2013) propone valores de máxima vibración aceptable para estructuras de ingeniería en función a la frecuencia y la velocidad pico partícula (PGV), aunque señala que estas estructuras al estar diseñadas para eventos sísmicos pueden soportar incluso rangos mayores que los indicados.

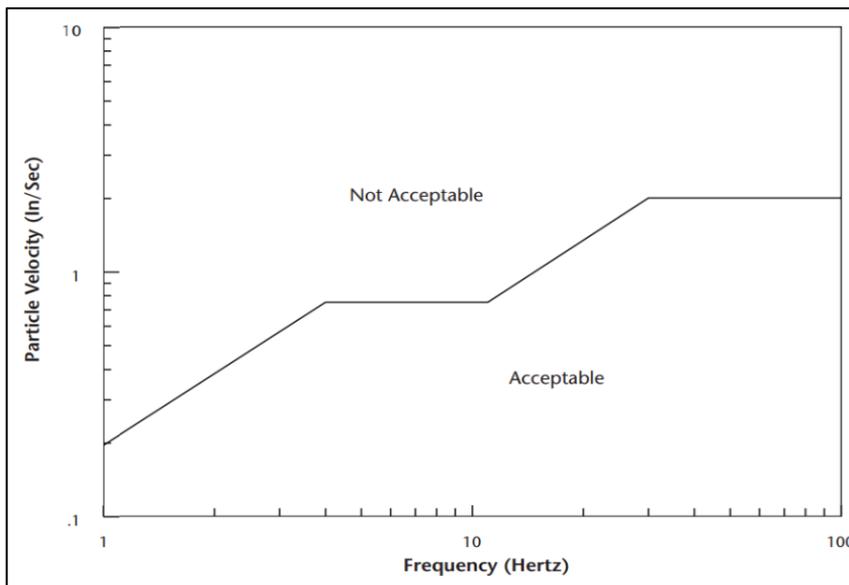


Figura N°20: Gráfica de evaluación de vibraciones propuesto para voladuras en operaciones mineras. Fuente: Andrews et al. (2013)

2.5.3. Criterios basados en registros de velocidad

Diversos autores (e.g. Shimamura y Yamamura (2006) y, Worden et al. (2012)) concuerdan en que el parámetro que mejor refleja la capacidad de daño de un evento sísmico es la velocidad, de este modo, han surgido diversas escalas de intensidad que se sustentan en los registros de velocidad de partícula, a continuación, se resumen en la Tabla N°3:

Tabla N°3: Estimación de daño empleando parámetros de velocidad.
Fuente: Elaboración propia.

| AUTOR | CRITERIO |
|---|--|
| Swiss Association of Standardization vibration damage criteria Andrews et al. (2013) | Límite de daño para un único evento si la fuente de Velocidad Pico Partícula PPV es superior a 1.2pulg/s <> 3.05cm/s. |
| Dowding (1996) Vibrations criteria CALTRANS - Andrews et al. (2013) | Límite de daño, si la fuente alcanza Velocidades de Pico Partícula superiores a 2.0pulg/s <> 5.08cm/s. |
| Siskind et al. (1980) Vibrations criteria CALTRANS - Andrews et al. (2013) | Probabilidad de daño de 90%: Umbral de daño: Fisuras pequeñas en juntas y acabados en yeso. Velocidad pico partícula: 9.0 in/s (<> 23cm/s). |

| AUTOR | CRITERIO |
|---|---|
| | <p>Daño Menor: Grietas en mampostería, caída de mortero suelto, grietas de hasta 3mm. Velocidad pico partícula: 16.0 in/s (<> 40cm/s).</p> <p>Daños mayores: Caída de mampostería, debilitamiento estructural, capacidad de carga afectada, fisuras de varios mm en muros. Velocidad pico partícula: 17.0 in/s (<> 43cm/s).</p> |
| <p>AASHTO (1990) Vibrations criteria CALTRANS - Andrews et al. (2013)</p> | <p>Máximo nivel de vibración para prevenir daños para Estructuras de ingeniería: entre 1.0 – 1.5pulg/s <> 2.54 – 3.81cm/s</p> |
| <p>Worden et al., 2012) ShakeMap – USGS Estimación del daño del puente Port Mann - Canadá</p> | <p>Daño potencial:</p> <p>Nulo: PGV < 3.1 cm/s</p> <p>Muy leve: 3.1 cm/s < PGV < 6.7 cm/s</p> <p>Leve: 6.7 cm/s < PGV < 14 cm/s</p> <p>Moderado: 14 cm/s < PGV < 29 cm/s</p> <p>Moderado/Alto: 29 cm/s < PGV < 60 cm/s</p> <p>Alto: 60 cm/s < PGV < 124 cm/s</p> <p>Muy Alto: 124 cm/s < PGV</p> |

2.5.4. Criterios basados en registros de aceleración

Empleado por diversos autores que plantean dado que es información que se obtiene directamente de las mediciones con acelerómetros, algunos parámetros empleados son:

Tabla N°4: Estimación de daño empleando parámetros de aceleración.

Fuente: Elaboración propia.

| AUTOR | CRITERIO |
|--|--|
| <p>(Veneziano & Papadimitriou, 2003) Política vigente de Alerta Temprana del</p> | <p>Máxima aceleración para evitar descarrilamiento de trenes 40 cm/s².</p> <p>Alarma Nivel 1: No requiere inspección / reanudación de operaciones, aceleración límite: $a_{m\acute{a}x} < 80 \text{ cm/s}^2$.</p> <p>Alarma Nivel 2: Inspección sobre tren / Operación a baja velocidad, aceleración límite $a_{m\acute{a}x}$ entre 80 cm/s² y 120 cm/s²</p> |

| | |
|---|--|
| viaducto de Tohoku | Alarma Nivel 3: Inspección a pie / No se reanuda operaciones, aceleración límite $a_{m\acute{a}x} > 120 \text{ cm/s}^2$ |
| (Veneziano & Papadimitriou, 2003) Propuesta de optimización para el viaducto Tohoku | Máxima aceleración para evitar descarrilamiento de trenes 60 cm/s^2 . Alarma Nivel 1: No requiere inspección / reanudación de operaciones, aceleración límite: $a_{m\acute{a}x} < 100 \text{ cm/s}^2$. Alarma Nivel 2: Inspección sobre tren / Operación a baja velocidad, aceleración límite $a_{m\acute{a}x}$ entre 100 cm/s^2 y 140 cm/s^2 Alarma Nivel 3: Inspección a pie / No se reanuda operaciones, aceleración límite $a_{m\acute{a}x} > 140 \text{ cm/s}^2$ |
| (Worden et al., 2012) ShakeMap – USGS Estimación del daño del puente Port Mann - Canadá | Daño potencial: Nulo (percepción débil o nulo): $\text{PGA} < 0.13 \text{ m/s}^2$ Nulo (percepción leve): $0.13 \text{ m/s}^2 < \text{PGA} < 0.44 \text{ m/s}^2$ Muy leve: $0.44 \text{ m/s}^2 < \text{PGA} < 0.83 \text{ m/s}^2$ Leve: $0.83 \text{ m/s}^2 < \text{PGA} < 1.55 \text{ m/s}^2$ Moderado: $1.55 \text{ m/s}^2 < \text{PGA} < 2.88 \text{ m/s}^2$ Moderado/Alto: $2.88 \text{ m/s}^2 < \text{PGA} < 5.37 \text{ m/s}^2$ Alto: $5.37 \text{ m/s}^2 < \text{PGA} < 10.00 \text{ m/s}^2$ Muy Alto: $10.00 \text{ m/s}^2 < \text{PGA}$ |
| (Hilbring et al., 2014) Sistema de monitoreo para vías férreas (Alemania) | Criterio de daño a la infraestructura: Sin daños: $\text{PGA} < 3.90 \text{ m/s}^2$ Daño menor: $3.90 \text{ m/s}^2 < \text{PGA} < 4.90 \text{ m/s}^2$ Daño moderado: $4.90 \text{ m/s}^2 < \text{PGA} < 5.90 \text{ m/s}^2$ Daño mayor: $5.90 \text{ m/s}^2 < \text{PGA} < 7.80 \text{ m/s}^2$ Daño completo: $7.80 \text{ m/s}^2 < \text{PGA}$ Criterio de reducción de velocidad: Para líneas de baja velocidad ($v \leq 80 \text{ km/h}$), se reduce la velocidad a 20 km/h , siempre que $0.4 \text{ m/s}^2 < \text{PGA} < 1.0 \text{ m/s}^2$., se detiene por completo si $\text{PGA} > 1.0 \text{ m/s}^2$. |

2.5.5. Criterios basados en escalas de intensidad sísmica

Si bien las escalas de intensidad sísmica son mediciones subjetivas que se realizan a partir del efecto que se produce en las personas, medio ambiente, estructuras en general, etc. existen estudios como Worden et al. (2012), Caprio

et al. (2015), Zanini et al. (2019), Bardet J.P. et al. (1995) y Xin et al. (2020) que correlacionan estos valores con mediciones instrumentales, en un intento por brindar mayor objetividad estas escalas.

Las escalas de intensidad son medidas subjetivas que describen las afectaciones que produjo un determinado evento sísmico, en el presente documento, serán tomados en cuenta para contextualizar escenarios potenciales en base a las descripciones, a continuación se presenta la figura Figura N°21, la misma que muestra rango de valores PGA al cual se espera se produzca la intensidad descrita por las diferentes escalas de intensidad, cabe señalar que, este criterio no pretende establecer correlaciones o comparativas entre escalas de intensidad, sino contextualizar, mediante la aceleración PGA, el potencial escenario sísmico que pueden afectar la operación de la Línea 1, tales como: potencial rotura de vidrios o caída de objetos suspendidos, dificultad de personas para mantenerse de pie, caída involuntaria de personas a las vías del tren, potencial daño leve, moderado o alto de estructuras sismorresistentes, afectación en vías del tren, etc.

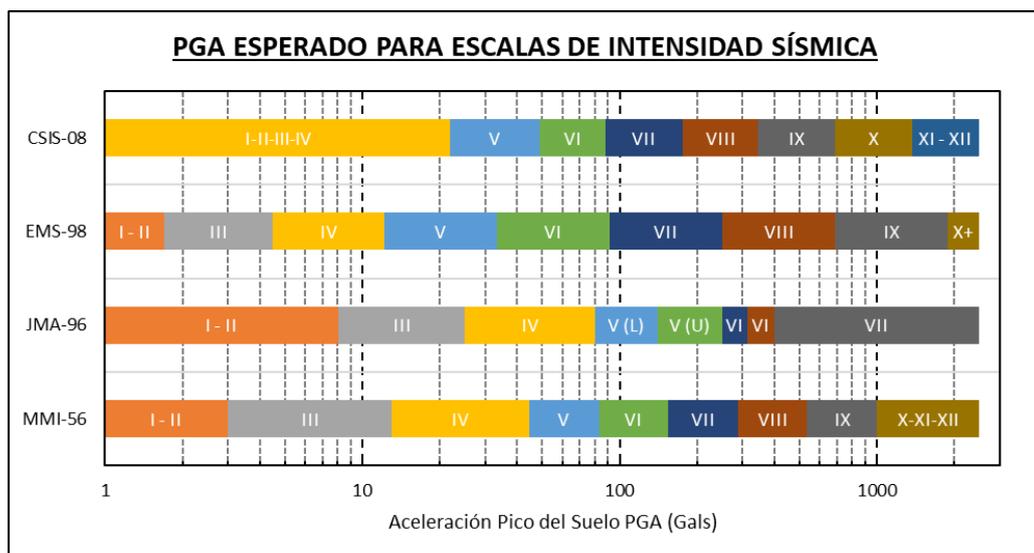


Figura N°21: Correlación entre intensidad sísmica – aceleración del suelo.

MMI: Intensidad Mercalli Modificada, correlación a PGA basada en Worden et al. (2012). EMS: Escala Macrosísmica Europea, correlación a PGA basada en Zanini et al. (2019). JMA: Agencia Meteorológica Japonés, correlación a PGA basada en Bardet J.P. et al. (1995). CSIS: Escala de Intensidad Sísmica China, correlación a PGA basada en Xin et al. (2020).

Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, es importante recalcar que la correlación Intensidad sísmica – PGA, puede ser muy variable dado que integra componentes de vulnerabilidad estructural y peligro regional, de hecho, un estudio comparativo empírico realizado

por S. Li et al. (2021) a partir del evento sísmico de magnitud Mw 8.0 el 12 mayo del 2008 en Wenchuan en la provincia de Sichuan en China establece una comparativa entre escalas a nivel de daño estructural (véase la Figura N°22) que no son del todo consistentes con la Figura N°21, no obstante, según sugieren los autores de dicho estudio, puede combinarse esta tabla con datos reales de daño y registros de parámetros sísmicos para establecer una evaluación auxiliar de intensidades.

| | | | | | | | | | | |
|---------|---------|-----|------|------|------|-------|-------|-----|----|-----|
| CSIS-08 | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| EMS-98 | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| MSK-81 | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| MMI-56 | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
| JMA-96 | II | III | IV | V(L) | V(U) | VI(L) | VI(U) | VII | | |
| R-F | III-VII | | VIII | IX | | | | | | X |

CSIS: Chinese Seismic Intensity Scale; EMS: European Macroseismic Scale; MSK: Medvedev, Sponheuer, and Karnik; MMI: Modified Mercalli Intensity; JMA: Japan Meteorological Agency; R-F: Rossi-Forel.

Figura N°22: Daño estructural entre diferentes escalas de intensidad sísmica para el sismo de Wenchuan Mw8.0 - China.
Fuente: S. Li et al. (2021).

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ESTRUCTURAL DE LA LÍNEA 1

Para comprender la complejidad entorno a la infraestructura de la Línea 1, es necesario contextualizar el proceso de diseño y construcción, de acuerdo con la recopilación de (Kohon, 2016) se pueden extraer los siguientes puntos clave:

- El proyecto de ingeniería empezó en marzo de 1986 y, en octubre del mismo año empieza la ejecución de las obras civiles desde Villa El Salvador.
- En abril de 1990, se inauguró los primeros 1.5 kilómetros (de un total de 9.6 kilómetros hasta la estación Atocongo)
- Entre 1990 y 2000 se completaron las obras civiles del viaducto hasta puente Atocongo, Patio taller, vías férreas e instalaciones electromecánicas y siete estaciones del tramo, es decir se completó los 9.6Km del tramo entre Villa El Salvador y la no ejecutada Estación Jorge Chávez.
- El proyecto se dejó inconcluso, inoperativo y con escasas perspectivas de retomarse hasta el 2010, durante ese periodo las estaciones, instalaciones eléctricas y taller de Villa El Salvador tuvieron cierto grado de mantenimiento y protección contra el vandalismo.
- En enero del 2010 se retoma el proyecto del tramo 1 (Estación Villa El Salvador – Estación Miguel Grau) que consistió en completar los estudios definitivos de ingeniería, realizar obras civiles y proveer de equipamiento electromecánico.
 - Conclusión de los viaductos elevados faltantes para completar 22Km.
 - Superestructura de vía (rieles, durmientes, fijación de aisladores y almohadillas).
 - Reparación de vía férrea preexistente (reemplazo de rieles, durmientes, balasto, etc.)
 - Catenaria para entregar 1500 volts de corriente continua.
 - Subestación eléctrica 60/20KV y tres subestaciones eléctricas de rectificación en cascada.
 - Sistema de señalización y mando centralizado de automatización y control, y Telecomunicaciones entre estaciones mediante cable de fibra óptica.
 - Nueve estaciones desarrolladas en dos niveles (primer nivel dedicada al área operativa y segundo a los andenes para el acceso al tren).
 - Equipamiento del patio taller y adecuación de material rodante preexistente.

- En julio del 2011 se inaugura el tramo 1 que comprende aproximadamente 22Km entre las estaciones Villa El Salvador y Grau.
- En noviembre del 2011 se inicia la ejecución del tramo 2 (Av. Grau hasta San Juan de Lurigancho) en la que se desarrolló la ingeniería y ejecución de 12.4 Km de viaductos.
 - Viaductos elevados y dos puentes que cruzan la Vía Evitamiento (270m) y el río Rímac (240m).
 - Patio de maniobras en la cola de vía de la estación Bayóvar.
 - Diez estaciones de dos niveles (similares a las del tramo 1).
 - Subestación eléctrica 60/20KV y cuatro subestaciones de rectificación.
 - Superestructura de vía (rieles, durmientes, fijación de aisladores y almohadillas) y catenarias.
 - Sistema de señalización y mando centralizado de automatización y control, y telecomunicaciones.
- En mayo del 2014 se concluya la obra, iniciándose en julio del mismo año las operaciones comerciales de 34.3Km de Línea 1.

En resumen, tal como se puede observar en la siguiente figura, existen claramente 3 sectores:

- Tramo Antiguo: Ejecutado en la década de 1980 y 1990, comprende 7 estaciones entre Villa El Salvador hasta Atocongo, tiene una extensión de 9.6Km, se compone principalmente de pasos a nivel (81%), y el resto son viaductos elevados puntuales en diferentes tramos.
- Tramo I: Ejecutado en el año 2010, comprende 9 estaciones entre Jorge Chávez hasta Miguel Grau, tiene una extensión de 12.3Km, está compuesto completamente de viaductos elevados.
- Tramo II: Ejecutado entre 2011 al 2014, comprende 10 estaciones entre El Ángel hasta Bayóvar, tiene una extensión de 12.4Km, está compuesto completamente de viaductos elevados.

3.2. VIADUCTOS ELEVADOS

La infraestructura de la Línea 1 se encuentra compuesta por alrededor de 26.5 Km (el 77% de la longitud de la infraestructura), emplazado principalmente entre los tramos I y II, desde las estaciones Atocongo hasta Bayóvar. A continuación, se presentan los siguientes tipos de viaductos:

3.2.1. Tramo Antiguo

Los viaductos elevados del tramo antiguo se han empleado principalmente para pasos a desnivel de avenidas en las siguientes ubicaciones:

Tabla N°5: Viaductos elevados en el tramo Antiguo.
Fuente: Elaboración propia.

| N° | Ubicación | Referencia |
|----|--|--|
| 1 | Av. Separadora Industrial con Av. Juan Velasco Alvarado, Villa El Salvador | Entre las estaciones Parque Industrial y Villa El Salvador |
| 2 | Av. Separadora Industrial con Av. El Sol, Villa El Salvador | Entre las estaciones Parque Industrial y Villa El Salvador |
| 3 | Av. Separadora Industrial con Av. Modelo, Villa El Salvador | Entre las estaciones Pumacahua y Parque Industrial |
| 4 | Av. La Unión con Av. Pachacútec, Villa María del Triunfo | Entre las estaciones Villa María y Pumacahua |
| 5 | Av. Miguel Iglesias con Av. Pachacútec, San Juan de Miraflores | Entre las estaciones María Auxiliadora y San Juan |
| 6 | Av. San Juan con Av. Los Héroes, San Juan de Miraflores | Entre las estaciones San Juan y Atocongo |
| 7 | Carretera Panamericana Sur con Av. Los Héroes, San Juan de Miraflores | Estación Atocongo |

Estos viaductos elevados tienen una configuración estructural típica que se describe a continuación:

- Las vías elevadas se componen de una serie de viaductos cuyo tablero se compone de una losa de 0.25 m, vigas prefabricadas tipo cajón de concreto armado de sección variable, peralte 1.30 m y luz típica de 20 m, apoyadas sobre el cabezal de un pilar bicolonna circular de diámetro

1.30m cada una, la cimentación también tiene una sección variable entre 13.60m x 4.50m.



Figura N°25: Esquema del viaducto típico del tramo Antiguo.
Fuente: (Google., s. f.-k)

3.2.2. Tramo I

A partir de la estación Atocongo hasta la estación Grau la infraestructura de L1 se compone de viaductos elevados los cuales tienen hasta cuatro configuraciones estructurales distintas:

Tabla N°6: Viaductos elevados en el tramo I.
Fuente: Elaboración propia.

| Tipo | Ubicación | Referencia |
|------|---|--|
| T1 | Carretera Panamericana Sur hasta Av. Surco, Surco | Entre las estaciones Atocongo y Ayacucho (2.0Km) |
| T2 | Av. Surco, Surco hasta Estación Cabitos, Surco | Entre las estaciones Ayacucho y Cabitos (1.6Km) |
| T3 | Estación Cabitos hasta Jr. Eduardo Ordoñez, Surco | Entre las estaciones Cabitos y Angamos (2.5Km) |
| T4 | Jr. Eduardo Ordoñez hasta Av. San Borja, Lima | Entre las estaciones Angamos y San Borja Sur (0.7Km) |
| T2 | Av. San Borja hasta Estación Miguel Grau, Lima | Entre las estaciones San Borja Sur y Miguel Grau (5.5Km) |

- El viaducto elevado tipo T1 se compone de zapatas de 15.00m x 10.80m, pilares monocolumna de 4.00m x 1.40m que soportan 2 vigas de concreto armado tipo cajón de peralte 1.00m, luz típica de 20.00 m, y una losa de 0.25m.

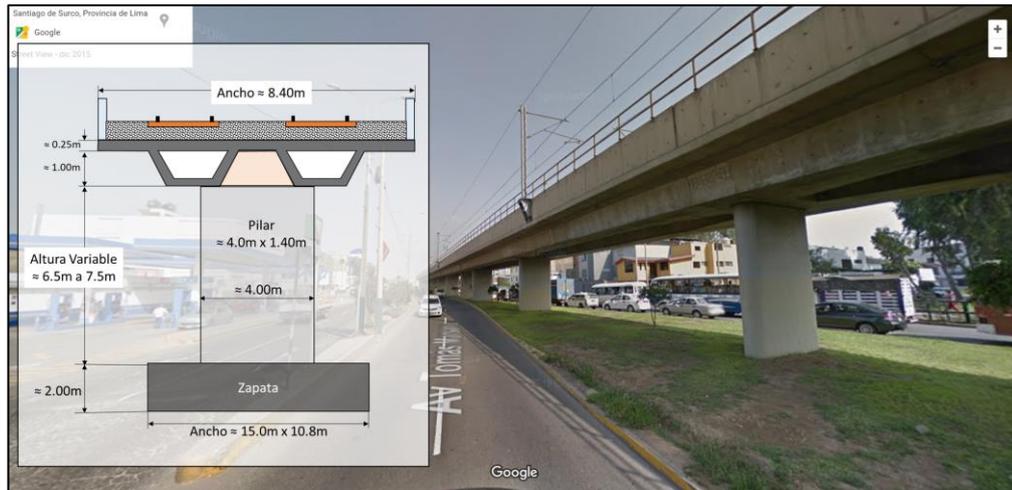


Figura N°26: Esquema del viaducto T1 del tramo I.
Fuente: (Google., s. f.-b)

- El viaducto elevado tipo T2 está compuesta por zapatas robustas de 15.00m x 10.80m, pilares monocolumna de 4.00m x 1.40m, sobre la cual se apoyan en una base de neopreno 4 vigas prefabricadas de concreto armado de peralte 1.30m, luz típica de 20.00 m, y una losa de 0.20m.



Figura N°27: Esquema del viaducto T2 del tramo I.
Fuente: (Google., s. f.-j)

- Las vías elevadas tipo T3 son similares al tramo Antiguo, se componen de una serie de viaductos cuyo tablero se compone de una losa de 0.25 m, vigas prefabricadas tipo cajón de concreto armado de sección variable, peralte 1.30 m y luz típica de 20 m, apoyadas sobre el cabezal de un pilar bicolumna circular de diámetro 1.30m cada una, la cimentación también tiene una sección variable entre 13.60m x 4.50m



Figura N°28: Esquema del viaducto T3 del tramo I.

Fuente: (Google., s. f.-d)

- El tramo de viaducto elevado tipo T4 tiene la misma configuración T2, con zapatas de 15.00m x 10.80m, pilares monocolumna de 4.00m x 1.40m que soportan monolíticamente 4 vigas prefabricadas de concreto armado de peralte 1.30m, luz típica de 20.00 m, y una losa de 0.20m.



Figura N°29: Esquema del viaducto T4 del tramo I.

Fuente: (Google., s. f.-e)

- Finalmente, el viaducto tipo T2 completa el tramo I de 5.5Km desde la estación hasta la estación Miguel Grau.

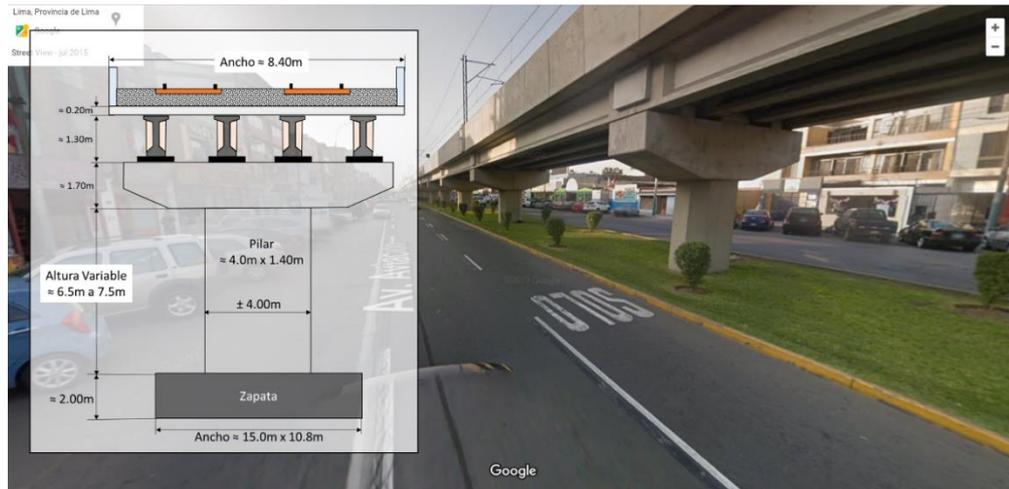


Figura N°30: Esquema del viaducto T2 del tramo I.
Fuente: (Google., s. f.-c)

3.2.3. Tramo II

El tramo II posee una configuración típica similar al tipo II del Tramo I, se desarrollará a partir de la estación Miguel Grau hasta la estación Bayóvar, con la siguiente configuración estructural típica:

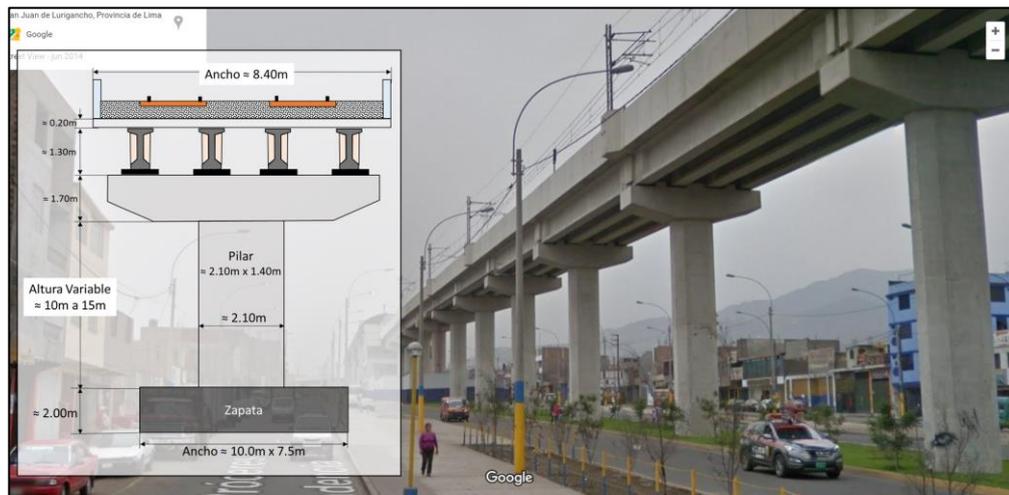


Figura N°31: Esquema de la configuración típica del viaducto tramo II.
Fuente: (Google., s. f.-f)

Se identifica además dos puentes de gran envergadura que cruzan la Vía Evitamiento (270m) y el río Rímac (240m), cuyas configuraciones son las siguientes:

- El balasto se apoya directamente sobre una viga cajón de 8.6m de ancho y peralte variable y luces de hasta 110m de longitud, los pilares son

bicolumna de entre 17 a 21m de altura cimentadas sobre zapatas pilotadas de 15x15m.



Figura N°32: Fotografía del puente de Vía Evitamiento de la Línea 1.
Fuente: Elaboración propia.

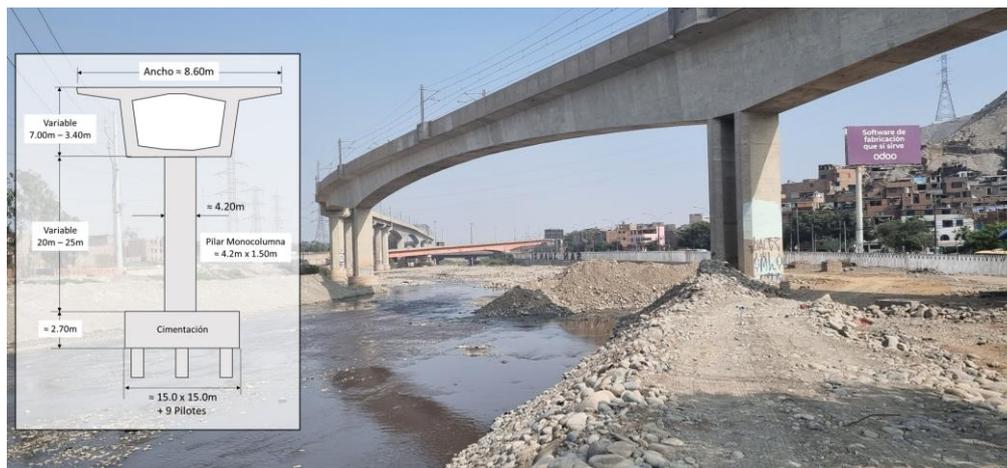


Figura N°33: Fotografía del puente del río Rímac de la Línea 1.
Fuente: Elaboración propia.

3.3. ESTACIONES DE LA LÍNEA 1

3.3.1. Tramo Antiguo

Este tramo está compuesto siete estaciones, de las cuales seis se encuentran a nivel superficial, por lo que comparten el mismo tipo de configuración estructural, en cambio la estación Atocongo tiene un similar a la estación del Tramo I.

A nivel superficial, las estaciones están compuestas por dos niveles: Nivel 1 (Andenes) y Nivel 2 (Operaciones), cuyo sistema estructural corresponde a un conjunto de pórticos de concreto armado con cerramiento de albañilería.

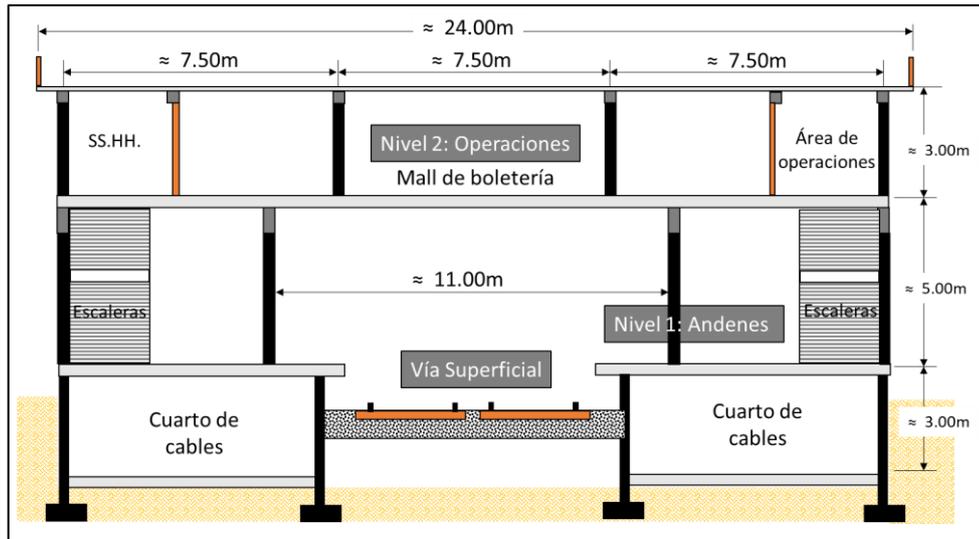


Figura N°34: Esquema en corte de la estación a nivel superficial.
Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Tramo I

Este tramo está compuesto íntegramente por viaductos elevados compuestas por dos niveles: Nivel 1 (Operaciones) y Nivel 2 (Andenes), cuyo sistema estructural es típicamente similar a los viaductos elevados con pilares monocolumna con la salvedad de contar con un cabezal de 15.00m de ancho, cuatro vigas adicionales que soportan la losa de andenes, y vigas metálicas para el soporte de la cubierta metálica de aluzinc.

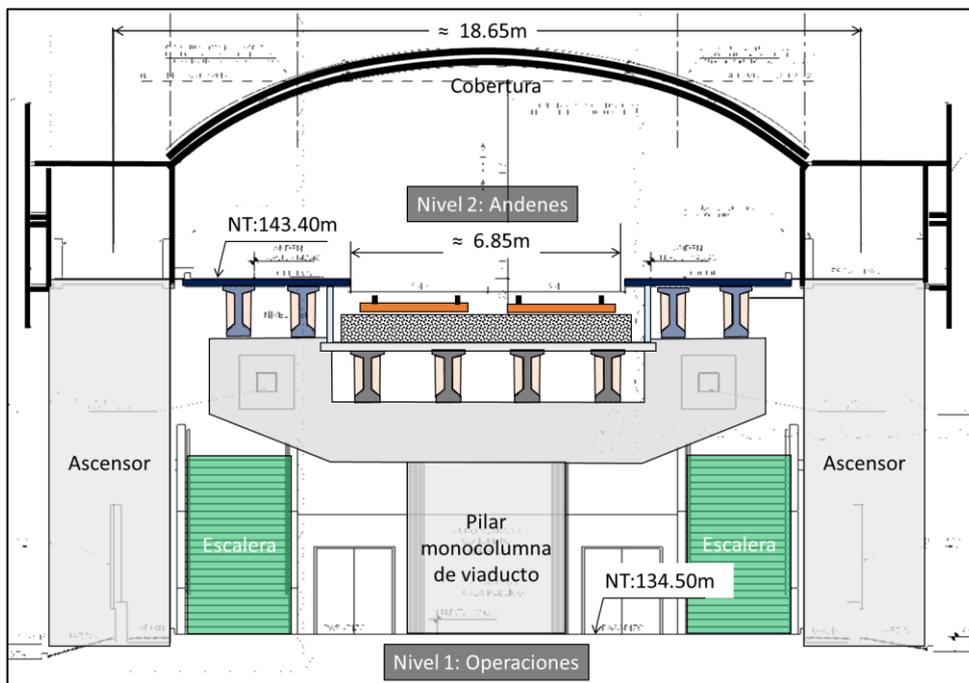


Figura N°35: Esquema en corte de la estación Angamos – Tramo I.
Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Tramo II

Así mismo, las estaciones elevadas están compuestas por dos niveles: Nivel 1 (Operaciones) y Nivel 2 (Andenes), cuyo sistema estructural es similar a los viaductos elevados bicolumna y cabezales de 15.00m de ancho, cuatro vigas adicionales que soportan la losa de andenes, no obstante, la cubierta metálica de aluzinc se encuentra apoyada directamente sobre los cabezales ensanchados.

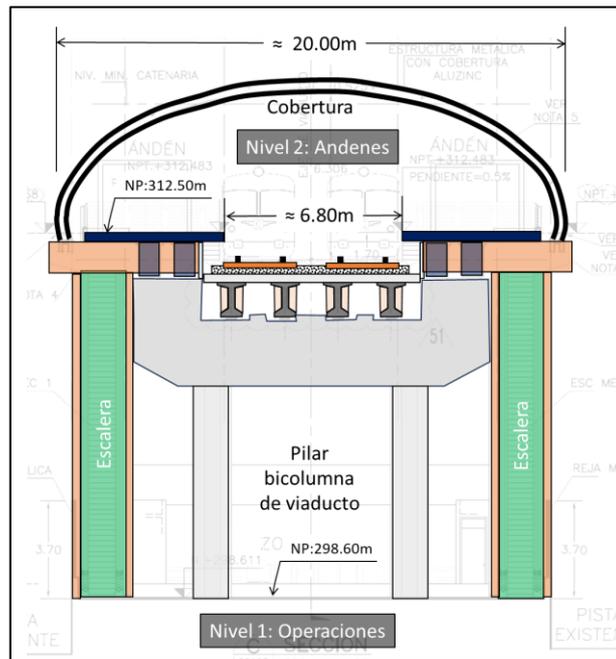


Figura N°36: Esquema en corte de la estación Bayóvar tipo viaducto elevado.
Fuente: Elaboración propia

3.4. ANÁLISIS DE NORMATIVA APLICABLE

Debido a que la infraestructura de Línea 1 se ha construido en diferentes etapas, es importante identificar y analizar las normatividades que se encontraban vigentes en el momento de diseño. Aunque no se tenga mayores referencias de la norma aplicada para el diseño, a continuación, se presentará una comparativa de las normativas internacionales y nacionales aplicables.

De acuerdo a Seminario Manrique, (2004), los profesionales dedicados al diseño de puentes hasta antes del siglo XX, empleaban diferentes normativas como la DIN (Alemania), Eurocode (Unión Europea), AASHTO (Estados Unidos), entre otras, aunque tradicionalmente las especificaciones AASHTO han sido las más utilizadas y difundidas por los ingenieros peruanos dedicados al diseño de puentes; no fue sino hasta antes de julio del 2003 que se publicó el (Manual de diseño de puentes, 2003) estándar nacional que establece “aspectos de diseño”

adaptados a partir de las Especificaciones del American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), esta primera edición establece que: “Hasta el perfeccionamiento del documento, se aceptará para el diseño de puentes, las normas dadas por la AASHTO en su edición de vigencia”, las dos ediciones posteriores del Manual de Diseño de 2016 y 2018 son actualizaciones basadas en las Especificaciones 7th Edition AASHTO 2014 y del Interim publicado por AASHTO en el 2015, respectivamente.

Respecto a las Especificaciones AASHTO, es la principal norma de referencia para el diseño de puentes en diferentes países, su primera publicación data del 1931 y ha pasado por dos cambios importantes desde su implementación:

- 1) En la AASHTO 1983 edición 13ra, se incorporan disposiciones de diseño sismorresistentes de acuerdo con la publicación ATC-6, que introduce las categorías de desempeño sísmico mediante coeficientes de aceleración (A), importancia (IC), coeficiente de sitio (S) y factor de modificación de respuesta (R).
- 2) En la AASHTO 1992 edición 15ta, se implementa el método de diseño por Estados Límites o Load and Resistance Factor Design (LRFD, siglas en inglés), que considera la variabilidad estadística de las propiedades de los elementos estructurales, las cargas aplicadas y del comportamiento estructural.
- 3) En el año 2009, se publica la guía LRFD Seismic Bridge Design, la misma que introduce criterios de desplazamiento y deformación en el análisis sísmico para asegurar el mecanismo de falla esperado.

De acuerdo con lo anterior, puede colegirse que, para el diseño, planeamiento y construcción de los viaductos elevados de Línea 1 se emplearon las especificaciones de la AASHTO vigentes en el momento del planteamiento de cada tramo.

Tabla N°7: Normatividad vigente para cada etapa del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

| Tramo | Proyecto | Norma Vigente |
|--------------|---|------------------------------|
| Tramo Antigo | Diseño 1986 Construcción 1986 - 1990 | 13th Edition AASHTO 1983 |
| Tramo I | Diseño 2010 Construcción 2010 - 2011 | 4th Edition AASHTO LRFD 2007 |
| Tramo II | Diseño 2011 Construcción 2012 - 2014 | 5th Edition AASHTO LRFD 2010 |

En cambio, las especificaciones AASHTO LRFD 2007 y AASHTO LRFD 2010 incorporan íntegramente la metodología de Estados Limite (filosofía de diseño LRFD), metodología que, de acuerdo con el reporte NCHRP 20-7/31 “Development of Comprehensive Bridge Specs and Commentary”, se considera más segura y apropiada para el diseño dado que se basa en la investigación y calibración estadística para cada carga y material.

| | |
|---|--|
| <p>3.4—LOAD FACTORS AND COMBINATIONS</p> <p>3.4.1—Load Factors and Load Combinations</p> <p>The total factored force effect shall be taken as:</p> $Q = \sum \eta_i \gamma_i Q_i \quad (3.4.1-1)$ <p>where:</p> <p>η_i = load modifier specified in Article 1.3.2 Q_i = force effects from loads specified herein γ_i = load factors specified in Tables 3.4.1-1 and 3.4.1-2</p> | <p>Components and connections of a bridge shall satisfy Eq. 1.3.2.1-1 for the applicable combinations of factored extreme force effects as specified at each of the following limit states:</p> <ul style="list-style-type: none">• STRENGTH I—Basic load combination relating to the normal vehicular use of the bridge without wind.• STRENGTH II—Load combination relating to the use of the bridge by Owner-specified special design vehicles, evaluation permit vehicles, or both without wind.• STRENGTH III—Load combination relating to the bridge exposed to wind velocity exceeding 90 km/hr.• STRENGTH IV—Load combination relating to very high dead load to live load force effect ratios. |
|---|--|

Figura N°39: Factores empleados en AASHTO LRFD 2007.
(Izquierda) Factores y Combinaciones de cargas últimas. (Derecha) Estados límites.

Del análisis anterior, se concluye que, tanto el tramo Antiguo, así como, los tramos I y II se diseñaron con la filosofía de diseño LRFD, criterio que se considera en las normativas modernas actuales.

3.4.2. Especificaciones de diseño sísmico

La AASHTO 1983 incorpora las disposiciones sísmicas de la ATC-1981 ((Mayes & Sharpe, 1981)), la misma que establece un mapa de peligro sísmico con una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, es decir un periodo de retorno de 475 años, además, los coeficientes de reducción de respuesta (R) son menores comparados a los factores actuales que se emplean para estructuras esenciales, lo anteriormente señalado, hace que la demanda sísmica sea menor respecto a las normativas actuales. Respecto a la vibración, las especificaciones AASHTO-1973 señalan que las vibraciones solo deben ser consideradas en el diseño de puentes de acero.

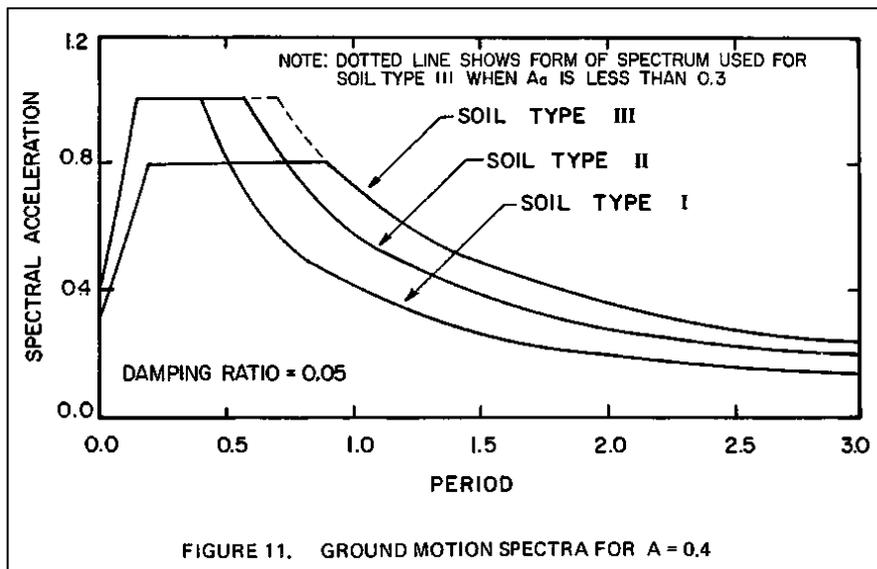


Figura N°40: Espectro de respuesta normativo del estándar AASHTO-1983.
Fuente: (Mayes & Sharpe, 1981)

Por otro lado, las especificaciones AASHTO LRFD 2007 y 2010 contienen disposiciones que son mantenidas aún por las normas actuales, por ejemplo, los espectros de respuesta normativos se construyen a partir de mapas de peligro sísmico con un periodo de retorno de 1000 años (probabilidad de excedencia de 7% en 75 años), no obstante, debe indicarse que la integración de la guía LRFD Seismic Bridge Design, introduce nuevos conceptos que aseguran el mecanismo de falla dúctil esperado para el resguardo de la vida, es muy probable que se haya incluido para el diseño del tramo II y parcialmente en el tramo I. Respecto a la vibración, las disposiciones limitan la frecuencia modal vertical por encima de los 3Hz para evitar resonancias.

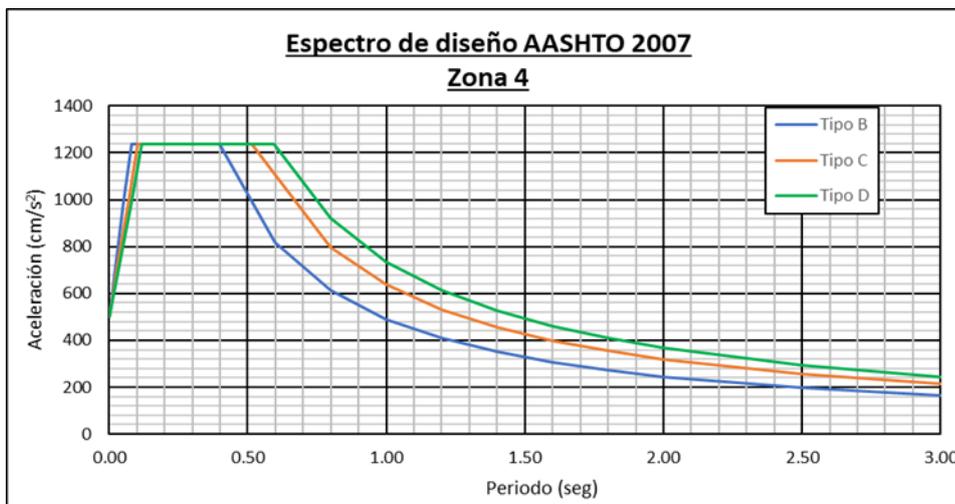


Figura N°41: Espectro de respuesta normativo del estándar AASHTO 2007.
Fuente: Elaboración propia.

3.4.3. Especificaciones de durabilidad

Las especificaciones AASHTO 1983 respecto a la durabilidad son precisas en indicar en que para la protección del acero de refuerzo debe considerarse un recubrimiento entre 1" a 2", valores similares a las especificaciones actuales.

| | |
|---|-----------|
| (B) Covering | |
| The minimum covering measured from the surface of the concrete to the face of any reinforcing bar, shall be not less than 2 inches, except as follows : | |
| Top of slab | 1½ inches |
| Bottom of slab | 1 inch |
| Stirrups and ties in T-beams | 1½ inches |
| Stirrups and ties at outside faces of box girders | 1½ inches |
| Stirrups and ties at inside faces of box girders | 1 inch |
| Footings in contact with the ground | 3 inches |
| Concrete exposed to sea water | 4 inches |
| Concrete piles exposed to sea water | 3 inches |
| Special consideration should be given to increasing the minimum cover in areas where chlorides or other corrosive substances are present in the soil. However, if special measures are taken to protect the steel from the corrosive substance, the special covering may be reduced but not to less than that specified in paragraph 1. | |

Figura N°42: Recubrimiento normativo del estándar AASHTO-1983.

Fuente: (Mayes & Sharpe, 1981)

Por otro lado, las especificaciones de la AASHTO 2007 y 2010 establecen criterios de durabilidad mucho más amplios, tales como: Reactividad Álcali-Sílice de los agregados, recubrimiento de concreto, relación agua-cemento, especificación del cemento, protección del acero de reforzamiento y tendones de postensado.

Tabla N°8: Comparativa entre especificaciones AASHTO de durabilidad.

Fuente: Elaboración Propia.

| Criterio | Especificaciones | Especificaciones |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| | AASHTO 1983 | AASHTO 2007, 2010 |
| Relación Agua-cemento | - | 0.50 |
| Resistencia del concreto f'c | 24.5 MPa | 28 MPa |
| Recubrimiento | 2.5 cm | 5 cm |
| Tipo de Cemento | - | Tipo IP |

Por lo tanto, se concluye que el tramo Antiguo ha sido diseñado bajo criterios de durabilidad menos exigentes, por lo que es propensa a daños como la carbonatación, corrosión, fisuras, eflorescencias, etc.

CAPÍTULO IV: SISTEMA DE ALERTA SÍSMICA PARA LA LÍNEA 1 DEL METRO DE LIMA

4.1. OBJETIVO DEL SISTEMA

El sistema de alerta sísmica tiene el objetivo principal de proporcionar un sistema de respuesta operacional post sismo en tiempo casi real para el despliegue rápido de acciones e inspecciones estructurales priorizadas en viaductos y estaciones de la Línea 1 del Metro de Lima.

Para ello, se plantea metodologías apoyados en Sistemas de Alerta Sísmica basado en sensores in situ (Minson et al., 2021), y Sistemas de Monitoreo Estructural nivel 3 (Rytter (1993) y Lui Kuan & Agüero Barrantes (2017)), obteniéndose así los siguientes objetivos secundarios que el sistema debe ser capaz de realizar:

- Estimar la existencia de daños a escala global que determinen si es necesario suspender temporalmente el servicio luego de un evento sísmico.
- Localizar los tramos o estaciones con probable daño, para delimitar por tramos las acciones sobre la operación.
- Evaluar preliminarmente la severidad del daño para priorizar las acciones e inspecciones en determinados sectores.
- Adquisición de datos que permitan complementar las evaluaciones operacionales y estructurales.

4.2. ARQUITECTURA DEL SISTEMA

La arquitectura del sistema se esquematiza en la Figura N°43, y se describe a continuación:

- Se tienen desplegados seis sensores que tienen integrados una memoria interna, la cual almacena los registros de aceleración y sube la información a un servidor.
- En internet se dispone de un servidor externo (en el que se guarda la información en una base de datos, se analizan los registros, se generan los reportes y notificaciones vía correo electrónico).
- Los datos procesados se emplean para que el Centro de Control de Mantenimiento (CCM) active el protocolo de respuesta sísmica.
- Posteriormente, la CCM deriva las acciones a las áreas correspondientes: Puesto Central Operativo (PCO), Área de Mantenimiento de Vías y Obras,

Catenarias, Subestaciones, Señalización y Telecomunicaciones y autoridades correspondientes.

- En este punto el CCM hace seguimiento de las acciones y dispone del levantamiento o incremento de restricciones conforme a la ocurrencia de réplicas, los resultados de inspecciones operacionales y estructurales, así como, la información que provea la autoridad pertinente.
- Finalmente, la información de la evaluación debe ser analizada y conservada en un repositorio interno, que permitirá mejorar la respuesta operacional para futuros eventos.

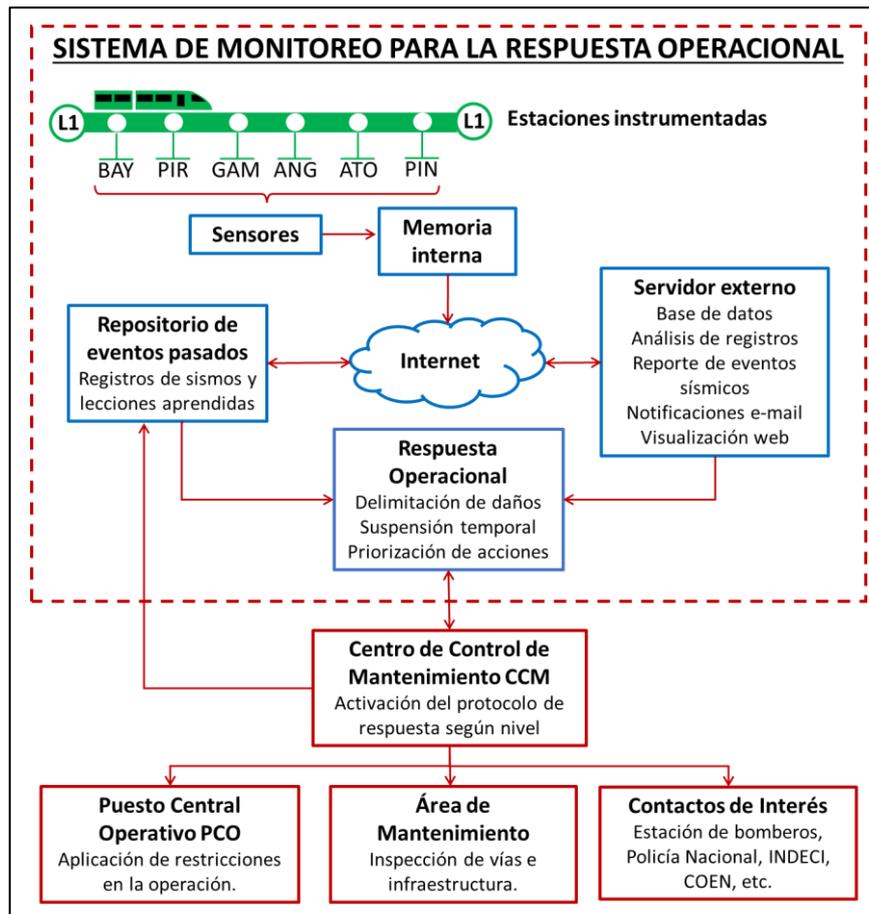


Figura N°43: Esquema de la arquitectura del Sistema de Monitoreo para la Respuesta operacional. Fuente: Elaboración propia.

4.3. SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN

Los acelerómetros instalados se encuentran conectados a la red de internet que provee Línea 1, los datos se almacenan en un servidor en el cual se puede revisar en tiempo casi real, para esta funcionalidad cada acelerómetro de monitoreo tiene los siguientes componentes (véase Figura N°44):

- Acelerómetro tipo MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) incluye sensor inercial de 3 ejes espaciales.
- Ordenador de placa única ARDUINO UNO.
- Unidad de almacenamiento interno de 8GB.
- Suministro de energía ininterrumpida (UPS).
- Conexión a Internet vía wifi o cable Ethernet Cat5.
- Módulo 3G de redundancia de comunicaciones.

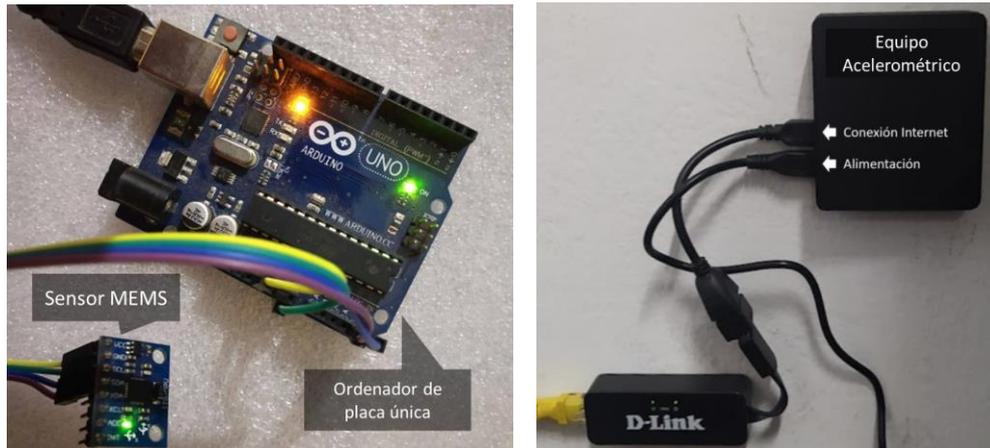


Figura N°44: Equipo acelerométrico instalado.
(Izquierda) Componentes internos del acelerómetro. (Derecha) Equipo acelerométrico instalado.
Fuente: Fotografías de Cornejo J. (2022).

Las especificaciones técnicas de los acelerómetros instalados se observan en la Tabla N°9 a continuación:

Tabla N°9: Especificaciones técnica del acelerómetro.
Fuente: Elaboración propia.

| Parámetro | Valor |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| Rango de medición | 0.1 – 1960 gals |
| Frecuencia de medición | Configurable hasta 200 Hz |
| Temperatura de funcionamiento | 0 – 60 °C |
| Dimensiones y peso | 75mm x 65mm x 30mm (200gr) |
| Precisión de Fecha y Hora | Network Time Protocol |
| Conexión a internet | Por medio de cable Ethernet Cat 5 |
| Número de Ejes | 3 ejes (X, Y, Z) |

A continuación, se describen las características principales del sistema de alerta:

- Las mediciones se registran y almacenan de manera continua desde los acelerómetros instalados en las seis estaciones, la información puede observarse en tiempo casi-real (tiempo máximo de actualización de 5 minutos) a través de la página web tal como se puede observar en la Figura N°45.



Figura N°45: Página web del registro de aceleraciones en tiempo casi-real.
Fuente: Elaboración Propia

- Además de lo anteriormente descrito, el sistema posee una unidad de almacenamiento interno y un suministro de energía ininterrumpida que brindan autonomía a la estación de monitoreo para registrar y almacenar información durante 6 días.
- Cada estación de monitoreo registra información sobre la aceleración en las tres componentes de dirección (vertical, transversal y longitudinal), y mediante algoritmos es capaz de reconocer si un movimiento ha superado el umbral de aceleraciones, verificar el evento con los registros del Instituto Geofísico del Perú y enviar correos de alerta.
- Así mismo, se ha diseñado un sistema de redundancia de información para evitar la pérdida de información, esta se compone de tres capas de duplicidad de información (véase Figura N°46):
 - Memoria Interna: Cada equipo acelerométrico tiene una memoria capaz de seguir procesando información por 6 días sin acceso a internet ni energía eléctrica.

- Servidor Externo: Toda la información primaria (sin procesamiento) registrada por los acelerómetros es subida a un servidor de base de datos con un lapso de actualización de 5 minutos como máximo.
- Repositorio Drive: El equipo es capaz de identificar los datos que correspondan únicamente a eventos sísmicos y subirlos inmediatamente a una carpeta drive.

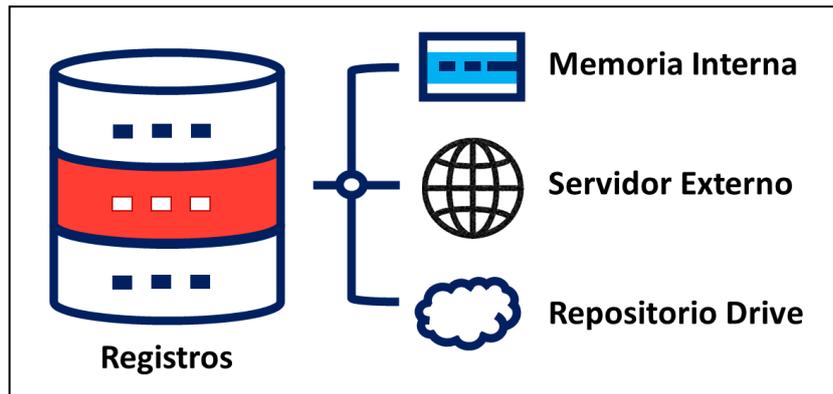


Figura N°46: Esquema de la redundancia en el registro de datos.
Fuente: Elaboración propia.

4.4. ESTACIONES INSTRUMENTADAS

Se han instalado seis acelerómetros en seis estaciones de la Línea 1, las cuales se han ubicado tratando de cubrir los tramos descritos en el acápite anterior. Se han tomado los siguientes criterios para el espacio de ubicación:

- Se ubican entre 0.20m a 0.30m sobre el nivel de la losa.
- En la medida de lo posible, se han ubicado en zonas técnicas restringidas poco transitadas, actualmente se viene trabajando en la reubicación de algunas posiciones.
- Actualmente se está trabajando en la implementación de cajas metálicas para evitar la manipulación de los equipos.
- Así mismo, se ha procurado la instalación sobre superficies rígidas, alejadas de fuentes de vibración externa, como tráfico vehicular y paso del metro.

En la Tabla N°10, se muestra la ubicación de los acelerómetros para mayor detalle y registro fotográfico véase el anexo B:

Tabla N°10: Ubicación de estaciones instrumentadas.
Fuente: Elaboración propia.

| Código | Estación | Tramo | Progresiva | Tipo de Viaducto |
|---------------|--|---------------|-------------------|-------------------------|
| PIN | Estación Parque Industrial, Villa El Salvador, Lima | Tramo Antiguo | 1+750 | Superficial |
| ATO | Estación Atocongo, San Juan de Miraflores, Lima | Tramo Antiguo | 9+050 | Elevado |
| ANG | Estación Angamos, San Borja, Lima | Tramo I | 14+600 | Elevado |
| GAM | Estación Gamarra, La Victoria, Lima | Tramo I | 19+900 | Elevado |
| PIR | Estación Pirámides del Sol, San Juan de Lurigancho, Lima | Tramo II | 25+850 | Elevado |
| BAY | Estación Bayóvar, San Juan de Lurigancho, Lima | Tramo II | 33+500 | Elevado |

4.5. PROTOCOLO DE MEDICIÓN

- [1] El sistema de monitoreo se encuentra permanentemente encendido, los equipos de medición se encuentran en constante registro y almacén de las aceleraciones en tres componentes dimensionales (vertical, transversal y longitudinal a la dirección del tren).
- [2] Ante la eventualidad de un sismo la instrumentación instalada detecta si las aceleraciones han alcanzado un umbral de aceleraciones que se ha establecido en 15 gals, valor mínimo para considerar que ha ocurrido un evento sísmico, este valor no tiene implicancia en la respuesta sísmica, no obstante, es de interés para el repositorio contar con estas señales para futuras investigaciones.
- [3] Luego, el sistema confirma automáticamente que el evento se ha producido mediante la página web del IGP y emite un correo de alerta sísmica.

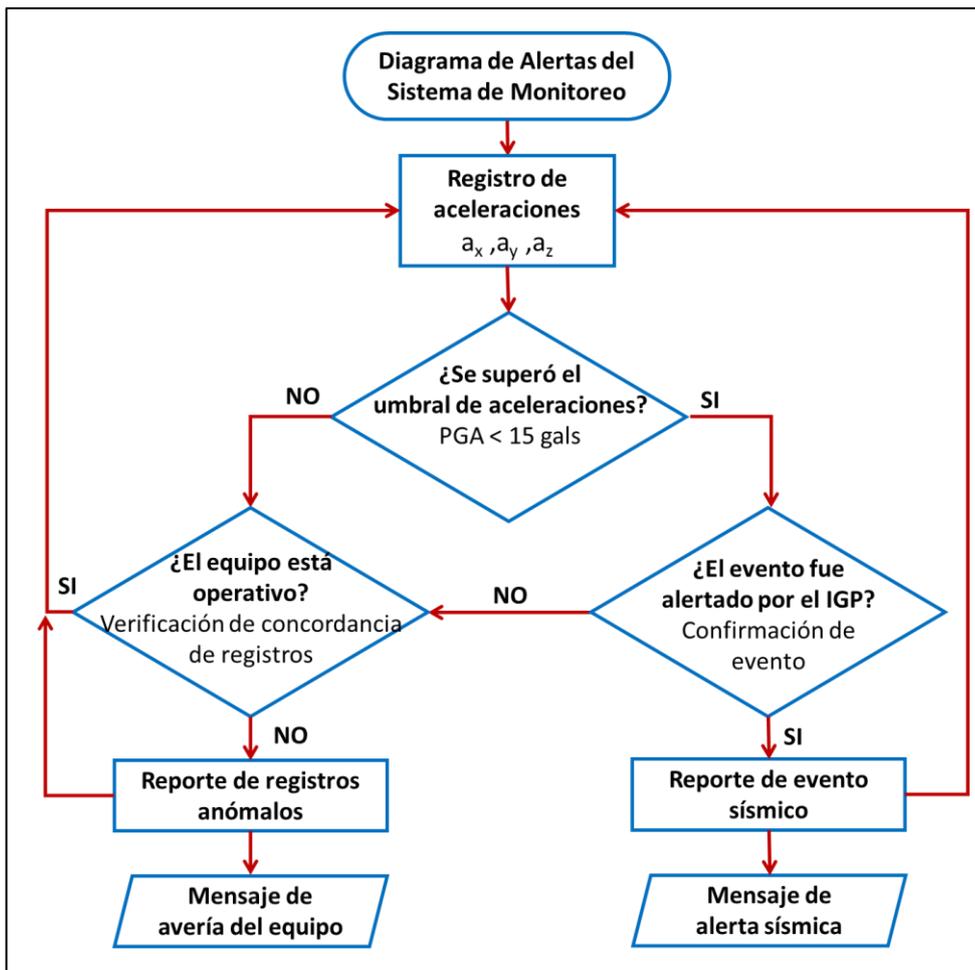


Figura N°47: Diagrama de flujo del protocolo de alerta.
Fuente: Elaboración Propia

- [4] Los mensajes de alerta sísmica tienen el siguiente esquema: a) Se informa la fecha y hora del evento sísmico que ha sobrepasado la aceleración umbral de 15 gals, b) Se indican expresamente los valores máximos de aceleración obtenidos en cada una de las estaciones, c) Se presentan los registros gráficos obtenidos en las tres direcciones por cada estación y, d) Se presentan los parámetros sísmicos obtenidos por el Instituto Geofísico del Perú en la misma hora.

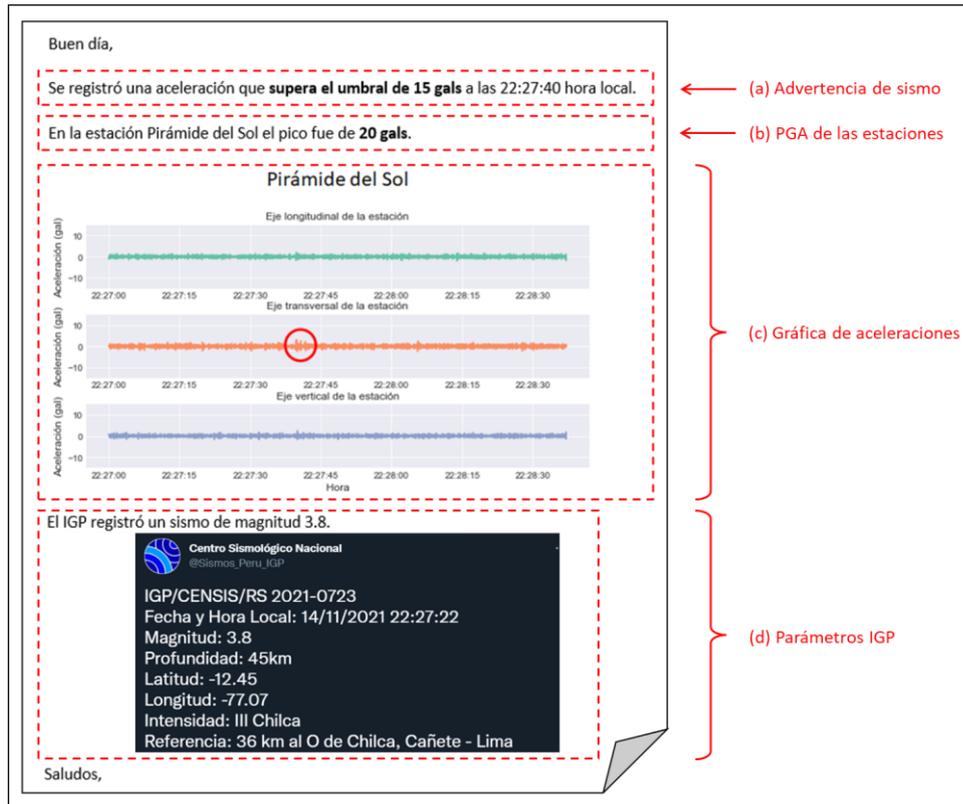


Figura N°48: Mensaje de alerta sísmica.
Fuente: Elaboración Propia.

- [5] Una vez ocurrido el evento sísmico es necesario corroborar el funcionamiento del sistema (descalibraciones, falta de energía eléctrica, pérdida de conectividad a internet, pérdida de conectividad o caída de equipos).
- [6] Además de la ocurrencia de alguna eventualidad, el sistema es capaz de alertar sobre posibles desperfectos durante su funcionamiento, remitiendo correos de alerta a las personas responsables.

El correo de alerta de avería de alguno de los equipos se realiza en función a mediciones anómalas que no guardan concordancia con las mediciones de otros equipos y con los registros del IGP tal como se puede observar en la

- [7] Figura N°49.

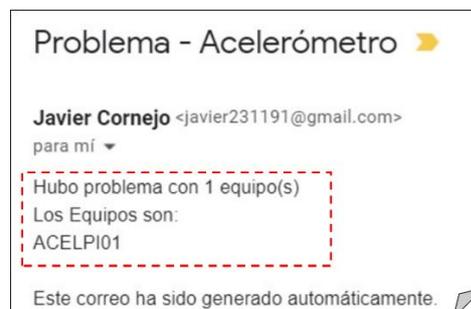


Figura N°49: Mensaje de alerta de avería del equipo.
Fuente: Elaboración propia.

4.6. NIVELES DE RESPUESTA SÍSMICA

Los niveles de respuesta sísmica clasifican las acciones a ejecutar según los criterios de estimación de daño descrito en el capítulo II, en ese sentido, se optado por agrupar en dos criterios: Operacional y Estructural, para orientar las acciones de respuesta del personal operativo según el daño potencial del movimiento sísmico.

Antes de definir cada uno de los niveles, es importante establecer la prioridad de las acciones, Yamamoto y Tomori (2013) señalan que el sistema de alerta japones tiene correlaciones empíricas entre la Magnitud – Distancia Epicentral vs daño en la infraestructura de las vías férrea (estructural y no estructural que impide el funcionamiento seguro de los trenes), esta información ha sido recabada a partir de reportes de daños en ferrocarriles (tanto de las líneas convencionales como las vías férreas Shinkansen), y les permite focalizar las áreas de daño para priorizar las acciones y niveles de acción según la magnitud y distancia epicentral.

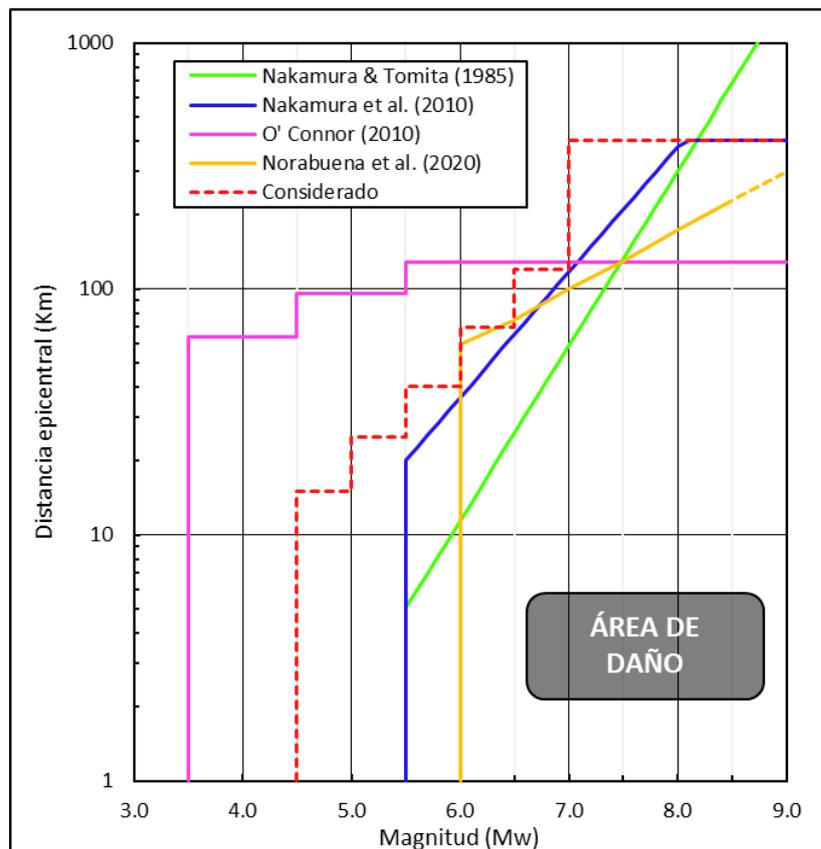


Figura N°50: Gráfica de criterios de área de respuesta.
Fuente: Elaboración propia.

4.6.1. Criterios operacionales

4.6.1.1. Nivel I - Umbral de percepción

En este nivel se propone el límite mínimo para considerar que, si bien hay nula probabilidad de daño estructural según la escala de Worden et al. (2012), el evento sísmico ha sido percibido por pocas a muchas personas.

➤ Criterio de las referencias bibliográficas:

- El criterio de Worden et al. (2012) empleado en la estimación del daño ShakeMap – USGS y Monitoreo de Puente Port Mann – Canadá, señala que el daño es nulo y la percepción es nula o débil en el rango: $PGA < 13\text{gals}$ o $PGV < 0.6\text{cm/s}$.
- Veneziano & Papadimitriou (2003) señala que la política del viaducto Tohoku Shinkansen establece no realizar ninguna acción si $PGA < 40\text{gals}$.
- Veneziano & Papadimitriou (2003) propone optimizar la política del viaducto de Tohoku Shinkansen: no se realiza ninguna acción en el rango $PGA < 60\text{gals}$.
- Hilbring et al. (2014) consideró para el monitoreo de vías férreas en Alemania, que, no se realiza acciones si $PGA < 40\text{gals}$.

➤ Criterio empleado para el Nivel I - Umbral de Percepción:

- Si $PGA < 15\text{gals}$, el daño sobre la infraestructura ha sido potencialmente nulo y ha pasado por desapercibido por la gran mayoría de personas, no se ejecutan actividades de respuesta.
- Si $PGA \geq 15\text{gals}$, hay probabilidad de daño sobre la infraestructura y ha sido percibido por la gran mayoría de personas, es necesario ejecutar actividades de respuesta (restricciones en la operación, inspecciones básicas o detalladas) conforme al protocolo.

➤ Contextualización del escenario de acuerdo a la escala de Intensidad sísmica:

- En la escala MMI-56, según Worden et al. (2012), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad II-III ($PGA < 13\text{gals}$): Algunas personas sienten el movimiento. Objetos colgantes se balancean ligeramente.
- En la escala JMA-96, según Bardet J.P. et al. (1995), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad II ($PGA < 8\text{gals}$): Sentido por algunas personas, objetos que cuelgan tiemblan ligeramente.

- En la escala EMS-98, de acuerdo con Zanini et al. (2019) este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad III-IV (PGA < 12 gals): Sentido por pocas a muchas personas, las puertas y ventanas golpetean.
- En la escala CSIS-08, de acuerdo con Xin et al. (2020), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad III (PGA < 22 gals): Sentido por algunos o la mayoría de las personas, puertas y ventanas golpetean.

4.6.1.2. Nivel II - Umbral de respuesta

En este nivel se propone el límite mínimo para el cual se considera que necesario responder a nivel operativo, si bien el daño sobre la infraestructura ha sido nulo, según la escala de Worden et al. (2012), la percepción del sismo ha sido leve y ha sido percibido por la gran mayoría de personas.

➤ Criterio de las referencias bibliográficas:

- El criterio de Worden et al. (2012) empleado en la estimación del daño ShakeMap – USGS y Monitoreo de Puente Port Mann – Canadá, señala que hay Daño nulo en el rango: $13\text{gals} < \text{PGA} < 45\text{gals}$ o $0.6\text{ cm/s} < \text{PGV} < 3\text{cm/s}$.
- Veneziano & Papadimitriou (2003) señala que la política del viaducto Tohoku Shinkansen establece no realizar ninguna acción si $\text{PGA} < 40\text{gals}$.
- Veneziano & Papadimitriou (2003) propone optimizar la política del viaducto de Tohoku Shinkansen: no se realiza ninguna acción en el rango $\text{PGA} < 60\text{gals}$.
- Hilbring et al. (2014) consideró para el monitoreo de vías férreas en Alemania, que, no hay daños si $\text{PGA} < 390\text{ gals}$.
- Swiss Association of Standardization citado por Andrews et al. (2013) establece que no hay daño si $\text{PGV} < 3.1\text{ cm/s}$.
- AASHTO (1990) citado por Andrews et al. (2013) establece que el nivel máximo en el cual no hay daño se produce en el rango $\text{PGV} < 2.5\text{cm/s}$.

➤ Criterio empleado para el Nivel II - Umbral de Respuesta:

- Si $15 \leq \text{PGA} < 40\text{ gals}$, el daño sobre la infraestructura ha sido potencialmente nulo, pero ha sido percibido por una gran mayoría de personas, se ejecutan actividades de respuesta nivel II.

- Si $PGA \geq 40$ gals, hay probabilidad de daño sobre la infraestructura, es necesario ejecutar actividades de respuesta de mayor nivel conforme al protocolo establecido
- Contextualización del escenario de acuerdo a la escala de Intensidad sísmica:
 - En la escala MMI-56, según Worden et al. (2012), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad IV ($13 \text{ gals} < PGA < 45 \text{ gals}$): La mayoría de las personas siente el movimiento. Objetos colgantes, ventanas y puertas se balancean.
 - En la escala JMA-96, según Bardet J.P. et al. (1995), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad III ($8 \text{ gals} < PGA < 25 \text{ gals}$): La mayoría de las personas entran en pánico, algunos quieren escapar.
 - En la escala EMS-98, de acuerdo con Zanini et al. (2019) este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad V ($12 \text{ gals} < PGA < 33 \text{ gals}$): Sentido por la mayoría de las personas.
 - En la escala CSIS-08, de acuerdo con Xin et al. (2020), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad IV - V ($PGA < 49 \text{ gals}$): Sentido por la mayoría de las personas, objetos colgantes se agitan visiblemente.

4.6.1.3. Nivel III - Umbral de descarrilamiento

En este nivel se establece el límite inferior para el cual se considera que puede haber un descarrilamiento del tren por daños en las vías luego del evento sísmico, y no necesariamente por la volteo o descarrilamiento que puede ocurrir durante el evento sísmico (Minson et al., 2021).

- Criterio de las referencias bibliográficas:
 - Veneziano & Papadimitriou (2003) indica que la política del viaducto Tohoku Shinkansen establecía la Activación del frenado de emergencia para evitar descarrilamiento si $PGA > 40\text{gals}$.
 - Veneziano & Papadimitriou (2003) propone optimizar la política del viaducto de Tohoku Shinkansen, la activación del frenado de emergencia para evitar descarrilamientos si $PGA > 60\text{gals}$.
 - Hilbring et al. (2014) establece para el monitoreo de vías férreas en Alemania, que, para líneas de baja velocidad ($v \leq 80 \text{ km/h}$), la reducción

de la velocidad a 20km/h en el rango $40 < \text{PGA} \leq 100$ gals y, se detiene por completo si $\text{PGA} > 100$ gals.

- Nakamura, Y. (1996), citado por Minson et al. (2021), reporta concentración de daños en vías del viaducto Shinkansen en tramos que superan $\text{PGA} > 120$ gals.
 - Veeraraghavan et al. (2019) calculó la máxima aceleración para el volteo para trenes cuyo centro de gravedad tiene una altura de entre 1.25 a 1.88m y ancho de vía 0.90 a 1.04 m (valores similares a los parámetros del material rodante de L1), el tren puede voltearse si $\text{PGA} > 400$ gals o $\text{PGV} > 50$ cm/s.
- Criterio empleado para el nivel III - Umbral de descarrilamiento:
- Si $40 \text{ gals} \leq \text{PGA} < 80 \text{ gals}$, afectación de las vías férreas puede ocasionar el descarrilamiento de trenes, se recomienda reducir la velocidad y realizar inspecciones.
 - Si $\text{PGA} \geq 80 \text{ gals}$, la probabilidad de afectación en las vías y la infraestructura es mayor.
- Contextualización del escenario de acuerdo a la escala de Intensidad sísmica:
- En la escala MMI-56, según Worden et al. (2012), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad V ($45 \text{ gals} < \text{PGA} < 83 \text{ gals}$): Casi todos sienten el movimiento, puertas y ventanas se cierran o abren.
 - En la escala JMA-96, según Bardet J.P. et al. (1995), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad IV ($25 \text{ gals} < \text{PGA} < 80 \text{ gals}$): La mayoría de las personas entran en pánico, objetos colgantes tiemblan ligeramente.
 - En la escala EMS-98, de acuerdo con Zanini et al. (2019) este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad VI ($33 \text{ gals} < \text{PGA} < 91 \text{ gals}$): Se caen objetos, ocurren fisuras en el yeso.
 - En la escala CSIS-08, de acuerdo con Xin et al. (2020), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad VI ($49 \text{ gals} < \text{PGA} < 88 \text{ gals}$): Inestabilidad de personas paradas, los edificios permanecen intactos.

4.6.1.4. Nivel IV - Daño potencialmente leve

En este nivel se propone el rango de parámetros en los que se considera que el sismo ha tenido una afectación potencialmente leve, según la escala de Worden et al. (2012).

➤ Criterio de las referencias bibliográficas:

- El criterio de Worden et al. (2012) empleado en la estimación del daño ShakeMap – USGS y Monitoreo de Puente Port Mann – Canadá, señala que hay Daño potencialmente leve en el rango: $83 \leq \text{PGA} < 155$ gals o $7 \leq \text{PGV} < 14$ cm/s.
- Veneziano & Papadimitriou (2003) indica que la política del viaducto Tohoku Shinkansen establecía la inspección de vías en tren y operación a baja velocidad en el rango $80 \leq \text{PGA} < 120$ gals.
- Veneziano & Papadimitriou (2003) propone optimizar la política del viaducto de Tohoku Shinkansen: Inspección en tren, operación a baja velocidad en el rango $100 \leq \text{PGA} < 140$ gals.
- Hilbring et al. (2014) estableció para el monitoreo de vías férreas en Alemania, que, no hay daños si $\text{PGA} < 390$ gals, no obstante, para líneas de baja velocidad ($v \leq 80$ km/h), la reducción de la velocidad a 20km/h en el rango $40 < \text{PGA} \leq 100$ gals y, se detiene por completo si $\text{PGA} > 100$ gals.
- Nakamura, Y. (1996), citado por Minson et al. (2021), reporta concentración de daños en vías del viaducto Shinkansen en tramos que superan $\text{PGA} > 120$ gals.

➤ Criterio empleado para el Nivel IV - Daño potencialmente leve:

- Si $80 \text{ gals} \leq \text{PGA} < 120 \text{ gals}$, el daño sobre la infraestructura ha sido potencialmente leve, así mismo, la afectación en las vías férreas puede ocasionar el descarrilamiento de trenes, es necesario reducir la velocidad e inspeccionar.
- Si $\text{PGA} \geq 120 \text{ gals}$, hay probabilidad que el daño sobre la infraestructura haya sido superior a leve, así mismo, es necesario inspeccionar las vías férreas con mayor detenimiento.

- Contextualización del escenario de acuerdo a la escala de Intensidad sísmica:
 - En la escala MMI-56, según Worden et al. (2012), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad VI ($83 \leq \text{PGA} < 155$ gals): Las personas pueden tener problemas para caminar, el recubrimiento de yeso en paredes se agrieta, sin daños estructurales.
 - En la escala JMA-96, según Bardet J.P. et al. (1995), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad V (L) ($80 \leq \text{PGA} < 140$ gals): La mayoría de las personas entra en pánico, algunos o la mayoría quiere escapar, objetos colgantes tiemblan violentamente, se desconecta automáticamente el suministro de gas.
 - En la escala EMS-98, de acuerdo con Zanini et al. (2019) este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad VII ($91 \text{ gals} \leq \text{PGA} < 251$ gals): La mayoría de las personas se asustan, caída de recubrimientos de yeso, muchos edificios ordinarios sufren daños moderados: se producen pequeñas fisuras en muros.
 - La escala CSIS-08, de acuerdo con Xin et al. (2020), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad VII ($88 \leq \text{PGA} < 177$ gals): La mayoría de las personas entran en pánico, algunos edificios sufren daños leves a moderados, la mayoría permanecen intactos.

4.6.2. Criterio estructural

4.6.2.1. Nivel V- Daño potencialmente moderado

En este nivel se propone el rango de parámetros sísmicos en los que se considera que el sismo ha tenido una afectación potencialmente moderada, según la escala de Worden et al. (2012).

- Criterio de las referencias bibliográficas:
 - El criterio de Worden et al. (2012) empleado en la estimación del daño ShakeMap – USGS y Monitoreo de Puente Port Mann – Canadá, señala que hay Daño potencialmente moderado en el rango: $155 \leq \text{PGA} < 288$ gals o $14 \leq \text{PGV} < 29$ cm/s.
 - Veneziano & Papadimitriou (2003) indica que la política del viaducto Tohoku Shinkansen establecía que no se reanudan operaciones hasta completar inspecciones si $\text{PGA} > 120$ gals.

- Veneziano & Papadimitriou (2003) propone optimizar la política del viaducto de Tohoku Shinkansen: No se reanuda operaciones hasta completar inspecciones si $PGA > 140$ gals.
 - Hilbring et al. (2014) estableció para el monitoreo de vías férreas en Alemania, que, no hay daños si $PGA < 390$ gals.
- Criterio empleado para el Nivel V - Daño potencialmente moderado:
- Si $120 \text{ gals} \leq PGA < 288 \text{ gals}$, el daño sobre la infraestructura y vías ha sido potencialmente moderado.
 - Si $PGA \geq 288 \text{ gals}$, hay probabilidad que el daño sobre la infraestructura y vías haya sido superior a moderado.
- Contextualización del escenario de acuerdo con la escala de Intensidad sísmica:
- En la escala MMI-56, según Worden et al. (2012), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad VII ($155 \leq PGA < 288 \text{ gals}$): Las personas tienen problemas para permanecer de pie, ladrillos sueltos se caen de edificios, hay daño leve en edificios bien construidos.
 - En la escala JMA-96, según Bardet J.P. et al. (1995), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad V (U) ($140 \leq PGA < 250 \text{ gals}$): Hay pánico generalizado, ocasionalmente las tuberías de gas e instalaciones de agua se dañan (el servicio se interrumpe).
 - En la escala EMS-98, de acuerdo con Zanini et al. (2019) este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad VII ($91 \leq PGA < 250 \text{ gals}$): La mayoría de las personas se asustan, caída de recubrimientos de yeso, muchos edificios ordinarios sufren daños moderados: se producen pequeñas fisuras en muros.
 - En la escala CSIS-08, de acuerdo con Xin et al. (2020), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad VIII ($177 \leq PGA < 343 \text{ gals}$): Las personas tienen problemas para caminar. La mayoría de los edificios sufre daños leves.

4.6.2.2. Nivel VI - Umbral de diseño

En este nivel se propone el rango de parámetros sísmicos en los que se considera que el sismo ha tenido una afectación potencialmente moderada a alta, según la

escala de Worden et al. (2012). Así mismo, se ha planteado esta escala para englobar los parámetros empleados para el diseño sismorresistente, es importante recordar que la Línea 1 tiene tramos construidos en años diferentes, por lo que las especificaciones de diseño varían:

➤ Criterio normativo:

- Para el tramo Antiguo se considera que el diseño se realizó bajo la normativa AASHTO 1981, que establecía el uso de mapas de peligro sísmico con periodos de retorno de 475 años (probabilidad de excedencia de 10% en 50 años), de acuerdo con el mapa de peligro sísmico presentado por Castillo Aedo & Alva Hurtado (1993), el valor del coeficiente de aceleración pico del terreno PGA empleado para la construcción del espectro de respuesta fue: $0.44g \leftrightarrow 432 \text{ gals}$.
- Para los tramos I y II se considera que el diseño se realizó bajo la normativa AASHTO 2007, que establecía el uso de mapas de peligro sísmico con periodos de retorno de 1000 años (probabilidad de excedencia de 7% en 75 años), de acuerdo con el Manual de diseño de puentes 2003), el valor del coeficiente de aceleración pico del terreno PGA empleado para la construcción del espectro de respuesta fue: $0.51g \leftrightarrow 500 \text{ gals}$.

➤ Criterio de las referencias bibliográficas:

- El criterio de Worden et al. (2012) empleado en la estimación del daño ShakeMap – USGS y Monitoreo de Puente Port Mann – Canadá, señala que hay Daño potencialmente moderado/alto en el rango: $288 \leq \text{PGA} < 536 \text{ gals}$ o $29 \leq \text{PGV} < 60 \text{ cm/s}$.
- Veneziano & Papadimitriou (2003) indica que la política del viaducto Tohoku Shinkansen establecía que no se reanudan operaciones hasta completar inspecciones si $\text{PGA} > 120 \text{ gals}$.
- Veneziano & Papadimitriou (2003) propone optimizar la política del viaducto de Tohoku Shinkansen: No se reanuda operaciones hasta completar inspecciones si $\text{PGA} > 140 \text{ gals}$.
- Hilbring et al. (2014) estableció para el monitoreo de infraestructuras férreas en Alemania, que, hay daño menor a moderado en el rango $390 \leq \text{PGA} < 590 \text{ gals}$.

- Criterio empleado para el Nivel VI – Umbral de diseño:
 - Si $288 \text{ gals} \leq \text{PGA} < 536 \text{ gals}$, el daño sobre la infraestructura ha sido potencialmente moderado a alto, así mismo, el sismo presenta parámetros cercanos o similares a los valores empleados en el diseño sismorresistente.
 - Si $\text{PGA} \geq 536 \text{ gals}$, hay probabilidad que el daño sobre la infraestructura haya sido potencialmente alto o muy alto, así mismo, también puede señalarse que los parámetros del sismo han superado los valores empleados en el diseño sismorresistente.
- Contextualización del escenario de acuerdo a la escala de Intensidad sísmica:
 - En la escala MMI-56, según Worden et al. (2012), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad VIII ($288 \leq \text{PGA} < 536 \text{ gals}$): Los conductores tienen problemas para manejar, edificios bien construidos sufren daños leves a moderados.
 - En la escala JMA-96, según Bardet J.P. et al. (1995), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad VI (L) – VI (U) ($250 \leq \text{PGA} < 400 \text{ gals}$): La gente tiene dificultad para ponerse de pie, algunas casas con mejor resistencia a sismos sufren daños en muros y columnas, las líneas principales y troncales de gaseoductos e instalaciones de almacenamiento de agua están dañadas.
 - En la escala EMS-98, de acuerdo con Zanini et al. (2019) este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad VIII ($250 \leq \text{PGA} < 688 \text{ gals}$): Dificultad en las personas para permanecer de pie, algunos edificios ordinarios muestran fallas graves en los muros.
 - En la escala CSIS-08, de acuerdo con Xin et al. (2020), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad IX ($343 \leq \text{PGA} < 687 \text{ gals}$): Personas en movimiento caen, la mayoría de los edificios sufre daños leves a moderados.

4.6.2.3. Nivel VII - Daño potencialmente alto

En este escenario se propone el rango de parámetros sísmicos en los que se considera que el sismo que el sismo ha tenido una afectación potencialmente alta a muy alta, según la escala de Worden et al. (2012). Así mismo, conforme al escenario anterior, es preciso recordar que en este nivel los parámetros empleados para el diseño sismorresistente han sido superados durante el evento.

- Criterio de las referencias bibliográficas:
 - El criterio de Worden et al. (2012) empleado en la estimación del daño ShakeMap – USGS y Monitoreo de Puente Port Mann – Canadá, señala que hay Daño potencialmente alto a muy alto en el rango $PGA \geq 536$ gals o $PGV \geq 60$ cm/s.
 - Veneziano & Papadimitriou (2003) indica que la política del viaducto Tohoku Shinkansen establecía que no se reanudan operaciones hasta completar inspecciones si $PGA > 120$ gals.
 - Veneziano & Papadimitriou (2003) propone optimizar la política del viaducto de Tohoku Shinkansen: No se reanuda operaciones hasta completar inspecciones si $PGA > 140$ gals.
 - Hilbring et al. (2014) estableció para el monitoreo de vías férreas en Alemania, que, hay daño mayor o completo en el rango $PGA \geq 590$ gals.

- Criterio empleado para el Nivel VII - Daño potencialmente alto:
 - Si $PGA \geq 536$ gals, hay probabilidad que el daño sobre la infraestructura haya sido potencialmente alto o muy alto, así mismo, también puede señalarse que los parámetros del sismo han superado los valores empleados en el diseño sismorresistente.

- Contextualización del escenario de acuerdo a la escala de Intensidad sísmica:
 - En la escala MMI-56, según Worden et al. (2012), este escenario puede ocurrir en:
 - Nivel de intensidad IX ($536 \leq PGA < 1000$ gals): Edificios bien construidos sufren daños considerables, algunas tuberías subterráneas se rompen.
 - Nivel de intensidad X-XI – XII ($PGA \geq 1000$ gals): La mayoría o casi todos de edificios y sus cimientos se destruyen y/o colapsan. Vías del tren se doblan ligeramente o se encuentran muy dobladas. Se destruyen tuberías subterráneas. Algunos puentes se destruyen.
 - En la escala JMA-96, según Bardet J.P. et al. (1995), este escenario puede ocurrir en el nivel de intensidad VII ($PGA \geq 400$ gals): La gente no puede moverse a voluntad, algunas casas con mejor resistencia a sismos están severamente dañadas, las instalaciones de energía, agua y gas se ven

interrumpidas por enormes grietas en la superficie y deslizamientos de tierra.

- En la escala EMS-98, de acuerdo con Zanini et al. (2019) este escenario puede ocurrir en:
 - Nivel de intensidad IX ($688 \leq \text{PGA} < 1889$ gals): Hay pánico general, edificios ordinarios sufren daños muy graves: fallas estructurales parciales.
 - Nivel de intensidad X – XI - XII ($\text{PGA} \geq 1889$ gals) Muchos, casi todos los edificios ordinarios colapsan, incluso aquellos con un buen diseño sismorresistente.
- En la escala CSIS-08, de acuerdo con Xin et al. (2020), este escenario puede ocurrir en:
 - Nivel de intensidad X ($687 \leq \text{PGA} < 1373$ gals): Personas caen o sienten que son lanzadas. La mayoría de los edificios se destruyen o están severamente dañados, se producen deslizamientos de tierra.
 - Nivel de intensidad XI ($\text{PGA} \geq 1373$ gals): La gran mayoría o todos los edificios colapsan.

4.7. PROTOCOLO DE RESPUESTA SÍSMICA

4.7.1. Respuesta según registros de instrumentación:

Los rangos de valores establecidos para cada nivel corresponden a la escala propuesta por Worden et al. (2012) acorde a la aceleración registrada por los acelerómetros colocados en las estaciones y las correlaciones que puedan generarse con otras estaciones de acelerométricas.

Tabla N°11: Niveles de respuesta según la aceleración registrada.
Fuente: Elaboración propia.

| Nivel | Umbral de Aceleración Pico |
|------------------|----------------------------|
| NIVEL I | Menor de 15 gals |
| NIVEL II | [15 – 40 gals> |
| NIVEL III | [40 – 80 gals> |
| NIVEL IV | [80 – 120 gals> |
| NIVEL V | [120 – 288 gals> |
| NIVEL VI | [288 – 536 gals> |
| NIVEL VII | Mayor de 536 gals |

4.7.2. Respuesta según magnitud sísmica:

La magnitud y distancia epicentral que son registrados por la Red de acelerómetros del Instituto Geofísico del Perú, estos valores pueden ser correlacionados para obtener áreas de posible afectación, en el presente caso se consideró los límites aplicados en el viaducto Shinkansen (Japón), de acuerdo a lo expuesto por Nakamura (2010) y, Yamamoto & Tomori (2013a).

Tabla N°12: Niveles de respuesta según la magnitud del sismo.
Fuente: Elaboración propia.

| Respuesta | Magnitud | Potencial área afectada |
|------------------|-------------------------------------|---|
| NIVEL I | Magnitud < 4.5 Mw | Ninguna |
| NIVEL II | 4.5Mw ≤ Magnitud < 5.0 Mw | Hasta 15Km a la redonda del epicentro |
| NIVEL III | 5.0Mw ≤ Magnitud < 5.5 Mw | Hasta 25Km a la redonda del epicentro |
| NIVEL IV | 5.5Mw ≤ Magnitud < 6.0 Mw | Hasta 40Km a la redonda del epicentro |
| NIVEL V | 6.0Mw ≤ Magnitud < 6.5 Mw | Hasta 70Km a la redonda del epicentro |
| NIVEL VI | 6.5Mw ≤ Magnitud < 7.0 Mw | Hasta 120Km a la redonda del epicentro |
| NIVEL VII | 7.0Mw ≤ Magnitud | Hasta 400Km a la redonda del epicentro |

4.7.3. Niveles de respuesta sísmica:

Ante la eventualidad de un evento sísmico establecen los siguientes niveles de acción correspondiente a la criticidad del evento sísmico:

Tabla N°13: Actividades a realizar según el nivel de acción.
Fuente: Elaboración propia.

| NIVEL | Respuesta |
|-----------------|--|
| NIVEL I | <ul style="list-style-type: none"> No se requiere tomar acciones. |
| NIVEL II | <p>INFRAESTRUCTURA</p> <ul style="list-style-type: none"> Inspección estructural básica de los elementos críticos. Inspección básica de elementos estructurales y no estructurales en las estaciones. <p>OPERACIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> Verificar sistemas básicos de operación activos. Recorrido a marcha vista. <p>RESTRICCIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> Después del evento sísmico, los trenes recorren la vía a marcha vista (25km/h) hasta la siguiente estación. |

| | |
|------------------|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Se levantan o incrementan restricciones según reportes de cada estación y trenes en circulación. |
| NIVEL III | <p>INFRAESTRUCTURA:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inspección estructural básica de los elementos críticos. • Inspección básica de elementos estructurales y no estructurales en las estaciones. <p>OPERACIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verificar sistemas básicos de operación activos. • Inspeccionar vías durante el recorrido a marcha vista. <p>RESTRICCIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Después del evento sísmico, los trenes completan su recorrido hacia Bayovar o Villa El Salvador marcha vista (25km/h), inspeccionando la vía. • En este nivel existe mayor posibilidad de restricciones en tramos afectados: Reducción de velocidad. • Se levantan o incrementan restricciones según reportes de cada estación y trenes en circulación. |
| NIVEL IV | <p>INFRAESTRUCTURA:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inspección estructural básica de los elementos críticos. • Inspección básica de elementos estructurales y no estructurales en la infraestructura de las vías del tren (estaciones y tramos). • Es posible que se requieran inspecciones detalladas sobre elementos afectados. <p>OPERACIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verificar sistemas básicos de operación activos. • Inspeccionar vías a marcha vista (considerando restricciones de velocidad). <p>RESTRICCIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Después del evento sísmico, se restringe la velocidad de operación ferroviaria a marcha vista (25km/h) hasta completar inspección sobre las vías. • En este nivel existe mayor posibilidad de restricciones en tramos afectados: Reducción de velocidad y/o suspensión de tránsito en sectores afectados. • Se levantan o incrementan restricciones según reportes de cada estación y trenes en circulación. |
| NIVEL V | <p>INFRAESTRUCTURA:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inspección estructural básica de todos los elementos críticos. • Inspección básica de elementos estructurales y no estructurales en la infraestructura de las vías del tren (estaciones y tramos). • Inspección detallada sobre elementos afectados que lo requieran. <p>OPERACIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verificar sistemas básicos de operación activos. • Inspeccionar vías a pie o, a marcha vista (considerando restricciones de velocidad y carga mínima). <p>RESTRICCIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Después del evento sísmico, se detienen las operaciones hasta completar inspecciones sobre las vías e infraestructura. Los trenes llegan, en la medida de lo posible, a la siguiente estación a marcha vista (15km/h) para evacuar pasajeros. • En este nivel existe mayor posibilidad de restricciones en tramos afectados: Reducción de velocidad y/o suspensión de tránsito en sectores afectados. • Se levantan o incrementan restricciones según reportes de cada estación y trenes en circulación. |
| NIVEL VI | <p>INFRAESTRUCTURA:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inspección estructural básica de los elementos críticos. |

| | |
|-------------------------|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Inspección básica de elementos estructurales y no estructurales en la infraestructura de las vías del tren (estaciones y tramos). • Inspección detallada sobre elementos afectados que lo requieran. <p>OPERACIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verificar sistemas básicos de operación activos. • Detención de las operaciones. • Inspeccionar vías a pie. <p>RESTRICCIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Después del evento sísmico, se detienen las operaciones hasta completar inspecciones sobre las vías e infraestructura. Se realizan coordinaciones para la evacuación de pasajeros. • En este nivel existe mayor posibilidad de restricciones en tramos afectados: Suspensión de tránsito en sectores afectados. • Se requiere de opinión experta para levantar restricciones en las operaciones. |
| <p>NIVEL VII</p> | <p>INFRAESTRUCTURA:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inspección estructural básica de los elementos críticos. • Inspección básica de elementos estructurales y no estructurales en la infraestructura de las vías del tren (estaciones y tramos). • Inspección detallada sobre elementos afectados que lo requieran. <p>OPERACIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verificar sistemas básicos de operación activos. • Detención de las operaciones. • Inspección de vías a pie. <p>RESTRICCIONES:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Después del evento sísmico, se detienen las operaciones. Se realizan coordinaciones para la evacuación de pasajeros. • Opinión experta para reanudar las operaciones. |

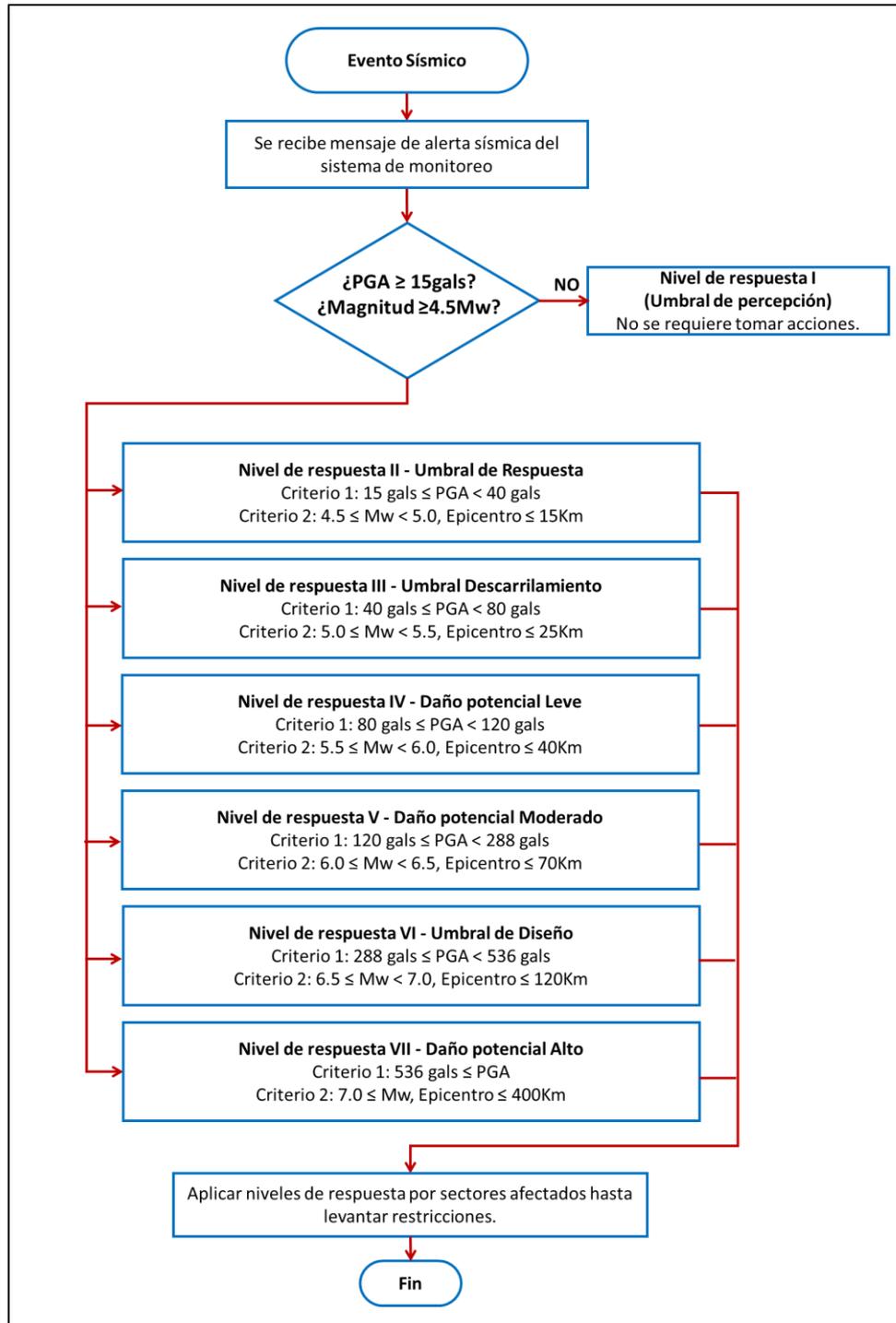


Figura N°51: Diagrama de flujo para establecer los niveles de respuesta véase el acápite para mayor detalle. Fuente: Elaboración propia.

4.8. PROTOCOLO DE INSPECCIÓN ESTRUCTURAL

Los siguientes protocolos de inspección se han elaborado en base a la “Guía de inspección de Puentes - 2019” del MTC.

4.8.1. Inspección básica o rutinaria:

4.8.1.1. *Definición:*

Es una inspección que se realiza de manera visual realizado por personal con conocimientos en inspecciones estructurales en puentes. El objetivo de esta inspección es detectar deterioros/patologías de forma temprana para prevenir que se generen otros deterioros más graves, así como identificar los elementos que requieren de inspecciones detalladas, estudios especiales y/o intervenciones de reforzamiento o rehabilitación.

4.8.1.2. *Frecuencia:*

Las inspecciones deben realizarse conforme al protocolo de acciones luego de un evento sísmico.

4.8.1.3. *Recursos:*

- Equipo técnico capacitado en inspecciones estructurales
- Vehículo de transporte.
- Cámara fotográfica.
- Cuaderno de apuntes.
- Flexómetro y distanciómetro.
- Tiza o marcador para concreto.
- Escalera manual.
- Binoculares, linternas y martillo
- Fisurómetro
- Equipo de seguridad personal y de señalización (conos, carteles, lámparas luminosas, etc.)

4.8.1.4. *Procedimiento:*

La inspección debe realizarse conforme a la “Guía de inspección de puentes - 2019” elaborado por el MTC. De manera general se resaltan los siguientes puntos:

- El especialista encargado realizará una inspección completa de los componentes del viaducto desde la superestructura (tablero, vigas, aparatos

de apoyo, etc.) hasta la infraestructura (pilares, estribos, etc.) buscando deterioros.

- Se registrarán los datos de los elementos: identificación de elemento, dimensiones geométricas, características estructurales, y observaciones adicionales como estado de conservación y condiciones de entorno.
- La inspección se realizará de manera visual, y se registrarán fisuras, grietas, cajoneos, daños graves en aparatos de apoyo y juntas, deterioro en conducciones de cables, agua, desagüe y servicios adicionales, humedad y eflorescencias, detección de corrosión en elementos metálicos y otros defectos que se encuentren sobre los elementos.
- El registro de defectos debe contener como mínimo las siguientes características: dimensiones geométricas del defecto, forma y ubicación, así mismo, se deben consignar fotografías que identifiquen apropiadamente los daños o deterioros.

A este nivel el entregable de la inspección serán fichas técnicas de inspección que documentan los deterioros observados y un reporte que incluya recomendaciones generales para la programación de una inspección detallada, estudios adicionales y/o reforzamiento según se requiera.

4.8.2. Inspección detallada o principal:

4.8.2.1. *Definición:*

Es una inspección que se realiza de manera visual y minuciosa del estado de los componentes del viaducto (Vigas, losas, pilares, estribos, dispositivos de apoyo, superficie de rodadura, etc.), a fin de proporcionar una calificación basada en una escala cualitativa según las definiciones de la Guía de inspección de Puentes (2019). El objetivo de esta inspección es determinar el estado de conservación, así mismo, analizar el estado funcional y resistente del viaducto con el fin de determinar si es capaz de cumplir con los requerimientos de funcionalidad y nivel de seguridad aceptable.

4.8.2.2. *Frecuencia:*

Las inspecciones deben realizarse conforme al protocolo de acciones luego de un evento sísmico.

4.8.2.3. Recursos:

- Ingeniero supervisor con conocimiento pleno de la ingeniería de puentes.
- Equipo técnico especializado en diseño, construcción y/o mantenimiento de puentes.
- Información requerida:
 - Información de la estructura (memoria de cálculo y planos as-built).
 - Documentos de su construcción (Especificación de materiales, pruebas de carga, control de deflexiones, etc.)
 - Fichas de inspecciones anteriores (si hubiese).
 - Información de mantenimientos, reparaciones, reforzamiento o rehabilitaciones (si hubiese).
 - Otros que sean necesarios para preparar adecuadamente la inspección.
- Vehículo de transporte.
- GPS.
- Cámara fotográfica.
- Cuaderno de apuntes.
- Flexómetro y distanciómetro.
- Tiza o marcador para concreto.
- Escalera manual.
- Binoculares y linternas.
- Martillo, navaja, espejo y lupa.
- Fisurómetro.
- Plataformas elevadoras o grúas con canastilla (dependiendo de la disponibilidad de acceso)
- Equipo de seguridad personal y de señalización (conos, carteles, lámparas luminosas, etc.).

4.8.2.4. Procedimiento:

La inspección debe realizarse conforme a la “Guía de inspección de puentes - 2019” elaborado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC). De manera general se resaltan los siguientes puntos:

- El especialista encargado realizará una inspección completa de los componentes del viaducto para determinar su condición estructural.
- Los datos que deben registrarse en las fichas de inspección son las siguientes:

- Datos generales de la estructura y de la inspección.
 - Deterioros de cada elemento: identificando el elemento, tipo de deterioro, potenciales causas del deterioro, grado de deterioro, extensión, situación estructural y fotografía ilustrativa del deterioro a una distancia adecuada que permita dejar constancia de la escala del daño.
 - Condición de cada elemento indicándose para cada uno de ellos los daños apreciados y sus dimensiones.
 - Recomendaciones: Acciones preventivas, correctivas y nivel de urgencia.
 - Observaciones (si hubiesen).
- A este nivel el entregable de esta inspección es un informe de evaluación estructural, de carácter visual con la calificación cualitativa de la estructura acompañado de las fichas técnicas de inspección que documentan los deterioros observados.

Las calificaciones se realizarán conforme a los niveles de calificación cualitativa de la Guía Para Inspección de Puentes (2019) véase el anexo C, para mayor detalle.

CAPÍTULO V: RESULTADOS DE APLICACIÓN: SISMO DE CHILCA M5.5

5.1. DESCRIPCIÓN DEL SISMO

La tarde del 12 de mayo del 2022 se registró un importante sacudimiento en el distrito de Chilca a 40Km de la estación Villa El Salvador (la más cercana al epicentro), las características se detallan a continuación:

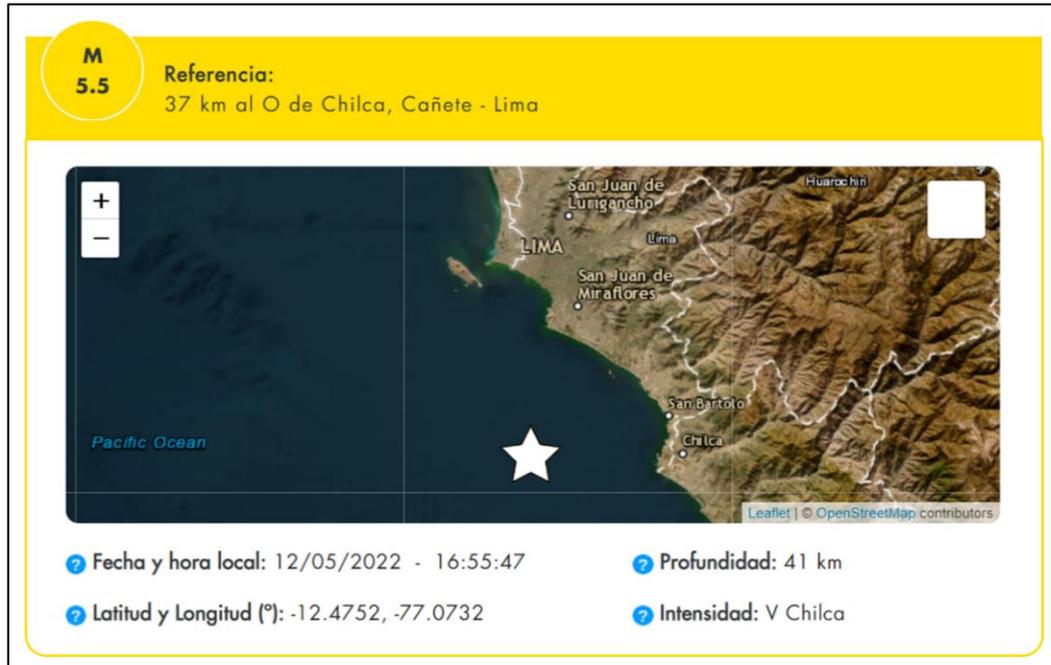


Figura N°52: Cuadro descriptivo del evento sísmico.
Recuperado de: (Centro Sismológico Nacional, 2022)

De acuerdo con el reporte del IGP (2022), las máximas aceleraciones se produjeron en los distritos de Chilca, San Bartolo, Punta Negra, Pucusana y Santa María del Mar con registros máximos entre 90 gals y 160 gals, en cambio en el resto de Lima Metropolitana fueron menores a 90 gals con valores altos en Chosica y Puente Piedra.

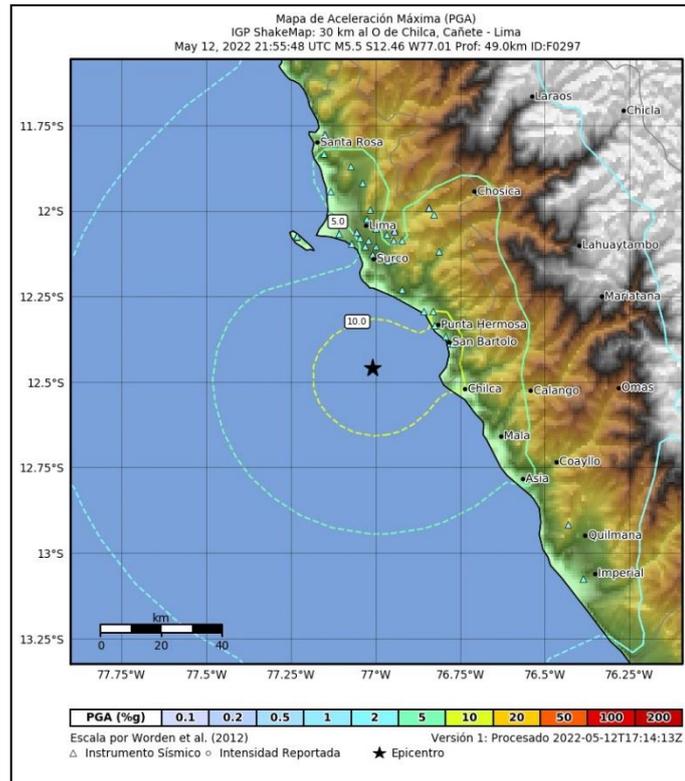


Figura N°53: Mapa de aceleraciones máximas (%).
Fuente: Centro Sismológico Nacional (2022).

5.2. PROCESAMIENTO DE SEÑALES

Los registros acelerométricos fueron corregidos por línea base y filtrado de frecuencias de 0.1Hz a 25Hz, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla N°14: Aceleraciones máximas registradas en el sismo del 12/05/2022.

Fuente: Elaboración propia.

| Código | Estación | Aceleración Máxima (cm/s ²) | | |
|--------|----------------------------|---|---------|----------|
| | | Long. | Transv. | Vertical |
| PIN | Estación Parque Industrial | 51.3 | 50.8 | -55.4 |
| ATO | Estación Atocongo | 29.0 | 28.6 | -32.7 |
| ANG | Estación Angamos | -30.7 | -36.1 | 18.9 |
| GAM | Estación Gamarra | -61.3 | 45.3 | -33.8 |
| PIR | Estación Pirámides del Sol | -42.2 | -32.1 | -18.4 |
| BAY | Estación Bayóvar | -75.0 | -66.5 | 31.5 |

Tal como se puede observar en la Tabla N°14, la máxima aceleración registrada durante el sismo del 12/05/2022 ocurrió en las Estaciones Bayóvar y Gamarra, a continuación, se presentan los resultados del procesamiento de las señales:

5.2.1. Estación Bayóvar (BAY)

Los registros obtenidos del acelerómetro instalado en la estación Bayóvar, reportan que la máxima aceleración, velocidad y desplazamiento obtenidas durante el evento sísmico del día 12/05/2022 fueron de 75.0cm/s², 2.0cm/s y 0.7cm, respectivamente.

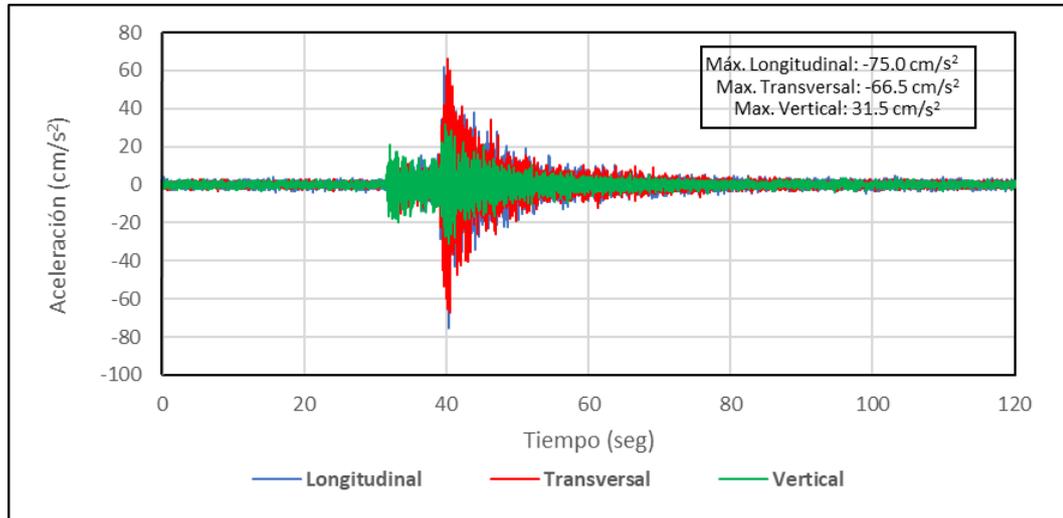


Figura N°54: Registro de aceleraciones de la Estación BAY obtenidas en el sismo de 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, los espectros de Respuesta de pseudo aceleraciones muestran picos de hasta 359.5 cm/s² entre los periodos 0.04s a 0.15s siendo menores al 37% de la aceleración de la gravedad.

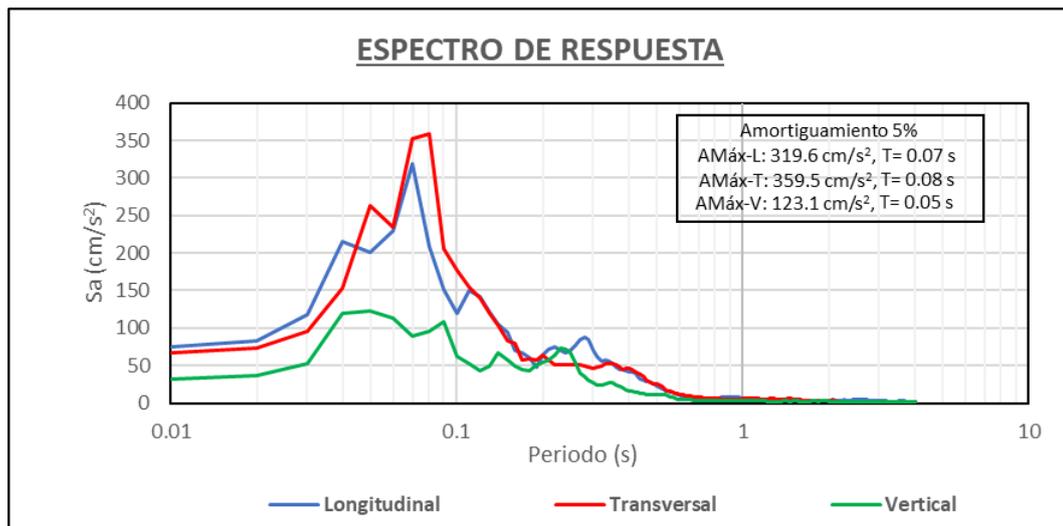


Figura N°55: Espectro de Respuesta Sa de la Estación BAY obtenidas en el sismo del 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

Además, el periodo de máxima respuesta de Pseudo Aceleración (S_a) y Pseudo Desplazamiento (S_d) no coincide con el periodo de periodo de la estructura, cuyo valor para el tramo V correspondiente a la Estación Bayóvar (BAY) es $T_x= 2.77s$ (transversal) y, $T_y= 2.09s$ (longitudinal).

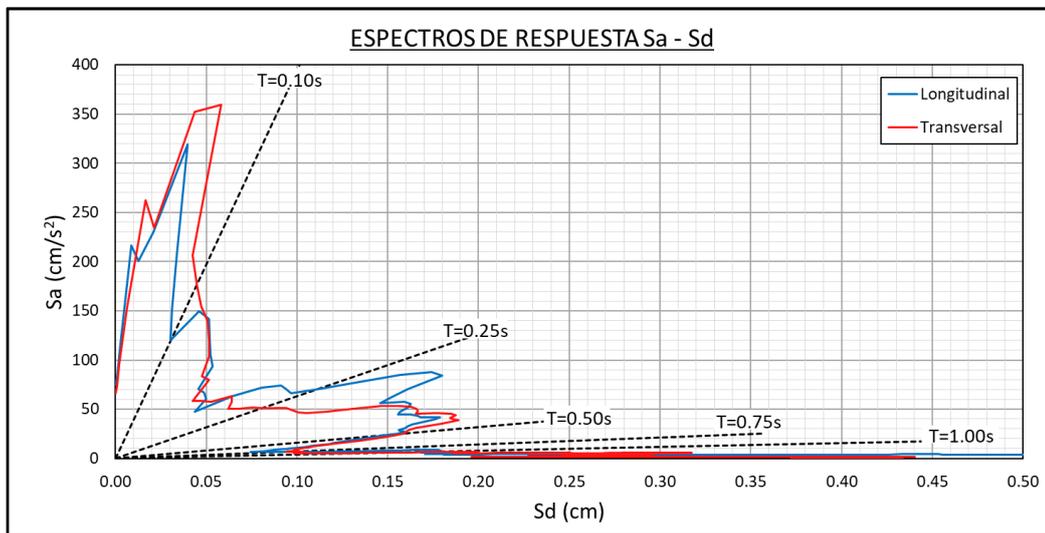


Figura N°56: Espectro de Respuesta S_a vs S_d de la Estación BAY obtenidas en el sismo del 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

5.2.2. Estación Pirámides del Sol (PIR)

Los registros obtenidos en la estación Pirámides del Sol, evidencian que la máxima aceleración, velocidad y desplazamiento alcanzadas durante el evento sísmico del día 12/05/2022 fueron de 42.2cm/s^2 , 1.1cm/s y 0.4cm , respectivamente.

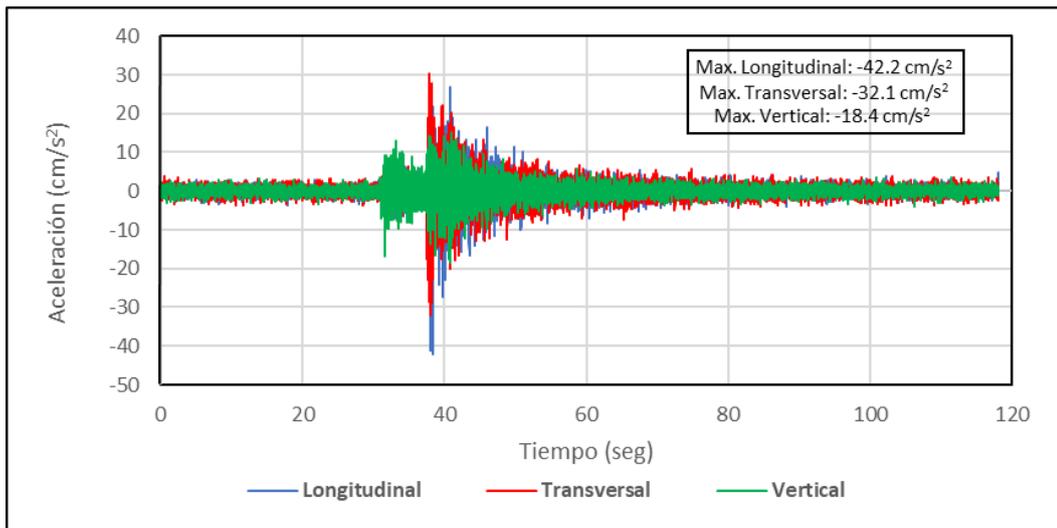


Figura N°57: Registro de aceleraciones de la Estación PIR obtenidas en el sismo de 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, los espectros de Respuesta de pseudo aceleraciones muestran picos de hasta 172.1 cm/s² que forman entre los periodos 0.04s a 0.40s siendo menores al 18% de la aceleración de la gravedad.

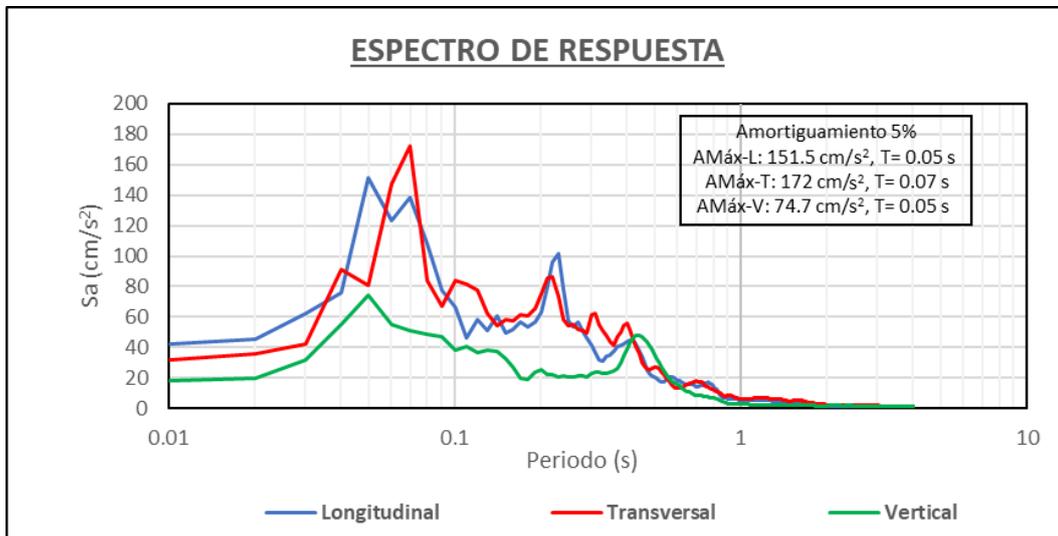


Figura N°58: Espectro de Respuesta Sa de la Estación PIR obtenidas en el sismo del 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

Además, el periodo de máxima respuesta de Pseudo Aceleración (Sa) y Pseudo Desplazamiento (Sd) no coincide con el periodo de periodo de la estructura, cuyo valor para el tramo Q correspondiente a la Estación Pirámides del Sol (PIR) es Tx= 1.68s (transversal) y Ty= 1.21s (longitudinal).

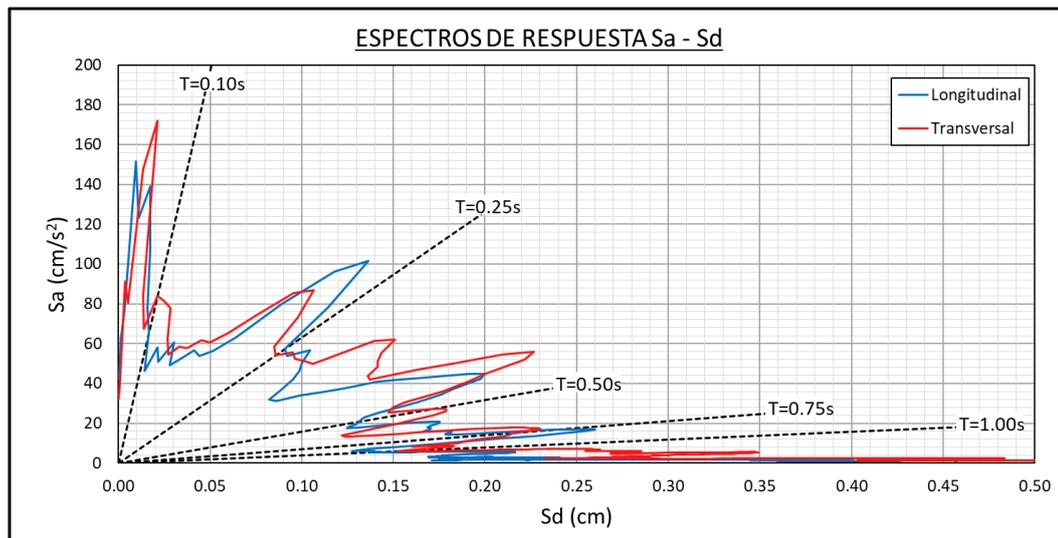


Figura N°59: Espectro de Respuesta Sa vs Sd de la Estación PIR obtenidas en el sismo del 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

5.2.3. Estación Gamarra (GAM)

Los registros del acelerómetro instalado en la estación Gamarra, indican que la máxima aceleración, velocidad y desplazamiento alcanzadas durante el evento sísmico del día 12/05/2022 fueron de 61.3cm/s², 2.0cm/s y 0.7cm, respectivamente.

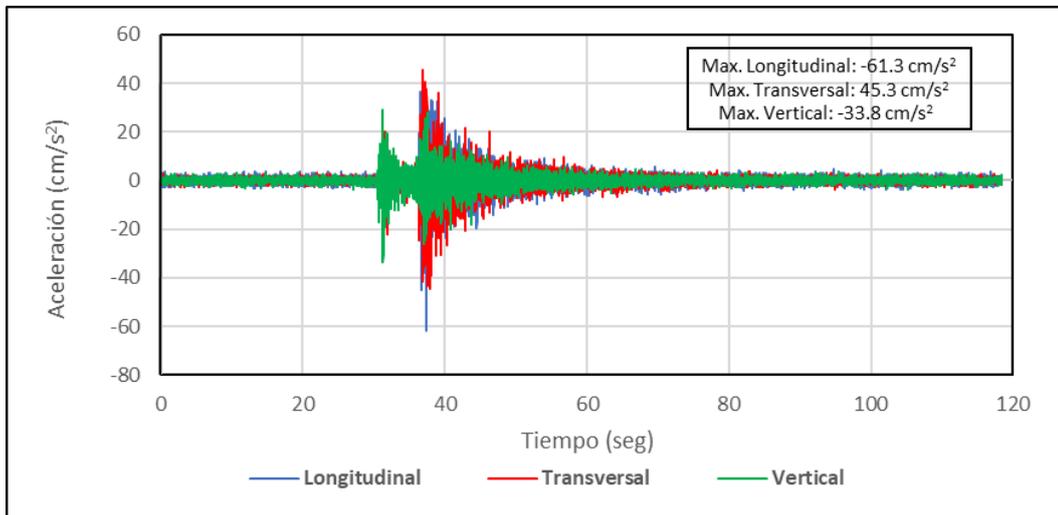


Figura N°60: Registro de aceleraciones de la Estación GAM obtenidas en el sismo de 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, los espectros de Respuesta de pseudo aceleraciones muestran picos de hasta 199.1 cm/s² que forman entre los periodos 0.04s a 0.20s siendo menores al 21% de la aceleración de la gravedad.

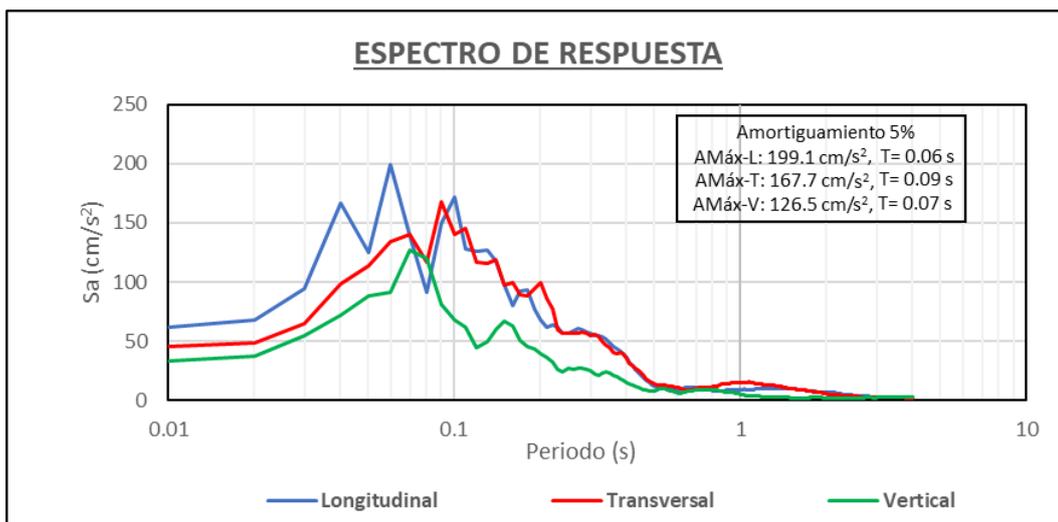


Figura N°61: Espectro de Respuesta Sa de la Estación GAM obtenidas en el sismo del 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

Además, el periodo de máxima respuesta de Pseudo Aceleración (Sa) y Pseudo Desplazamiento (Sd) no coincide con el periodo de periodo de la estructura, cuyo

valor para el tramo G correspondiente a la Estación Gamarra (GAM) es $T_x = 0.95s$ (transversal) y, $T_y = 0.45s$ (longitudinal).

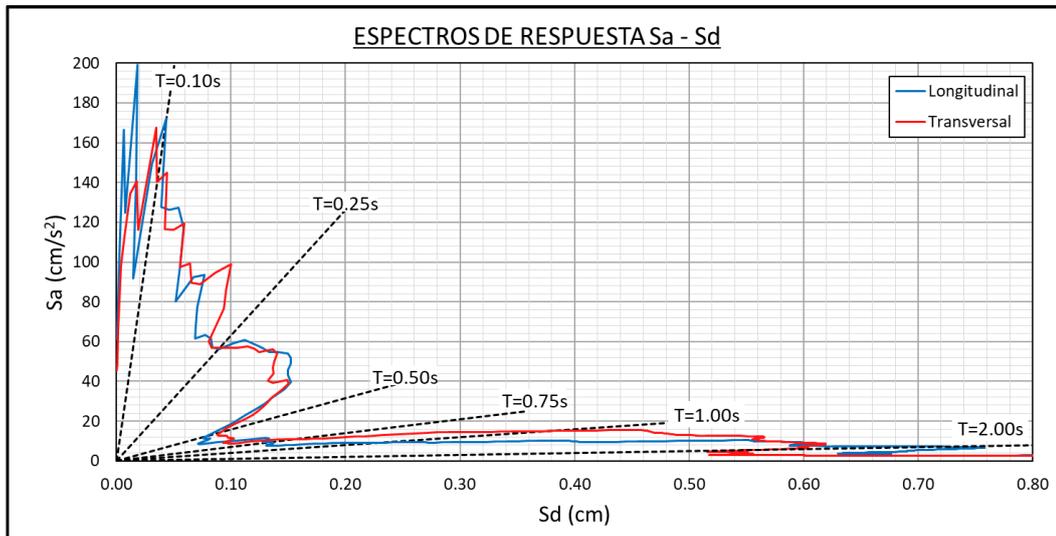


Figura N°62: Espectro de Respuesta Sa vs Sd de la Estación GAM obtenidas en el sismo del 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

5.2.4. Estación Angamos (ANG)

Los resultados del acelerómetro ubicado en la estación Angamos, indican que la máxima aceleración, velocidad y desplazamiento registradas en el evento sísmico del 12/05/2022 fueron de 36.1cm/s^2 , 1.4cm/s y 0.5cm , respectivamente.

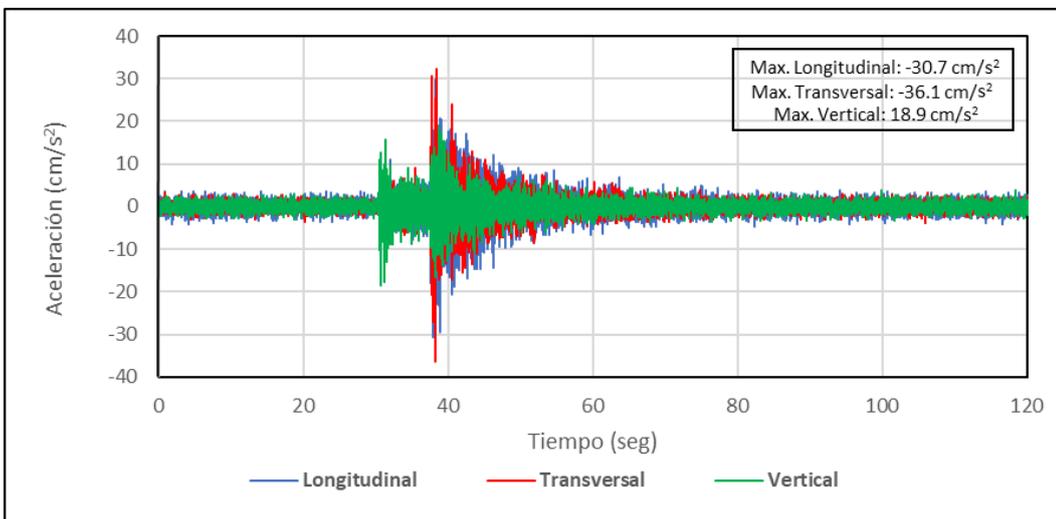


Figura N°63: Registro de aceleraciones de la Estación ANG obtenidas en el sismo de 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, los espectros de Respuesta de pseudo aceleraciones muestran picos de hasta 100.7 cm/s^2 entre los periodos $0.04s$ a $0.2s$ siendo menores al 11% de la aceleración de la gravedad.

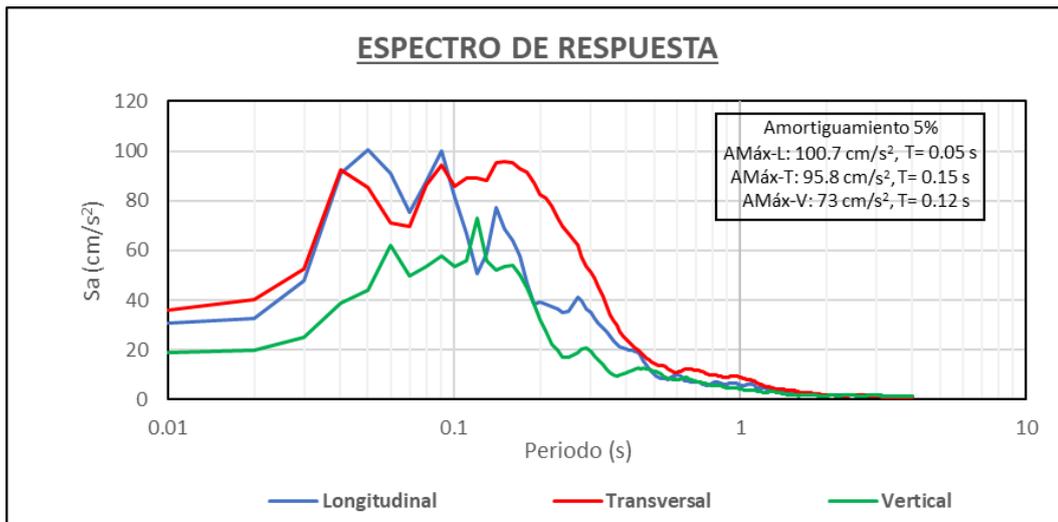


Figura N°64: Espectro de Respuesta Sa de la Estación ANG obtenidas en el sismo del 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

Además, el periodo de máxima respuesta de Pseudo Aceleración (S_a) y Pseudo Desplazamiento (S_d) no coincide con el periodo de periodo de la estructura, cuyo valor para el tramo C1 correspondiente a la Estación Angamos (ANG) es $T_x= 0.93s$ (transversal) y, $T_y= 0.68s$ (longitudinal).

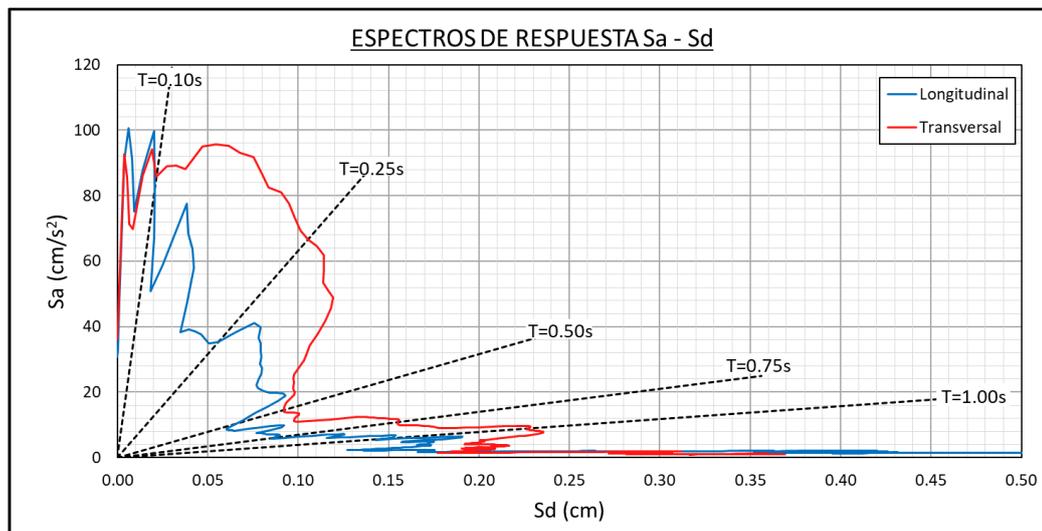


Figura N°65: Espectro de Respuesta Sa vs Sd de la Estación ANG obtenidas en el sismo del 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

5.2.5. Estación Atocongo (ATO)

Los registros acelerométricos de la estación Atocongo, evidencian la máxima aceleración, velocidad y desplazamiento registradas durante el evento sísmico del día 12/05/2022 fueron de 32.7cm/s^2 , 1.1cm/s y 0.8cm , respectivamente.

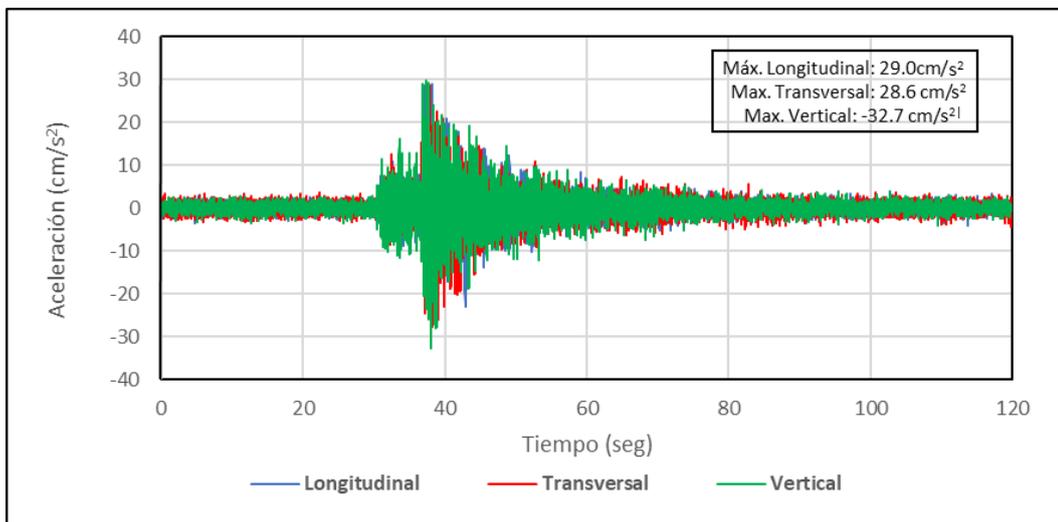


Figura N°66: Registro de aceleraciones de la Estación ATO obtenidas en el sismo de 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, los espectros de Respuesta de pseudo aceleraciones muestran picos de hasta 110.6 cm/s^2 entre los periodos 0.05s a 0.4s siendo menores al 12% de la aceleración de la gravedad.

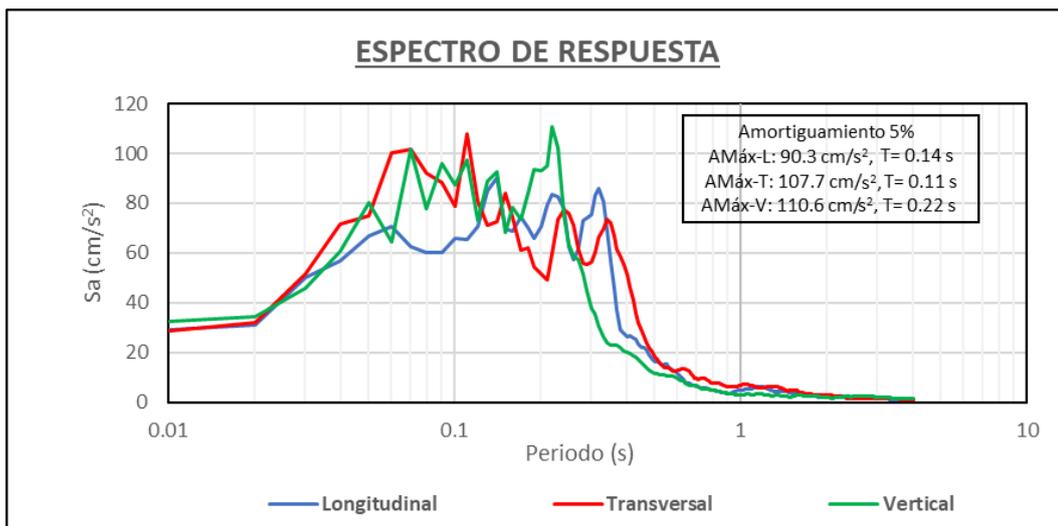


Figura N°67: Espectro de Respuesta Sa de la Estación ATO obtenidas en el sismo del 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

Además, el periodo de máxima respuesta de Pseudo Aceleración (S_a) y Pseudo Desplazamiento (S_d) no coincide con el periodo de periodo de la estructura, cuyo valor para el tramo V correspondiente a la Estación Atocongo (ATO) es $T_x= 1.49s$ (transversal) y, $T_y= 1.44s$ (longitudinal).

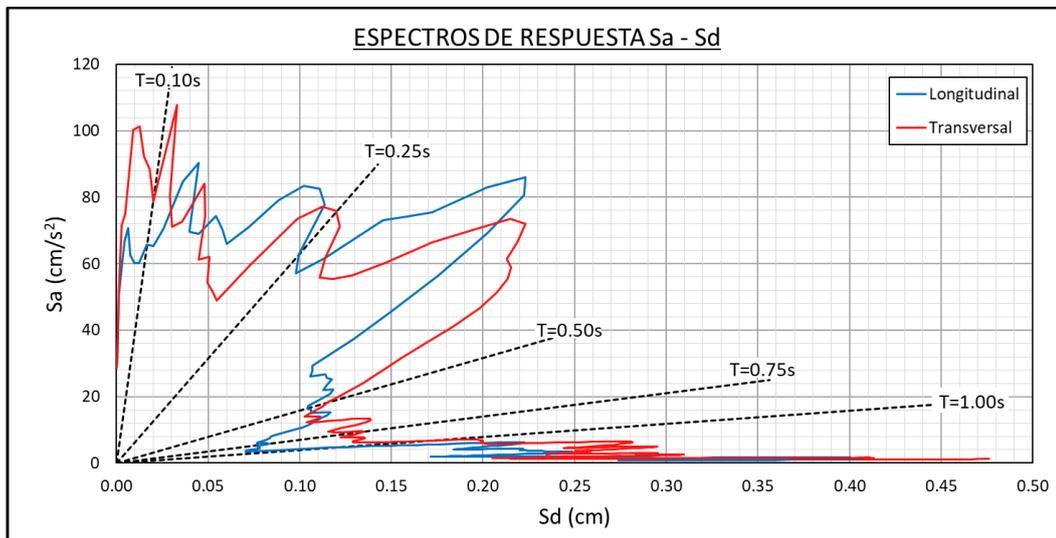


Figura N°68: Espectro de Respuesta S_a vs S_d de la Estación ATO obtenidas en el sismo del 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

5.2.6. Estación Parque Industrial (PIN)

Los registros obtenidos en la estación Parque Industrial, evidencian que la máxima aceleración, velocidad y desplazamiento alcanzadas durante el evento sísmico del día 12/05/2022 fueron de 55.4cm/s^2 , 1.4cm/s y 0.6cm , respectivamente.

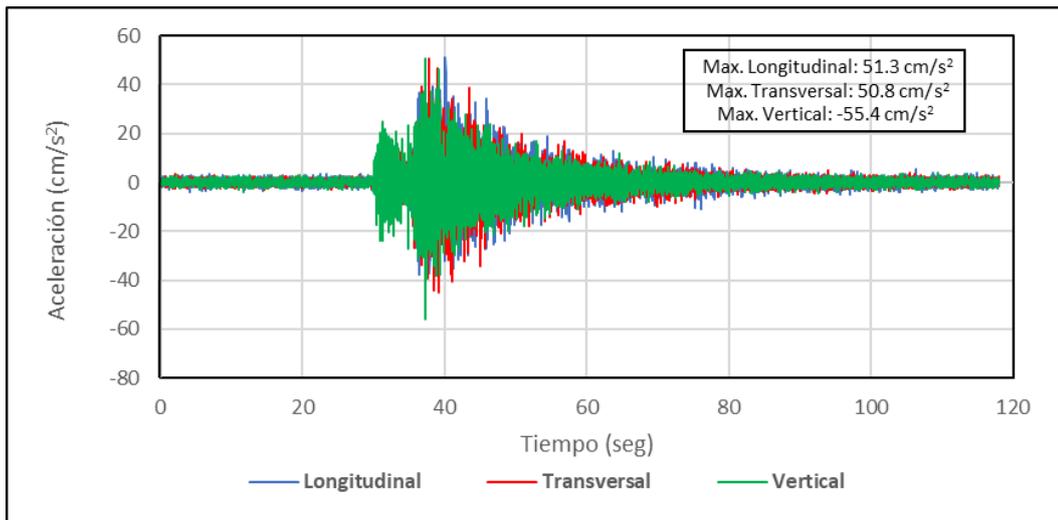


Figura N°69: Registro de aceleraciones de la Estación PIN obtenidas en el sismo de 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, los espectros de Respuesta de pseudo aceleraciones muestran picos de hasta 210.1 cm/s^2 que forman entre los periodos 0.05s a 0.20s siendo menores al 22% de la aceleración de la gravedad.

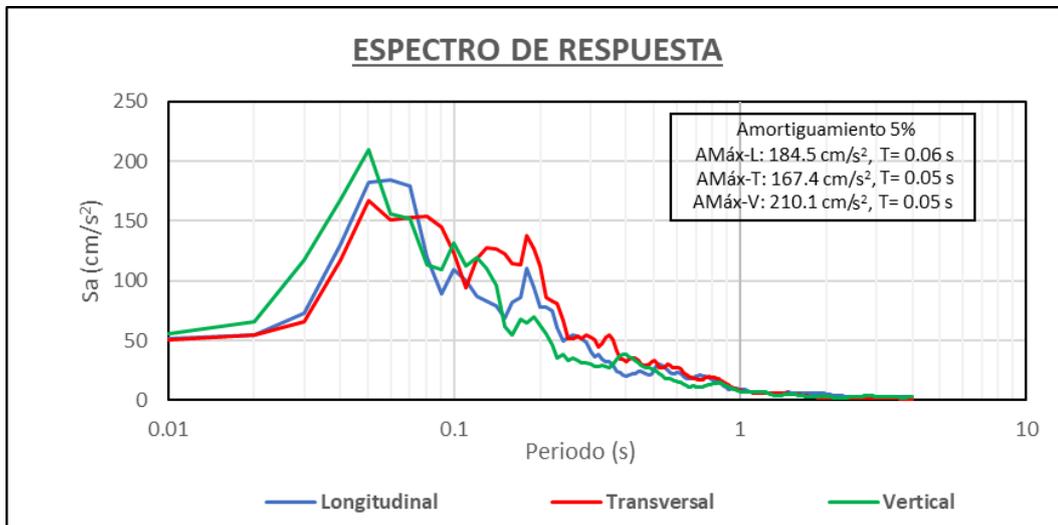


Figura N°70: Espectro de Respuesta Sa de la Estación PIN obtenidas en el sismo del 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

Además, el periodo de máxima respuesta de Pseudo Aceleración (Sa) y Pseudo Desplazamiento (Sd) no coincide con el periodo de periodo de la estructura, cuyo valor para el tramo V correspondiente a la Estación Parque Industrial (PIN) es $T_x= 1.49\text{s}$ (transversal) y, $T_y= 1.44\text{s}$ (longitudinal).

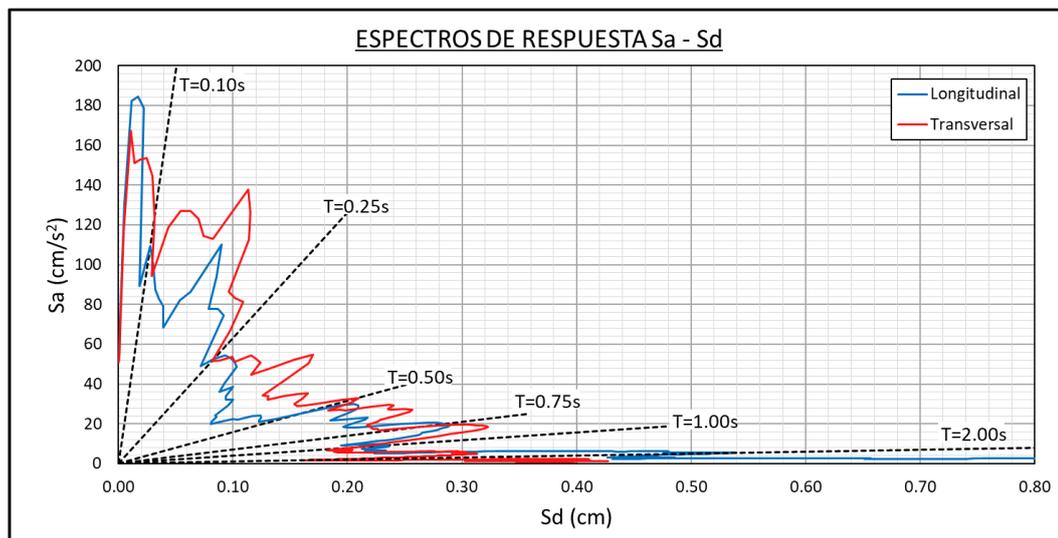


Figura N°71: Espectro de Respuesta Sa vs Sd de la Estación PIN obtenidas en el sismo del 12/05/2022. Fuente: Elaboración propia.

5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.3.1. Reporte de evento sísmico

El mensaje de alerta del día 12/05/2022 al detectarse un sismo de magnitud superior a los 5.5Mw y/o mayor a 40 gals, fue el siguiente:

| Buen día, Se ha producido un sismo cercano a Lima de magnitud 5.5 según el IGP- Los datos preliminares del sismo son: | | | | |
|---|---|---|----------------|-----------------|
| Fecha: | 22-05-12 | | | |
| Hora: | 16:55:47 | | | |
| Magnitud: | 5.5 | | | |
| Latitud: | -12.4752 | | | |
| Longitud: | -77.0732 | | | |
| Referencia: | 37 km al O de Chilca, Cañete - Lima | | | |
| En las estaciones se registraron las siguientes aceleraciones pico: | | | | |
| Código | Ubicación | Amplitud Máxima (cm/s ²) | | |
| | | Eje Long. | Eje Transv. | Eje Vertical |
| BAY | Estación Bayóvar, San Juan de Lurigancho, Lima | 75.0 | 66.5 | 31.5 |
| PIR | Estación Pirámides del Sol, Villa El Salvador, Lima | 42.2 | 32.1 | 18.4 |
| GAM | Estación Gamarra, La Victoria, Lima | 61.3 | 45.3 | 33.8 |
| ANG | Estación Angamos, San Borja, Lima | 30.7 | 36.1 | 18.9 |
| ATO | Estación Atocongo, San Juan de Miraflores, Lima | 29.0 | 28.6 | 32.7 |
| PIN | Estación Parque Industrial, Villa El Salvador, Lima | 51.3 | 50.8 | 55.4 |

Figura N°72: Correo de alerta emitido por el sismo de Chilca 12/05/2022.

Fuente: Elaboración propia.

Con estos primeros datos, se pueden tomar las siguientes acciones:

- Se determinó el área de potencial afectación, es decir, para el caso del sismo de magnitud de Mw 5.5 correspondía un área mínima de 40km a la redonda del epicentro.
- Se activaron los protocolos de respuesta en las estaciones de aquellas cuyo acelerómetro o interpolación haya superado la aceleración mínima de 40 gals.
- La máxima respuesta sísmica activada fue nivel III en el área de potencial afectación de acuerdo al mapa preliminar de sacudimiento del suelo y el posterior procesamiento en el mapa de sacudimiento que incluye los registros del IGP y CISMID-UNI.

5.3.2. Mapa de sacudimiento del suelo

Los mapas preliminares de sacudimiento del suelo se obtienen a partir de los registros de los acelerómetros instalados en Línea 1.

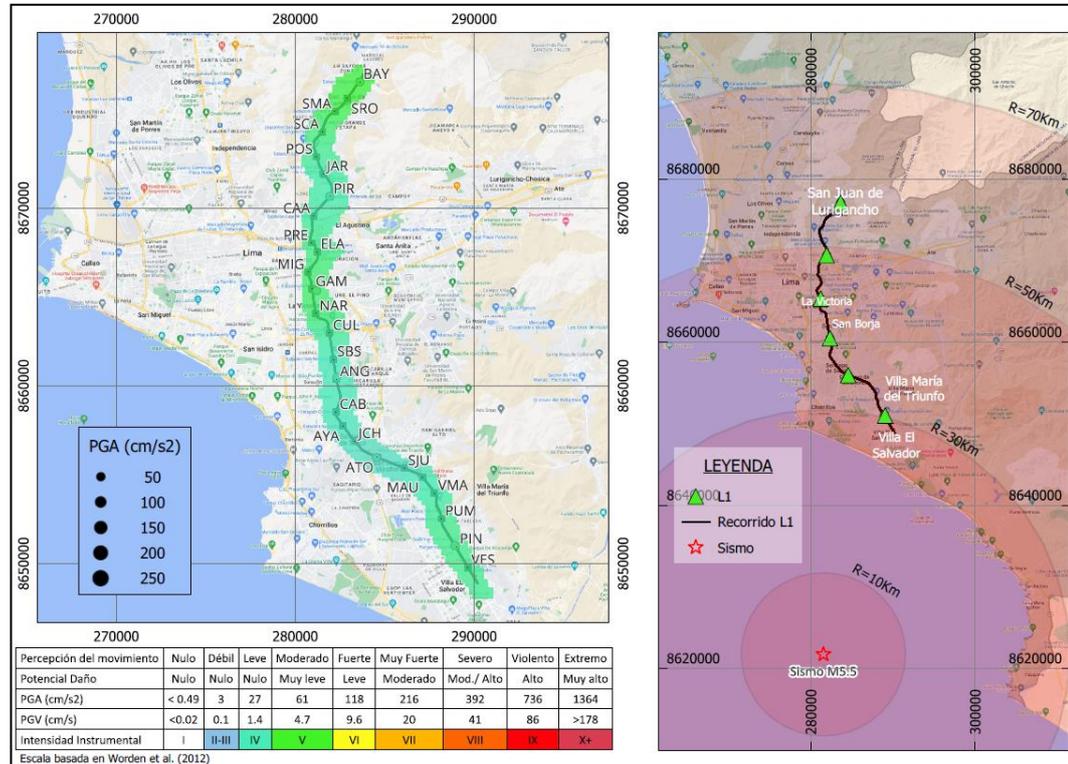


Figura N°73: Mapa preliminar de sacudimiento del suelo.

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se puede observar en el mapa preliminar, se puede extraer lo siguiente:

- Se observa que las aceleraciones estuvieron entre 29 a 75 gals, máximas contracciones en Villa El Salvador y Bayóvar.
- Las zonas de mayor amplificación de aceleraciones se produjeron en las estaciones en los distritos de La Molina, San Martín de Porres y Villa El Salvador.
- A lo largo del recorrido de la Línea 1 se distinguen tres tramos con diferentes niveles de intensidad producidas por el sismo Mw5.5:
 - Estación Villa El Salvador a Villa María – Daño potencialmente leve (verde) se establece respuesta nivel III.
 - Estaciones Maria Auxiliadora a Angamos – Daño potencialmente nulo (azul-celeste) se establece nivel de respuesta nivel II.

- Estaciones San Borja Sur a Bayóvar – Daño potencialmente leve (verde-amarillo) se establece respuesta nivel III prioridad sobre las estaciones del extremo norte: Bayóvar y Santa Rosa.

Así mismo, en un reproceso considerando complementar los resultados preliminares con los registros acelerométricos de las estaciones del IGP y CISMID – UNI, se observa el siguiente mapa de sacudimiento del suelo:

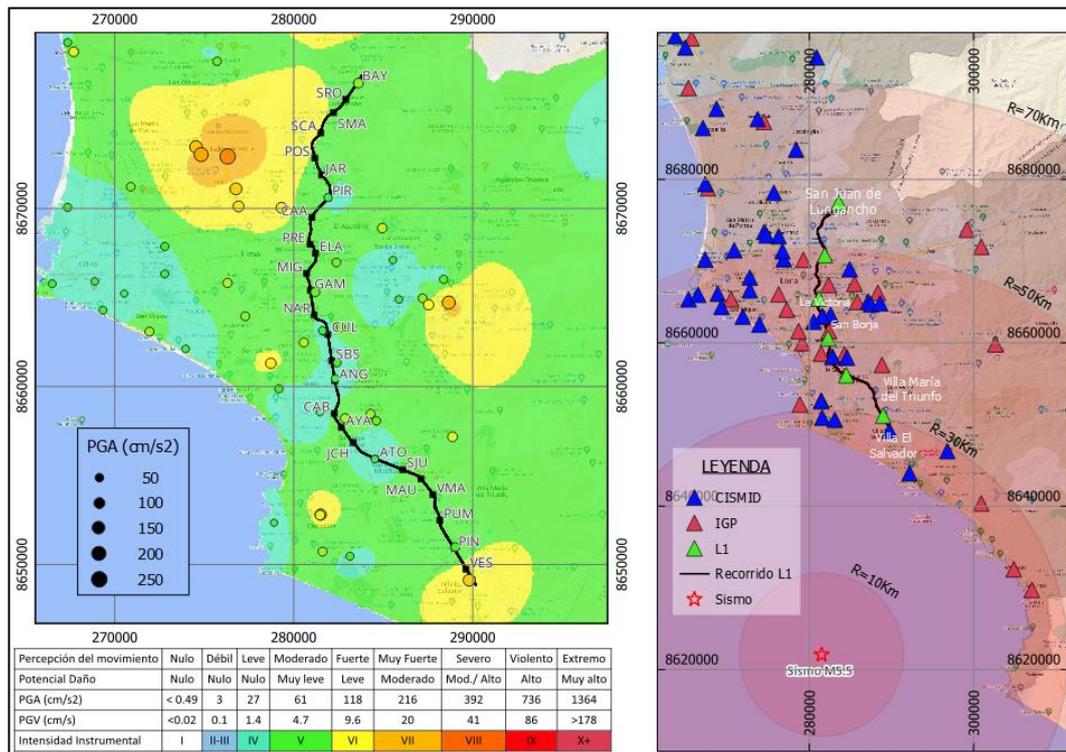


Figura N°74: Mapa de sacudimiento del suelo.

Fuente: Elaboración propia.

Luego, realizando la comparativa entre mapas de sacudimiento se observa:

- El mapa de intensidades, obtenido a partir de los acelerómetros instalados en L1, es consistente con los registros del IGP y CISMID, se observa que las aceleraciones estuvieron entre 29 a 106 gals, máximas concentraciones en las zonas norte y sur.
- Las zonas de mayor amplificación de aceleraciones se produjeron en las estaciones San Martín y San Carlos (zona norte), así como en la estación Villa El Salvador (zona sur).
- A lo largo del recorrido de la Línea 1 se distinguen los mismos tres tramos, pero con mayor detalle de las estaciones que deben priorizarse:

- Estación Villa El Salvador a San Juan – Se confirma zona con daño potencialmente leve (verde) se establece respuesta III, se requiere incluir en la priorización a la estación Villa El Salvador dado que alcanza niveles de respuesta nivel IV.
- Estaciones Atocongo a La Cultura – Daño potencialmente nulo a leve (celeste-verde) se establece respuesta nivel II en las estaciones, aunque la estación Ayacucho que requiere un nivel de respuesta III.
- Estaciones Arriola a Bayóvar – Daño potencialmente nulo a leve (verde-amarillo), se establece respuesta nivel III, aunque las estaciones San Martín y San Carlos alcanzan niveles de respuesta IV.

Tabla N°15: Nivel de respuesta en las estaciones de Línea 1.
Fuente: Elaboración propia.

| ESTACIÓN | CÓDIGO | Sensores L1 | | IGP-CISMID-L1 | |
|-----------------------|--------|-------------|-----------|---------------|-----------|
| | | PGA (gals) | Respuesta | PGA (gals) | Respuesta |
| Bayóvar (*) | BAY | 75 | Nivel III | 75 | Nivel III |
| Santa Rosa | SRO | 70 | Nivel III | 77 | Nivel III |
| San Martín | SMA | 66 | Nivel III | 80 | Nivel IV |
| San Carlos | SCA | 60 | Nivel III | 84 | Nivel IV |
| Los Postes | POS | 54 | Nivel III | 77 | Nivel III |
| Los Jardines | JAR | 48 | Nivel III | 58 | Nivel III |
| Pirámides del Sol (*) | PIR | 42 | Nivel III | 42 | Nivel III |
| Caja de Agua | CAA | 47 | Nivel III | 59 | Nivel III |
| Presbítero Maestro | PRE | 52 | Nivel III | 62 | Nivel III |
| El Ángel | ELA | 54 | Nivel III | 60 | Nivel III |
| Grau | MIG | 57 | Nivel III | 64 | Nivel III |
| Gamarra (*) | GAM | 61 | Nivel III | 63 | Nivel III |
| Arriola | NAR | 57 | Nivel III | 50 | Nivel III |
| La Cultura | CUL | 49 | Nivel III | 36 | Nivel II |
| San Borja Sur | SBS | 41 | Nivel III | 41 | Nivel III |

| ESTACIÓN | CÓDIGO | Sensores L1 | | IGP-CISMID-L1 | |
|-----------------------|--------|-------------|-----------|---------------|-----------|
| | | PGA (gals) | Respuesta | PGA (gals) | Respuesta |
| Angamos (*) | ANG | 36 | Nivel II | 36 | Nivel II |
| Cabitos | CAB | 34 | Nivel II | 49 | Nivel III |
| Ayacucho | AYA | 32 | Nivel II | 55 | Nivel III |
| Jorge Chávez | JCH | 31 | Nivel II | 42 | Nivel III |
| Atocongo (*) | ATO | 29 | Nivel II | 29 | Nivel II |
| San Juan | SJU | 34 | Nivel II | 47 | Nivel III |
| María Auxiliadora | MAU | 38 | Nivel II | 58 | Nivel III |
| Villa María | VMA | 41 | Nivel III | 60 | Nivel III |
| Pumacahua | PUM | 46 | Nivel III | 51 | Nivel III |
| Parque Industrial (*) | PIN | 51 | Nivel III | 53 | Nivel III |
| Villa El Salvador | VES | 57 | Nivel III | 106 | Nivel IV |

* Estaciones con acelerómetros instalados.

5.3.3. Análisis de espectros de respuesta

Los espectros de respuesta de los eventos sísmicos se muestran a continuación, se observa que en ninguno de los casos se ha obtenido valores superiores a los espectros de respuesta lineal de diseño de la norma AASHTO para un periodo de retorno T_r de 1000 años.

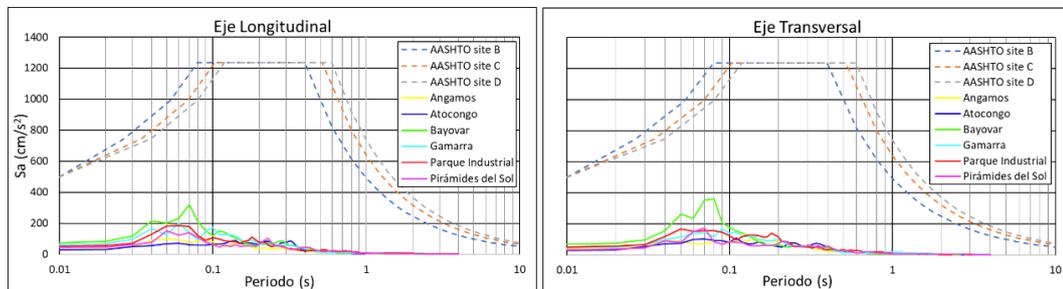


Figura N°75: Espectro de respuesta elástica de pseudo aceleraciones.

Fuente: Elaboración propia.

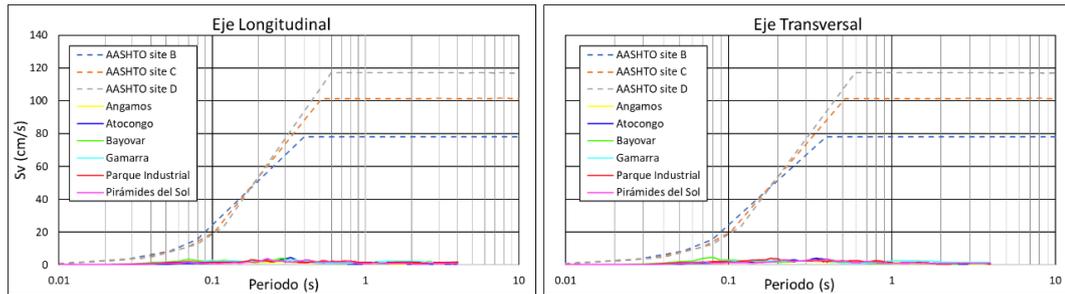


Figura N°76: Espectro de respuesta elástica de pseudo velocidades.

Fuente: Elaboración propia.

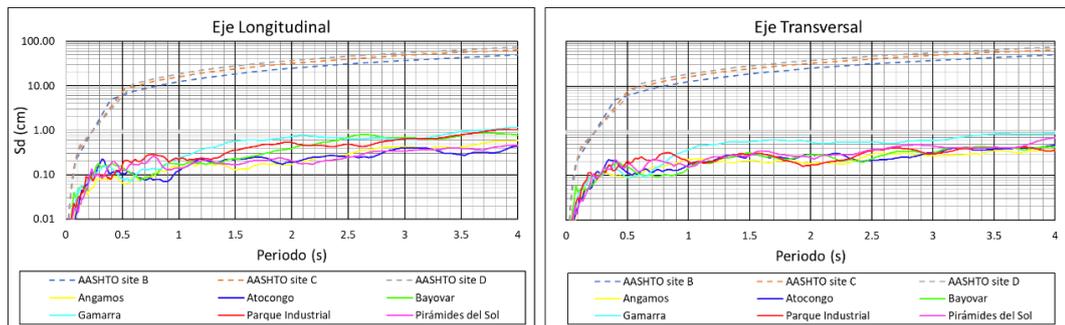


Figura N°77: Espectro de respuesta de pseudo desplazamientos.

Fuente: Elaboración propia.

- Por lo tanto, al compararse los espectros obtenidos a partir de los registros con espectros normativos de diseño, se observa que, para cualquier periodo estos se encuentran por debajo del espectro de diseño, por lo que se espera que el punto de desempeño se encuentre en el rango elástico.

5.3.4. Análisis de fuerzas resultantes

Con los registros de aceleración obtenidos es posible realizar análisis dinámicos para estimar las fuerzas máximas y, a continuación se muestra un extracto del análisis realizado en el rango elástico con el registro de aceleraciones obtenido en la estación Bayóvar.

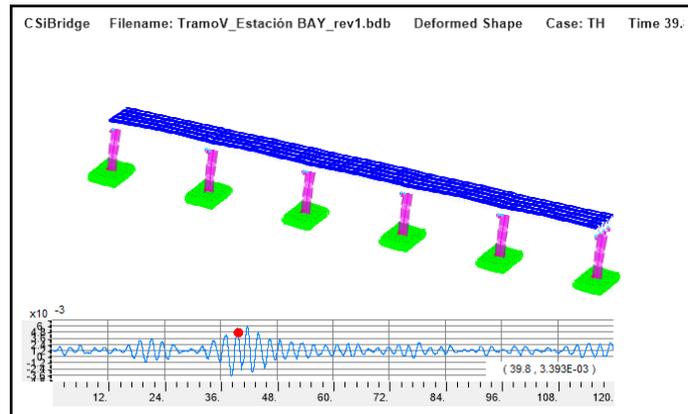


Figura N°78: Análisis dinámico sobre el tramo V del viaducto de la Línea 1.

Fuente: Elaboración propia.

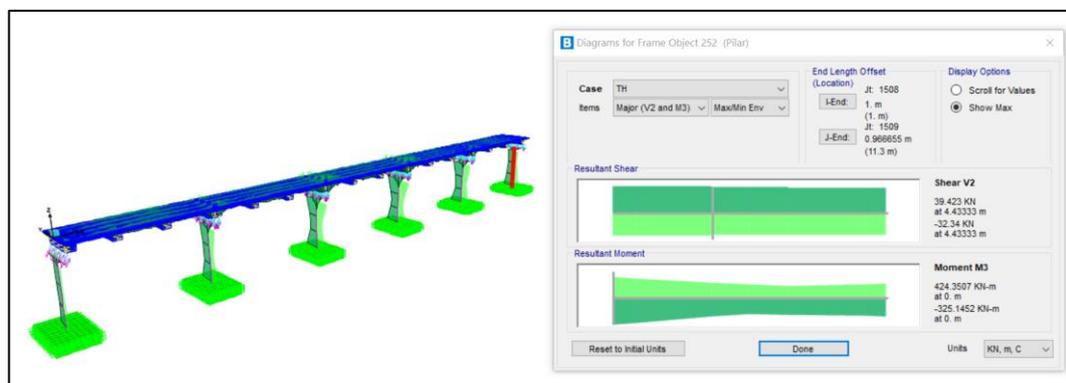


Figura N°79: Envoltura de momentos flectores M3 y fuerzas cortantes V2.

Fuente: Elaboración propia.

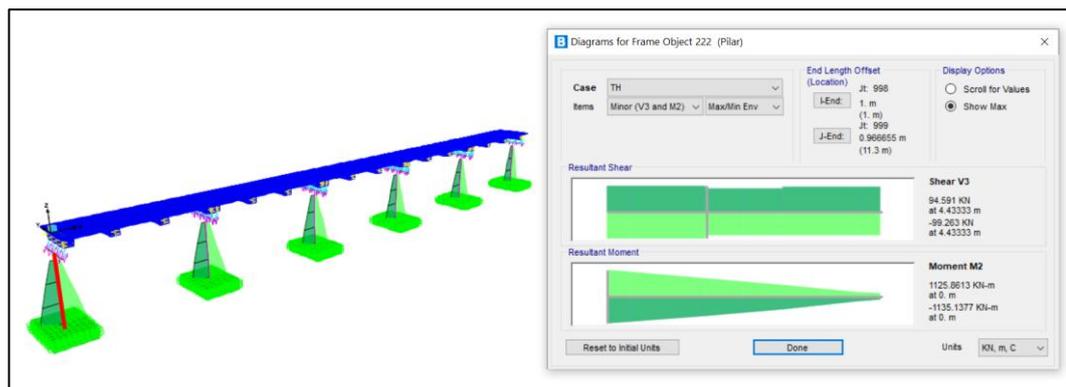


Figura N°80: Envoltura de momentos flectores M2 y fuerzas cortantes V3.

Fuente: Elaboración propia.

Luego, empleando la memoria de cálculo de los pilares se extrae el siguiente diagrama de momento curvatura, el cual se empleará para verificar que los momentos resultantes no superan el rango elástico.

Para el caso de momentos en el eje X, se obtuvo un momento actuante máximo de $M_{m\acute{a}x} = 1.14 \text{ MN}\cdot\text{m}$, este valor es menor al momento de fluencia $M_{fluencia} = 13.37 \text{ MN}\cdot\text{m}$ MN-m.

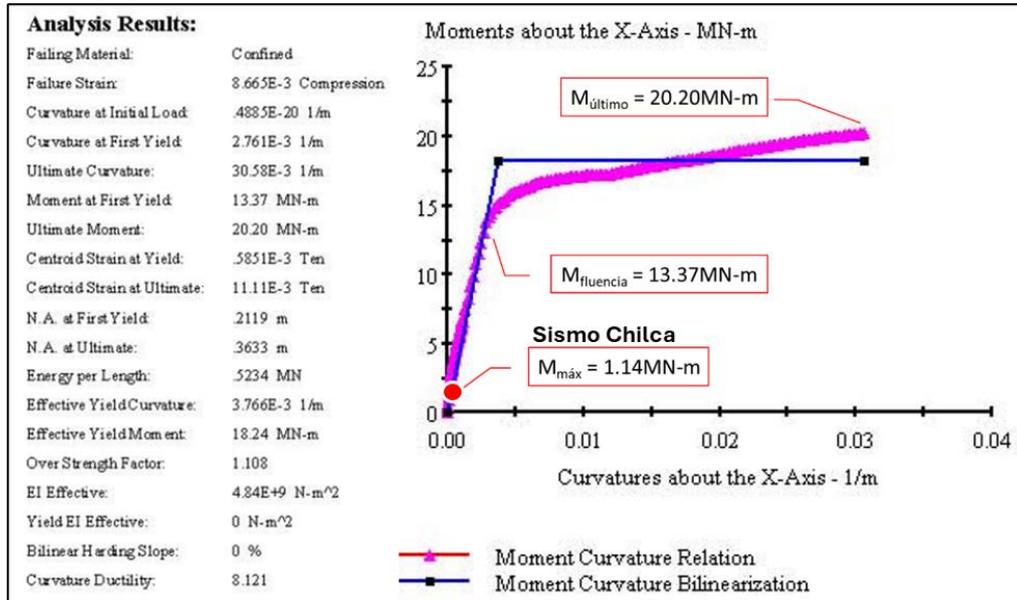


Figura N°81: Diagrama momento curvatura del pilar 2.10x1.40m eje X.

Fuente: Adaptado de Memoria de cálculo Tramo V.

Para el caso de momentos en el eje Y, se obtuvo un momento actuante máximo de $M_{m\acute{a}x} = 0.42 \text{ MN}\cdot\text{m}$, este valor es menor al momento de fluencia $M_{fluencia} = 16.90 \text{ MN}\cdot\text{m}$ MN-m

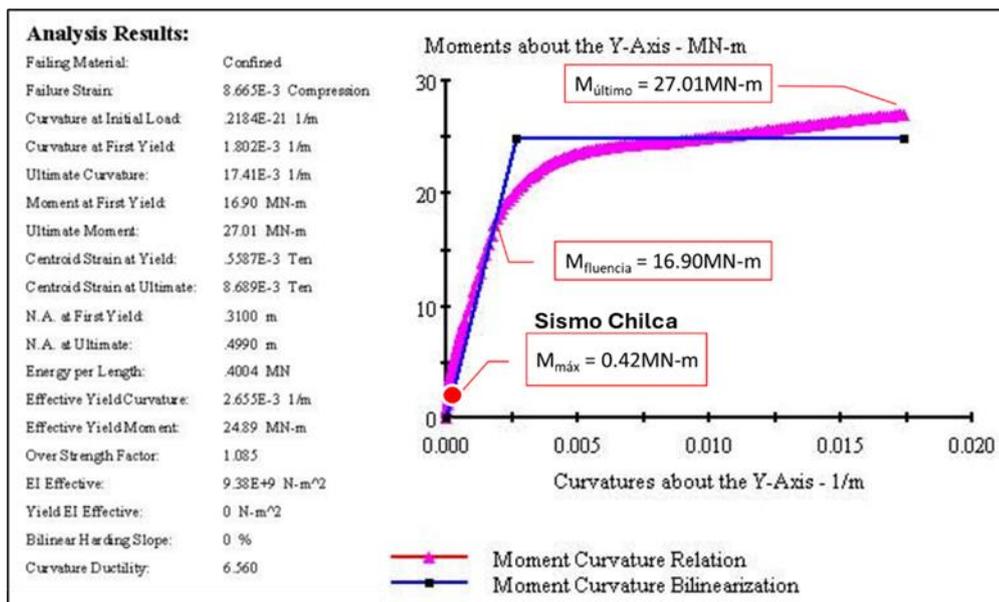


Figura N°82: Diagrama momento curvatura del pilar 2.10x1.40m eje Y.

Fuente: Adaptado de Memoria de cálculo Tramo V.

Así mismo, se observa que la capacidad de corte según la memoria de cálculo (Consorcio Tren Eléctrico, 2012), en sentido longitudinal es $\phi V_{n1} = 7.49 \times 10^3$ KN, y transversal es $\phi V_{n2} = 6.36 \times 10^3$ KN, estos valores son menores a los obtenidos por 99.26 KN y 39.42 KN, respectivamente.

8.6.1 Shear Capacity

T.Y. Lin International
Column Shear Design (BOC)
Design Pier - 2.10m x 1.40m

$\phi_s := 0.9$ $f_{yc} := 462 \text{ MPa}$

$d_{bl} := \frac{11}{8} \text{ in}$ $\lambda_{mo} := 1.2$

Transverse Shear - Direction 2

$M_{p1} := 2489 \text{ MN}\cdot\text{m}$

$L_{pier} := 10.010 \text{ m}$

$L_{pr2} := \max \left[0.044 \cdot f_{yc} \cdot \frac{1}{\text{MPa}} \cdot d_{bl} \cdot 0.08 \cdot (L_{pier} + 3.4\text{m}) + 0.022 \cdot f_{yc} \cdot \frac{1}{\text{MPa}} \cdot d_{bl} \right] = 1.428 \text{ m}$

$L_{c2} := L_{pier} - L_{pr2} - 0.5 + 3.4\text{m} = 12.696 \text{ m}$

$M_{po1} := \lambda_{mo} \cdot M_{p1} = 2.987 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}$

$V_{u2} := \frac{M_{po1}}{L_{c2}} = 2.353 \times 10^3 \text{ kN}$

$V_{n2} := V_{c2} + V_{s2a} = 7.068 \times 10^3 \text{ kN}$

$D.C. \text{ Tran. Shear} := \frac{V_{u2}}{\phi_s \cdot V_{n2}} = 0.37$

Longitudinal Shear - Direction 1

$M_{p2} := 18.24 \text{ MN}\cdot\text{m}$

$L_{pr1} := \max \left[0.044 \cdot f_{yc} \cdot \frac{1}{\text{MPa}} \cdot d_{bl} \cdot 0.08 \cdot (L_{pier} + 1.7\text{m}) + 0.022 \cdot f_{yc} \cdot \frac{1}{\text{MPa}} \cdot d_{bl} \right] = 1.292 \text{ m}$

$L_{c1} := L_{pier} - L_{pr1} - 0.5 + 1.7\text{m} = 11.064 \text{ m}$

$M_{po2} := \lambda_{mo} \cdot M_{p2} = 2.189 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}$

$V_{u1} := \frac{M_{po2}}{L_{c1}} = 1.978 \times 10^3 \text{ kN}$

$V_{n1} := V_{c1} + V_{s1a} = 8.322 \times 10^3 \text{ kN}$

$D.C. \text{ Long. Shear} := \frac{V_{u1}}{\phi_s \cdot V_{n1}} = 0.264$

Figura N°83: Capacidad de resistencia a fuerzas cortantes en los pilares.

Fuente: Adaptado de Memoria de cálculo Tramo V.

- Por lo tanto, los datos obtenidos por los registros acelerométricos pueden emplearse para Análisis Dinámico para evaluar el riesgo la estructura (en caso se requiera), tal como se ha presentado en el presente acápite, si bien se trata de un análisis simplificado Lineal, se obtiene que los momentos máximos no superan al momento de fluencia.
- Un punto importante, es la señal captada, si bien se ha empleado el registro Bayóvar que posee la mayor amplitud de los registros captados, se observa que es necesario verificar los diagramas teóricos de momento curvatura con futuros registros de mayor amplitud.
- Finalmente, de acuerdo a la disertación realizada en el 27° Congreso del Comités Técnicos de la Asociación Latinoamericana de Metros y Subterráneos (ALAMYS) realizada por Arana (2022), Gerente de Mantenimiento de la Línea 1 del Metro de Lima, se resalta la funcionalidad de los acelerómetros para tomar decisiones operacionales y acciones técnicas necesarias.

CONCLUSIONES

La línea 1 del Metro de Lima es la principal infraestructura de transporte masivo del Perú, que se encuentra categorizada, de acuerdo con el Reglamento Nacional de Edificaciones E.030, como estructura esencial para el manejo de emergencias y el funcionamiento del gobierno, en ese sentido, la implementación del sistema de monitoreo descrito en el presente documento representa una mejora sustancial para la operación y respuesta a emergencias de la infraestructura.

Respecto a la Infraestructura de la Línea 1 se concluye que es justificada la implementación de sistemas de monitoreo para la infraestructura de la Línea 1, que, como se ha visto es compleja: a lo largo de 34.3 Km de recorrido por 9 distritos, posee 26 estaciones, 7.8Km de cercos pasos a nivel y 26.5Km de viaductos con hasta 5 configuraciones estructurales diferentes, englobados en 3 tramos que han sido diseñados y construidos bajo normatividades y criterios diferentes, estas particularidades dificultan la respuesta post sísmica, la priorización de actividades y, el despliegue de actividades de inspección.

Si bien el sistema ha establecido sus niveles de respuesta en función de los parámetros sísmicos de diseño, es necesario, evaluar el desempeño actual de la infraestructura para facilitar las actividades de inspección, y los alcances de los trabajos de reparación en caso se identifiquen daños, esto particularmente en el tramo Antiguo de la Línea 1.

Así mismo, respecto al sistema de monitoreo implementado se observa que cumple con el objetivo principal de proporcionar un sistema de respuesta operacional post sismo para el despliegue rápido del protocolo en función a la lectura de los acelerómetros desplegados a lo largo de la Línea 1 del Metro de Lima, en ese sentido alcanza los siguientes niveles de monitoreo: a) Detecta si el evento sísmico ha causado o no daños a escala global, para ello se ha definido el nivel I - Umbral de percepción con un valor máximo de PGA requerido para considerar si es necesario desplegar o no alguna respuesta (nivel 1 de la escala de monitoreo Rytter (1993)), b) Localiza la ubicación del daño, esto mediante la extrapolación de los niveles de aceleración obtenidos por los 6 equipos instalados, que puede complementarse con la información de otros registros acelerométricos del IGP y CISMID-UNI (nivel 1 de la escala de monitoreo Rytter (1993)), c) Estima la severidad del daño en función de los valores de PGA registrados en los acelerómetros, para ello se ha definido los niveles II, III, IV, V, VI y VII

considerando otros sistemas de monitoreo aplicados en Canadá, China, Alemania y Japón (nivel III de la escala de monitoreo Rytter (1993)).

Así mismo, se evidencia que la arquitectura del sistema ha logrado adaptarse a los procesos internos de gestión de emergencias y disponibilidad de servicios que posee la Línea 1, en este caso ha sido esencial identificar: 1) La disponibilidad de Espacios para la instalación de acelerómetros (se han instalado en áreas técnicas de acceso o tránsito restringido), 2) Energía eléctrica ininterrumpida, es un escenario probable que la energía eléctrica sufra interrupciones durante el evento sísmico, en este caso, las estaciones de la Línea 1, se encuentran conectadas a un Sistema de Alimentación Energética provisional que respalda la conexión en caso de emergencias, 3) Conexión a internet estable, todos los acelerómetros se encuentran conectados a fuentes cableadas de internet, y 4) Gestión de emergencias, el desarrollo de la arquitectura del sistema se desarrolló considerando el organigrama y flujo de procesos que posee la Línea 1 del Metro de Lima para el mantenimiento y conservación, así como la atención de emergencias.

Adicionalmente, el sistema de monitoreo posee particularidades que son importantes de resaltar para la implementación y mejoras futuras: a) Es semiautomatizado dado que comunica los registros hacia un Centro de Control que revisa, toma decisiones e implementa la respuesta en base a los registros del sistema de monitoreo, su arquitectura permite registrar y comunicar la información en tiempo casi-real; b) Está configurado para corroborar y evitar así falsas alarmas, lo que se traduce en una mayor confiabilidad en el sistema; el parámetro de estimación del daño es la aceleración pico del suelo (PGA), esto permite realizar evaluaciones preliminares rápidas, mientras se organiza y prioriza los recursos necesarios para realizar evaluaciones más detalladas y; c) Se ha implementado con un bajo costo, para la fabricación de acelerómetros se ha empleado ordenadores de placa única de código abierto Arduino Uno y módulos de sensor MEMS, que son económicos y ofrecen una precisión de ± 0.1 gals adecuada para cumplir los objetivos del sistema.

El sistema de monitoreo implementado establece sus objetivos, arquitectura, protocolos, escenarios, y niveles respuesta con umbrales y rangos de aceleración que se han determinado en función a la recopilación de estudios de implementación y buenas prácticas de otros sistemas en el mundo que fueron

compatibilizados y adaptados para las condiciones locales; en ese sentido, resulta importante resaltar que se ha establecido un proceso de retroalimentación dentro de la arquitectura del sistema para realizar mejoras conforme los eventos sísmicos acontezcan, adicionalmente, se ha incorporado sistemas de redundancia para evitar la pérdida de energía (mediante Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (UPS, siglas en inglés), pérdida de registro (mediante la triada Memoria interna, Servidor Externo y repositorio Drive), así como la pérdida de comunicación (mediante la implementación de un módulo 3G de internet), y no menos importante, la arquitectura, rangos y umbrales establecidos en los niveles de respuesta sísmica se han establecido tomando como referencia los sistemas de monitoreo Puente Port Mann – Canadá (Kaya et al. (2017).), infraestructura de transporte Baden Württemberg – Alemania (Hilbring et al., 2014), viaducto Shinkansen – Japón ((Shimamura & Yamamura, 2006) y (Veneziano & Papadimitriou, 2003)) y corredor Hong Kong Shenzhen – China ((Kong et al., 2006) y Wong, 2007).

Debe destacarse además, respecto a los resultados obtenidos en el sismo de Chilca de magnitud Mw5.5 con epicentro a 40Km de la estación Villa El Salvador (la más cercana) que se han producido aceleraciones entre 29 a 75 gals, este evento representa el de mayor magnitud registrado por los acelerómetros del sistema de monitoreo, de la experiencia de este evento se desprende: ue los resultados preliminares obtenidos a partir de los registros propios de los acelerómetros instalados son coherentes con los resultados que incluyen los registros del CISMID-UNI e IGP, por lo que es funcional para casos de emergencia, adicionalmente, el sistema ha activado el nivel de respuesta II entre las estaciones María Auxiliadora y Angamos correspondiente a daño en vías e infraestructura nulo; y el nivel de respuesta III entre las estaciones Villa El Salvador a Villa María y, de San Borja Sur a Bayóvar, correspondiente a daño en la infraestructura potencialmente leve con posibilidad de daño en vías; de acuerdo con los reportes del concesionario, esto efectivamente es consistente con que no se han reportado daños en la infraestructura ni en las vías por lo que las restricciones en las operaciones fueron temporales.

Resulta importante indicar también la necesidad de complementar los registros del monitoreo con las estaciones acelerométricas del CISMID-UNI e IGP, dado que se evidencia un panorama más completo de las estaciones que podrían ser las

más afectadas, aunque se ha observado zonas con amplificación sísmica cerca de las estaciones: Villa El Salvador, Los Postes, San Martín y San Carlos.

Finalmente, de acuerdo a lo anteriormente expuesto, se concluye que el sistema de monitoreo implementado es funcional y consistente con la realidad, no obstante, es importante continuar con los registros de aceleración sísmica para consolidar un sistema robusto y confiable que permita mejorar la activación de protocolos y efectividad de la respuesta operativa luego de un evento sísmico. De acuerdo a la disertación realizada en el congreso ALAMYS (Arana, 2022), se resalta la confiabilidad y bajo costo de los acelerómetros para tomar decisiones operacionales y acciones técnicas necesarias de forma rápida y precisa durante un evento sísmico.

RECOMENDACIONES

Respecto a la infraestructura de la Línea 1, de acuerdo a la revisión realizada en el marco teórico, la infraestructura bajo la concesión de Línea 1, es compleja, no solo por la diferencia en antigüedad, propiedades mecánicas o dimensional de las estructuras, sino también por las interferencias externas (redes de agua, desagüe, gas, puentes peatonales, árboles, postes publicitarios, postes de cableado de energía eléctrica, etc), así como las condiciones geológicas y geotécnicas del terreno (se ha observado amplificaciones en determinadas áreas de la concesión) que pueden afectar la infraestructura, por lo que se recomienda: identificar, evaluar, inspeccionar e incluir de ser necesario en la respuesta sísmica planteada en el presente documento.

Si bien las inspecciones recomendadas se han establecido para eventos sísmicos, se recomienda establecer una línea base de condición estructural, y un monitoreo anual o bianual programado, independientemente de la eventualidad de un sismo, para mantener una base de datos de elementos críticos y registros de la condición de la infraestructura concesionada.

Así mismo, respecto a la implementación del sistema de monitoreo, se ha desarrollado hasta el nivel de monitoreo 3 (detectar, localizar y estimar la severidad del daño) de la escala de Rytter (1993), existe el desafío futuro de alcanzar el nivel de cuantificación y predicción, que corresponden al concepto del nivel 4. En ese sentido, la implementación realizada y las futuras investigaciones que se realicen a partir de los registros de los acelerómetros desplegados, permitirán cuantificar el daño y predecir la vida remanente, que son aspectos útiles para la operación de la Línea 1, no obstante, es importante precisar que, alcanzar el nivel 4 implicaría cambiar la arquitectura, incrementar la instrumentación sobre el viaducto (tableros y cabezales de pilar), así como la instalación de servicios (energía eléctrica, internet, accesibilidad) y otros recursos (protección y seguridad) que deben evaluarse en relación costo-beneficio, otros estudios sobre sistemas de alerta que alcanzan el nivel 4 aplicados a viaductos ferroviarios del metro de Japón ((Shimamura & Yamamura, 2006), y (Nakamura & Saita, 2007)), recomiendan realizar análisis No Lineales Dinámicos para correlacionar la probabilidad de daño con parámetros sísmicos como la velocidad pico del suelo (PGV), y la aceleración pico del suelo (PGA).

En el caso de la implementación de futuros sistemas de monitoreo, es importante la identificación de los procesos de gestión de emergencias de la entidad internas (organigrama y flujo de procesos), así como la disponibilidad de servicios, en particular de espacios disponibles, energía eléctrica ininterrumpida, y acceso estable a internet.

El sistema de monitoreo posee algunas particularidades que pueden ser revisados y mejorados a futuro: 1) La automatización del sistema de monitoreo depende de su adaptación a los sistemas de control, seguridad y operación de los trenes, y los procesos de gestión que tiene implementado la Línea 1 para la atención de emergencias, inclusive contando con esta infraestructura, no es recomendable implementar la automatización sin contar con un nivel de monitoreo nivel 4, es decir, obtener mayor precisión y seguridad en la cuantificación de los daños y predicción de la vida útil de la estructura, 2) Una mejora importante para el procesamiento en tiempo real o casi-real es complementar la arquitectura con el Sistema de Alerta Sísmica Temprana SASPERÚ, de esta manera anticipar la toma de decisiones, 3) Es parte del desafío futuro afinar los parámetros de estimación de daños mediante el registro de la aceleración pico del suelo (PGA), esto podrá ser posible conforme se registren más eventos sísmicos, y 4) La mejora de los componentes y del servicio de internet, para obtener mayor precisión y velocidad son mejoras que deben plantearse a futuro previo análisis de costo-beneficio.

Algunas buenas prácticas y recomendaciones de otros sistemas de monitoreo que pueden tomarse en cuenta para futuras mejoras son: a) Es necesario la integración del sistema de monitoreo con el sistema de Alerta Sísmica Temprana SASPERÚ, tal como se observa en el viaducto Shinkansen - Japón (Nakamura (2017)), así como el puente Port Mann - Canadá (Kaya & Ventura (2019)) y la infraestructura de transporte Baden Württemberg – Alemania (Hilbring et al., 2014), esto contribuye a reducir los tiempos de respuesta, la activación inmediata de los protocolos y la detención de las operaciones, b) Diversos estudios como por Wong (2007), Nakamura (2017) y, Kaya & Ventura (2019), recomiendan la automatización de los procesos, esto debido a la gran cantidad de sensores y procesos integrados para la identificación del daño, toda vez que los sensores desplegados no son numerosos, puede ser una necesidad futura automatizar el proceso de detención de operaciones y alerta directa al personal responsable en cada estación y sector de viaducto, c) M. Limongelli & Çelebi (2019) hacen

hincapié en la integridad de la información, si bien el sistema implementado tiene redundancia, otras ideas complementarias pueden ser la transmisión inalámbrica de datos a servidores locales externos y la implementación de redes 5G de baja latencia, d) Existe una oportunidad de mejora con el empleo de vehículos instrumentados que permitan establecer preliminarmente la condición estructural del viaducto durante la etapa de reinicio a marcha vista, estudios sobre monitoreo estructural asistido por vehículos, como el realizado por (Shokravi et al., 2020) pueden complementar las inspecciones y evaluaciones estructurales, e) Una alternativa complementaria a las inspecciones visuales, son las inspecciones aéreas con Drones y el procesamiento de imágenes para la identificación de defectos en la superficie (Seo et al., 2018).

Debe destacarse además, las recomendaciones obtenidas a partir de los resultados del evento sísmico de Chilca 5.5Mw, si bien los resultados preliminares son consistentes, se recomienda articular convenios que permitan procesar los registros acelerométricos de las estaciones del IGP y CISMID-UNI tan pronto como ocurra el evento sísmico esto dará una mayor precisión sobre el nivel de respuesta sísmica a implementar en la infraestructura de la Línea 1, en ese sentido, los niveles de respuesta activados fueron el nivel II (daño nulo) y III (daño potencialmente leve), si bien ambos casos fueron compatibles con la realidad de los hechos (no se han registrado daños y las operaciones continuaron normalmente), se requiere una mayor cantidad de registros acelerométricos de eventos sísmicos para realizar una retrospectiva sobre el sistema de Alerta Sísmica, además, se recomienda instalar acelerómetros adicionales en las estaciones Villa El Salvador, Los Postes, San Martín y San Carlos para tener una mayor sensibilidad sobre estas zonas con amplificación sísmica, y complementariamente, se recomienda profundizar en un análisis más refinado para establecer umbrales más realistas con la infraestructura existente y las condiciones de sitio.

Finalmente, es importante precisar que el diseño e implementación de un sistema de monitoreo, requiere de la vinculación de campos multidisciplinarios (por ejemplo, diseño, operación y mantenimiento de infraestructura ferroviaria, instrumentación e informática, entre otros), en ese sentido, el presente documento ha mostrado lineamientos y criterios que pueden emplearse para desarrollar, implementar y mejorar otros sistemas de monitoreo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrews, Jim., Buehler, David., Gill, Harjodh., & Bender, Weley. (2013). *Transportation and Construction Vibration Guidance Manual*.
<https://www.contracosta.ca.gov/DocumentCenter/View/34120/Caltrans-2013-construction-vibration-PDF?bidId=>
- Arana, P. (2022). *¿Cómo monitorear la Infraestructura Ferroviaria en una ciudad sísmica?* Asociación Latinoamericana de Metros y Subterráneos.
- Balageas, Daniel., Fritzen, C.-Peter., & Güemes, Alfredo. (2006). *Structural health monitoring*. ISTE.
- Bardet J.P., Oka F., & Yashima A. (1995). *The Great Hanshin Earthquake Disaster: The January 17, 1995 South Hyogo Prefecture Earthquake*.
<https://web.archive.org/web/20051227111706/http://geoinfo.usc.edu/gees/Reports/Report3/japan/KOBE.HTML>
- Berkeley Seismology Lab. (2014). *BSL's ElarmS earthquake early warning code in use in 5 countries globally*.
https://seismo.berkeley.edu/research/eew_around_the_world.html
- Brownjohn, J. M. W., Lee, J., & Cheong, B. (1999). Dynamic performance of a curved cable-stayed bridge. En *Engineering Structures* (Vol. 21).
www.elsevier.com/locate/engstruct
- Burkett, E. R., Given, D. D., & Jones, L. M. (2017). ShakeAlert: An Earthquake Early Warning System for the United States West Coast. En *Earthquake Spectra* (Vol. 29, Número SUPPL.1). Earthquake Engineering Research Institute. <https://doi.org/https://doi.org/10.3133/fs20143083>
- Caprio, M., Tarigan, B., Worden, C. B., Wiemer, S., & Wald, D. J. (2015). Ground Motion to Intensity Conversion Equations (GMICEs): A Global Relationship and Evaluation of Regional Dependency. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(3), 1476–1490. <https://doi.org/10.1785/0120140286>
- Castillo Aedo, J. L., & Alva Hurtado, J. E. (1993). *Peligro Sísmico en el Perú*.
https://www.jorgealvahurtado.com/files/redacis18_a.pdf
- Çelebi, M. (2019). S2HM of Buildings in USA. En M. P. Limongelli & M. Çelebi (Eds.), *Seismic Structural Health Monitoring* (pp. 3–30). Springer Tracts in Civil Engineering. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-13976-6_1
- CENEPRED. (s. f.). *Glosario de Términos*. Gestión del Riesgo de Desastres. Recuperado 15 de julio de 2023, de

- <https://dimse.cenepred.gob.pe/simse/cenepred/docs/glosario-terminos-grd-cenepred.pdf>
- Centro Sismológico Nacional. (2022). *Reporte sísmico: IGP/CENSIS/RS 2022-0297*. Instituto Geofísico del Perú. <https://ultimosismo.igp.gob.pe/evento/2022-0297>
- Chang, S.-P., & Im, C.-K. (2000). Thermal behaviour of composite box-girder bridges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 140(2), 117–126. <https://doi.org/10.1680/stbu.2000.140.2.117>
- Consortio Tren Eléctrico. (2012). *Memoria de cálculo - Tramo V*.
- Cornejo, J. (2022). Componentes de acelerómetro. En *Panel fotográfico de acelerómetros*.
- Derriso, M. M., McCurry, C. D., & Schubert Kabban, C. M. (2016). A novel approach for implementing structural health monitoring systems for aerospace structures. En *Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures* (pp. 33–56). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100148-6.00002-0>
- Diario Gestión. (2018, abril 19). *Metro de Lima: 12 estaciones permanecen cerradas por falla eléctrica*. <https://gestion.pe/economia/empresas/metro-lima-12-estaciones-permanecen-cerradas-falla-electrica-231883-noticia/>
- FEMA. (2003). *Multi-hazard loss estimation methodology*. https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-09/fema_hazus_advanced-engineering-building-module_user-manual.pdf
- Fujino, Y., & Siringoringo, D. (2008, julio 22). Structural health monitoring of bridges in Japan: an overview of the current trend. *Fourth International Conference on FRP Composites in Civil Engineering (CICE2008)*.
- Fujino, Y., Siringoringo, D. M., Ikeda, Y., Nagayama, T., & Mizutani, T. (2019). Research and Implementations of Structural Monitoring for Bridges and Buildings in Japan. En *Engineering* (Vol. 5, Número 6, pp. 1093–1119). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.09.006>
- Gharehbaghi, V. R., Noroozinejad Farsangi, E., Noori, M., Yang, T. Y., Li, S., Nguyen, A., Málaga-Chuquitaype, C., Gardoni, P., & Mirjalili, S. (2021). A Critical Review on Structural Health Monitoring: Definitions, Methods, and Perspectives. En *Archives of Computational Methods in Engineering*. Springer Science and Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09665-9>

- Gharehbaghi, V. R., Noroozinejad Farsangi, E., Yang, T. Y., & Hajirasouliha, I. (2020). Deterioration and damage identification in building structures using a novel feature selection method. *Structures*, 29, 458–470. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.040>
- Google. (s. f.-a). [Fotografía de paso a nivel Línea 1, Estación Pumacahua, Villa El Salvador, Lima]. Google Maps.
- Google. (s. f.-b). [Fotografía de viaducto Línea 1 - T1, Av. Velasco Astete, Surco, Lima]. Google Maps. Recuperado 15 de julio de 2023, de <https://goo.gl/maps/1uLacPKBLn9QMqYb9>
- Google. (s. f.-c). [Fotografía de viaducto Línea 1 - T2, San Borja Norte, San Borja, Lima]. Google Maps. Recuperado 15 de julio de 2023, de <https://goo.gl/maps/jUcbiSp1W15eg9ky5>
- Google. (s. f.-d). [Fotografía de viaducto Línea 1 - T3, Ca. Manuel Scorza, Surco, Lima]. Google Maps.
- Google. (s. f.-e). [Fotografía de viaducto Línea 1 - T4, San Borja Sur, San Borja, Lima]. Google Maps. Recuperado 15 de julio de 2023, de <https://goo.gl/maps/2VHC4EKNEQXQuo5mM8>
- Google. (s. f.-f). [Fotografía de viaducto Línea 1, Estación Bayóvar, San Juan de Lurigancho, Lima]. Google Maps. Recuperado 15 de julio de 2023, de <https://goo.gl/maps/zXZrU5it92CuHckA8>
- Google. (s. f.-g). [Fotografía del corredor Shenzhen Western, Hong Kong, China]. Google Maps. Recuperado 29 de agosto de 2022, de <https://goo.gl/maps/GFwPpcBcnfpckzcd8>
- Google. (s. f.-h). [Fotografía del Puente Port Mann, British Columbian, Canadá]. Google Maps. Recuperado 12 de junio de 2022, de <https://goo.gl/maps/hagF7D112ny71tLL8>
- Google. (s. f.-i). [Fotografía del viaducto Tohoku Shinkansen, Prefectura de Iwate, Japón]. Google Maps. Recuperado 15 de julio de 2023, de <https://goo.gl/maps/bvvFRe4jv1iWFden9>
- Google. (s. f.-j). [Fotografía viaducto Línea 1 - T2, Av. Los Vicus, Surco, Lima]. Google Maps. Recuperado 15 de julio de 2023, de <https://goo.gl/maps/S4ao7UWXAZcKV3Tn8>
- Google. (s. f.-k). [Fotografía viaducto Línea 1 - Tramo Antiguo, Estación Pumacahua, Villa El Salvador, Lima]. Google Maps. Recuperado 15 de julio de 2023, de <https://goo.gl/maps/QDjEVnrxtvjEbQu5>

- Habeenzu, H., McGetrick, P. J., Hester, D., & Taylor, S. E. (2021). Bridge management systems - A review of the state of the art and recommendations for future practice. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations - Proceedings of the 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2020*. <https://doi.org/10.1201/9780429279119-124>
- Hernando Tavera. (2020). *Análisis y evaluación de los patrones de sismicidad y escenarios sísmicos en el borde occidental del Perú*.
- Hernando Tavera. (2022, enero 7). *IGP: Lima es la zona del país con más silencio sísmico y energía acumulada*. Hernando Tavera. <https://larepublica.pe/sociedad/2022/01/07/sismo-en-lima-igp-lima-es-la-zona-del-pais-con-mas-silencio-sismico-y-energia-acumulada/>
- Hilbring, D., Titzschkau, T., Buchmann, A., Bonn, G., Wenzel, F., & Hohnecker, E. (2014). Earthquake early warning for transport lines. *Natural Hazards*, 70(3), 1795–1825. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9609-3>
- Hoult, N. A., Fidler, P. R. A., Hill, P. G., & Middleton, C. R. (2010). Long-Term Wireless Structural Health Monitoring of the Ferriby Road Bridge. *Journal of Bridge Engineering ASCE*, 15(2), 153–159. <https://doi.org/10.1061/ASCEBE.1943-5592.0000049>
- Kanda, K., Nakashima, M., Suzuki, Y., & Ogasawara, S. (2021). “q-NAVI”: A case of market-based implementation of structural health monitoring in Japan. *Earthquake Spectra*, 37(1), 160–179. <https://doi.org/10.1177/8755293020935884>
- Kaya, Y., & Safak, E. (2015). Real-time analysis and interpretation of continuous data from structural health monitoring (SHM) systems. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(3), 917–934. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9642-9>
- Kaya, Y., & Ventura, C. (2019). Seismic Structural Health Monitoring of Bridges in British Columbia, Canada. En M. P. Limongelli & M. Çelebi (Eds.), *Seismic Structural Health Monitoring: from theory to successful applications* (pp. 31–49). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13976-6_2
- Kaya, Y., Ventura, C., Huffman, S., & Turek, M. (2017). British Columbia smart infrastructure monitoring system. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(8), 579–588. <https://doi.org/10.1139/cjce-2016-0577>

- Kohon, J. (2016). *Metro de Lima: El caso de la Línea 1*.
<http://scioteca.caf.com/handle/123456789/894>
- Kong, A., Chan, S.-Y., Wong, C., & Kwan, S. (2006). *Desing of Hong Kong-Shenzhen Western Corridor*.
<https://www.researchgate.net/publication/281033909>
- Koo, K. Y., Brownjohn, J. M. W., List, D. I., & Cole, R. (2013). Structural health monitoring of the Tamar suspension bridge. *Structural Control and Health Monitoring*, 20(4), 609–625. <https://doi.org/10.1002/stc.1481>
- Lee, W. H. K., & Espinosa-Aranda, J. M. (2003). Earthquake Early Warning Systems: Current Status and Perspectives. En *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction* (Vol. 417, Número 2, pp. 409–423). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55903-7_53
- Lee, Y.-S. (2007). *Development of a structural health monitoring system for bridges and components*. <https://lib.dr.iastate.edu/rtd/15509>
- Li, F., Xiong, L., Liu, X., & Wu, X. (2006). Data Transfer Protocol in Bridge Structural Health Monitor System Using Wireless Sensor Network. *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 5102–5105.
- Li, S., Chen, Y., & Yu, T. (2021). Comparison of macroseismic-intensity scales by considering empirical observations of structural seismic damage. *Earthquake Spectra*, 37(1), 449–485. <https://doi.org/10.1177/8755293020944174>
- Limongelli, M., & Çelebi, M. (2019). Seismic Structural Health Monitoring. En M. P. Limongelli & M. Çelebi (Eds.), *Springer Tracts in Civil Engineering*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-13976-6>
- Limongelli, M. P., Dolce, M., Spina, D., Guéguen, P., Langlais, M., Wolinieck, D., Maufroy, E., Karakostas, C. Z., Lekidis, V. A., Morfidis, K., Salonikios, T., Rovithis, E., Makra, K., Masciotta, M. G., & Lourenço, P. B. (2019). S2HM in Some European Countries. En M. P. Limongelli & M. Çelebi (Eds.), *Seismic Structural Health Monitoring* (pp. 303–343). Springer Tracts in Civil Engineering. https://doi.org/10.1007/978-3-030-13976-6_13
- Lui Kuan, Y. C., & Agüero Barrantes, P. (2017). Introducción al Monitoreo de la Condición Estructural de Puentes. *Programa de Ingeniería Estructural*, 2(5), 1–14.
- Lynch, J. P., Wang, Y., Loh, K. J., Yi, J. H., & Yun, C. B. (2006). Performance monitoring of the Geumdang Bridge using a dense network of high-resolution

- wireless sensors. *Smart Materials and Structures*, 15(6), 1561–1575.
<https://doi.org/10.1088/0964-1726/15/6/008>
- Martínez Cañamares, J. (2016). *Sistemas de gestión de puentes: optimización de estrategias de mantenimiento: implementación en redes locales de carreteras* [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid].
<https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.39436>
- Mayes, R. L., & Sharpe, R. L. (1981). *FHWA/RD-81/081 Seismic Design Guidelines for Highway Bridges*.
- Manual de diseño de puentes, (2003).
- Guía para Inspección de Puentes, Directiva N°001-2006-MTC/14 35 (2019).
- Minson, S. E., Cochran, E. S., Wu, S., & Noda, S. (2021). A Framework for Evaluating Earthquake Early Warning for an Infrastructure Network: An Idealized Case Study of a Northern California Rail System. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.620467>
- Nakamura, Y. (2010). *Earthquake Early Warning and Realtime Earthquake Disaster Prevention*.
https://www.sdr.co.jp/papers/diss_papers/diss10_eew_sdr.pdf
- Nakamura, Y., & Saita, J. (2007). UrEDAS, the Earthquake Warning System: Today and Tomorrow. En *Earthquake Early Warning Systems* (pp. 249–281). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72241-0_13
- Norabuena, E., & Tavera, H. (2017). *Sistema de Alerta Sísmica ante la ocurrencia de sismos extremo en Perú*.
http://sigrid.cenepred.gob.pe/docs/PARA%20PUBLICAR/IGP/Sistema_alerta_sismica_ocurrencia_sismos_extremos_peru_SASPERU_2017.pdf
- Norabuena Ortiz, E., Portugal Patiño, D., Delgado Ortega, E., Hidalgo Torrejón, F., Yopez Ayma, R., Valdera Santamaría, J., Cuya Escriba, C., & Vicente Marchán, D. (2020). *Protocolo Operativo del Sistema de Alerta Sísmica Peruano SASPe*.
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1790631/Protocolo%20Operativo%20del%20SASPe%2030.10.2020.pdf.pdf>
- Ochi, S., & Suzuoki, M. (2011). The lessons of the Great East Japan Earthquake 2011 and the countermeasures against earthquakes and tsunami in future-Fundamental Concepts behind Future Tsunami Disaster Prevention. En K. Tamura (Ed.), *Proceedings of the 43rd joint meeting of U.S.-Japan panel on*

- wind and seismic effects UJNR* (pp. 49–60).
<https://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/joint/43/43.htm>
- OSITRAN. (2021). *Informe de Desempeño 2020: Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao, Línea 1*.
- Pecho, Y. (2017). *Importancia del Mantenimiento Preventivo de Puentes en el Perú*. Universidad de Piura.
- PROVÍAS Nacional. (2020). *Memoria Institucional 2020*. www.pvn.gob.pe
- PROVÍAS Nacional. (2022). *Sistema Virtual de Gestión de Puentes*.
<https://www.pvn.gob.pe/puentes/spuentes/>
- Rytter, A. (1993). *Vibrational based inspection of civil engineering structures* [PhD. Thesis, Aalborg University]. <https://vbn.aau.dk/en/publications/vibrational-based-inspection-of-civil-engineering-structures>
- Scheer, Joachim. (2010). *Failed bridges: case studies, causes and consequences*. Ernst & Sohn.
- Seminario Manrique, E. (2004). *Guía para el diseño de puentes con vigas y losas* [Tesis de Pregrado]. Universidad de Piura.
- Seo, J., Duque, L., & Wacker, J. (2018). Drone-enabled bridge inspection methodology and application. *Automation in Construction*, 94, 112–126.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.006>
- Shimamura, M., & Yamamura, K. (2006). Development of Shinkansen Earthquake Impact Assessment System. *JR EAST Technical Review*, 7(Innovation in signal Systems and Transport Management), 56–64.
<https://www.jreast.co.jp/e/development/tech/contents07.html>
- Shokravi, H., Shokravi, H., Bakhary, N., Heidarrezaei, M., Kolor, S. S. R., & Petru, M. (2020). Vehicle-assisted techniques for health monitoring of bridges. En *Sensors (Switzerland)* (Vol. 20, Número 12, pp. 1–29). MDPI AG.
<https://doi.org/10.3390/s20123460>
- Sivasuriyan, A., Vijayan, D. S., Leemarose, A., Revathy, J., Gayathri Monicka, S., Adithya, U. R., & Jebasingh Daniel, J. (2021). Development of Smart Sensing Technology Approaches in Structural Health Monitoring of Bridge Structures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021.
<https://doi.org/10.1155/2021/2615029>
- Speckmann, H., & Henrich, R. (2004). *Structural Health Monitoring (SHM): Overview on Technologies under Development*.

- Staquet, S., Kalogiannakis, G., Detandt, H., van Hamelrijck, D., & Espion, B. (2007). Field testing of a 30-year-old composite Preflex railway bridge. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Bridge Engineering*, 160(2), 89–98. <https://doi.org/10.1680/bren.2007.160.2.89>
- UNESCO. (2021). *International Platform on Earthquake Early Warning Systems (IP-EEWS)*. Disaster Risk Reduction. <https://en.unesco.org/disaster-risk-reduction/early-warning-systems/IP-EEWS#:~:text=An%20earthquake%20early%20warning%20system,to%20implement%20automatized%20emergency%20measures>.
- Vardanega, P. J., Webb, G. T., Fidler, P. R. A., & Middleton, C. R. (2016). Bridge monitoring. En *Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation and Maintenance* (pp. 759–775). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800058-8.00029-3>
- Veeraraghavan, S., Heaton, T. H., & Krishnan, S. (2019). Lower bounds on ground motion at point reyes during the 1906 San Francisco earthquake from train toppling analysis. *Seismological Research Letters*, 90(2 A), 683–691. <https://doi.org/10.1785/0220180327>
- Veneziano, D., & Papadimitriou, A. G. (2003). Optimizing the Seismic Early Warning System for the Tohoku Shinkansen. En J. Zschau et al. (Ed.), *Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction* (pp. 727–734). Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Villegas-Lanza, J. C., Chlieh, M., Cavalié, O., Tavera, H., Baby, P., Chire-Chira, J., & Nocquet, J. M. (2016). Active tectonics of Peru: Heterogeneous interseismic coupling along the Nazca megathrust, rigid motion of the Peruvian Sliver, and Subandean shortening accommodation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10), 7371–7394. <https://doi.org/10.1002/2016JB013080>
- Webb, G. T., Vardanega, P. J., Fidler, P. R. A., & Middleton, C. R. (2014). Analysis of Structural Health Monitoring Data from Hammersmith Flyover. *Journal of Bridge Engineering*, 19(6), 05014003. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0000587](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000587)
- Wong, K. Y. (2004). Instrumentation and health monitoring of cable-supported bridges. *Structural Control and Health Monitoring*, 11(2), 91–124. <https://doi.org/10.1002/stc.33>

- Wong, K. Y. (2007). Design of a structural health monitoring system for long-span bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 3(2), 169–185. <https://doi.org/10.1080/15732470600591117>
- Worden, C. B., Gerstenberger, M. C., Rhoades, D. A., & Wald, D. J. (2012). Probabilistic relationships between ground-motion parameters and Modified Mercalli Intensity in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(1), 204–221. <https://doi.org/10.1785/0120110156>
- Xin, D., Daniell, J. E., & Wenzel, F. (2020). Review article: Review of fragility analyses for major building types in China with new implications for intensity–PGA relation development. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 643–672. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-643-2020>
- Yamamoto, S., & Tomori, M. (2013). Earthquake Early Warning System for Railways and its Performance. *Journal of JSCE*, 1(2011 Great East Japan Earthquake), 322–328.
- Yi Cheng, L. K., & Aguero Barrantes, P. (2017). *Introducción al Monitoreo de la Condición Estructural de Puentes*.
- Zanini, M. A., Hofer, L., & Faleschini, F. (2019). Reversible ground motion-to-intensity conversion equations based on the EMS-98 scale. *Engineering Structures*, 180, 310–320. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.032>

ANEXOS

| | |
|---|------------|
| ANEXO A: Escalas de intensidad sísmica | 131 |
| ANEXO B: Ficha de instalación de acelerómetros | 135 |
| B.1. Estación Parque Industrial (PIN)..... | 135 |
| B.2. Estación Atocongo (ATO)..... | 136 |
| B.3. Estación Angamos (ANG)..... | 137 |
| B.4. Estación Gamarra (GAM) | 138 |
| B.5. Estación Pirámides del Sol (PIR)..... | 139 |
| B.6. Estación Bayóvar (BAY) | 140 |
| ANEXO C: Nivel de calificación empleada para puentes | 141 |

ANEXO A: Escalas de intensidad sísmica

Tabla N°16: Descripción de las escalas de intensidad sísmica.
Fuente: Elaboración propia.

| Escala de intensidad sísmica | | | |
|---|--|--|--|
| MMI-56 | JMA-96 | EMS-98 | CSIS-08 |
| Nivel III Algunas personas sienten el movimiento. Objetos colgantes se balancean. | Nivel II Sentido por algunas personas. Objetos que cuelgan tiemblan ligeramente. | Nivel III Sentido por pocas personas. | Nivel III Pocas personas pueden sentirlo. Puertas y ventanas hacen un ligero ruido. |
| Nivel IV La mayoría de las personas siente el movimiento. Objetos colgantes, ventanas y puertas se balancean. | Nivel III Sentido por la mayoría de las personas. Los platos golpetean. | Nivel IV Sentido por muchas personas. Puertas y ventanas golpetean. | Nivel IV Sentido por la mayoría de las personas. Puertas y ventanas golpetean. |
| Nivel V Casi todos sienten el movimiento. Las puertas y ventanas se cierran o abren. Los líquidos pueden derramarse de recipientes abiertos. | Nivel IV La mayoría de las personas entran en pánico algunos quieren escapar. Objetos colgantes tiemblan ligeramente. | Nivel V Sentido por una gran mayoría de personas. Puertas y ventanas se abren o cierran, objetos colgantes se balancean visiblemente. | Nivel V Sentido por una gran mayoría de personas. Objetos colgantes se agitan visiblemente. |

| Escala de intensidad sísmica | | | |
|--|--|--|--|
| MMI-56 | JMA-96 | EMS-98 | CSIS-08 |
| <p>Nivel VI</p> <p>Las personas tienen problemas para caminar. El yeso de paredes se agrieta. Sin daños estructurales.</p> | <p>Nivel V (L)</p> <p>La mayoría de las personas quiere escapar. Objetos colgantes se sacuden violentamente. Se desconecta automáticamente el suministro de gas.</p> | <p>Nivel VI</p> <p>Se caen algunos objetos. Ocurren fisuras finas sobre el yeso.</p> | <p>Nivel VI</p> <p>Inestabilidad de personas paradas. La mayoría de los edificios permanecen intactos</p> |
| <p>Nivel VII</p> <p>Las personas tienen problemas para permanecer de pie. Ladrillos sueltos se caen de edificios. Hay daño leve en edificios bien construidos.</p> | <p>Nivel V (U)</p> <p>Hay pánico generalizado. Ocasionalmente las tuberías de gas e instalaciones de agua se dañan (el servicio se interrumpe).</p> | <p>Nivel VII</p> <p>La mayoría de las personas se asustan. Caída de recubrimientos de yeso. Muchos edificios ordinarios sufren daños moderados: se producen pequeñas fisuras en muros.</p> | <p>Nivel VII</p> <p>La mayoría de las personas entran en pánico. Algunos edificios sufren daños leves a moderados, la mayoría permanecen intactos.</p> |
| <p>Nivel VIII</p> <p>Los conductores tienen problemas para manejar. Edificios bien construidos sufren daños</p> | <p>Nivel VI (L)</p> <p>La gente tiene dificultad para ponerse de pie. Algunas casas con mejor resistencia a sismos sufren daños en muros y</p> | <p>Nivel VIII</p> <p>Dificultad en las personas para permanecer de pie. Algunos edificios ordinarios muestran fallas</p> | <p>Nivel VIII</p> <p>Las personas tienen problemas para caminar. Algunos edificios sufren daños graves, la mayoría de los</p> |

| Escala de intensidad sísmica | | | |
|---|---|---|---|
| MMI-56 | JMA-96 | EMS-98 | CSIS-08 |
| leves a moderados. | columnas. Las líneas principales de gaseoductos e instalaciones de almacenamiento de agua están dañadas. | graves en los muros. | edificios sufre daños leves |
| Nivel IX Edificios bien construidos sufren daños considerables. Algunas tuberías subterráneas se rompen. | Nivel VI (U) Las personas no pueden mantenerse de pie. Algunas casas con mejor resistencia a sismos presentan daños en muros y columnas. Las líneas troncales y principales de gas y agua se dañan a gran escala, las instalaciones de energía se interrumpen. | Nivel IX Hay pánico general. Edificios ordinarios sufren daños muy graves: fallas estructurales parciales. | Nivel IX Personas en movimiento caen. Algunos edificios se destruyen, la mayoría de los edificios sufre daños leves a moderados. |
| Nivel X La mayoría de los edificios y sus cimientos se destruyen. Vías del tren se doblan ligeramente. | Nivel VII La gente no puede moverse a voluntad. Algunas casas con mejor resistencia a sismos están severamente dañadas. Las | Nivel X Edificios ordinarios colapsan. | Nivel X Personas caen o sienten que son lanzadas, la mayoría de los edificios se destruyen o están severamente |

| Escala de intensidad sísmica | | | |
|---|--|--|---|
| MMI-56 | JMA-96 | EMS-98 | CSIS-08 |
| | instalaciones de energía, agua y gas se ven interrumpidas por enormes grietas en la superficie y deslizamientos de tierra. | | dañados, se producen deslizamientos de tierra. |
| Nivel XI La mayoría de los edificios colapsan. Algunos puentes se destruyen. Se destruyen tuberías subterráneas. Las vías del tren se encuentran muy dobladas. | | Nivel XI Edificios ordinarios colapsan, incluso aquellos con un buen diseño sismorresistente. | Nivel XI La gran mayoría de edificios colapsa. |
| Nivel XII Casi todo está destruido. Los objetos son lanzados al aire. | | Nivel XII Todos los edificios colapsan. | Nivel XII Todos los edificios colapsan. |
| MMI: Intensidad Mercalli Modificada. EMS: Escala Macrosísmica Europea. JMA: Agencia Meteorológica Japonés. CSIS: Escala de Intensidad Sísmica China. | | | |

ANEXO B: Ficha de instalación de acelerómetros

B.1. Estación Parque Industrial (PIN)

Tabla N°17: Ficha técnica del acelerómetro en Parque Industrial.
Fuente: Elaboración propia.

| ACELERÓMETRO PARQUE INDUSTRIAL | | | |
|--------------------------------|--|------------------|----------------------------|
| Longitud: | -76.940 | Latitud: | -12.196 |
| Ubicación: | Av. Separadora Industrial con Av. El Sol | | |
| Provincia: | Lima | Distrito: | Villa El Salvador |
| Progresiva: | 1+750 | Área: | Sala de Telecomunicaciones |
| Tramo: | Tramo Antiguo | Viaducto: | Superficial |
| Código: | PIN | Estado: | Operativo |

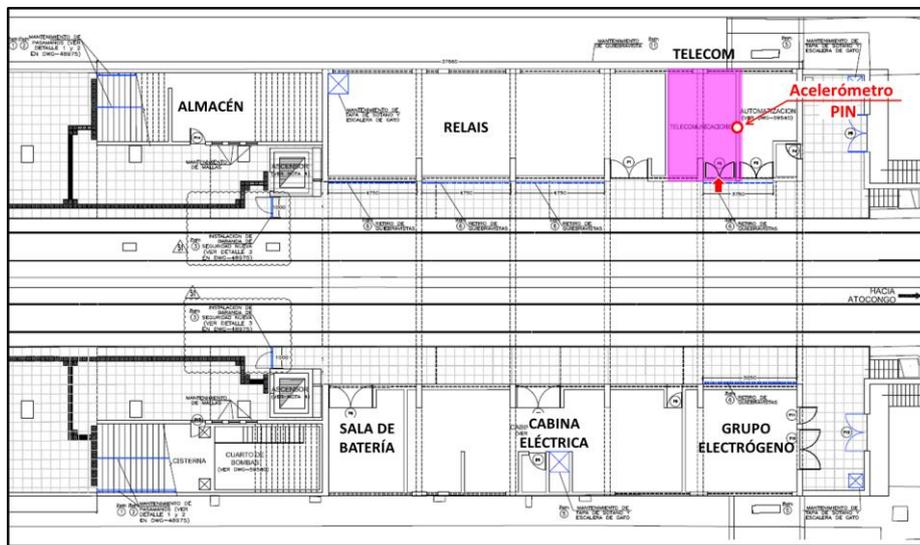


Figura N°84: Plano en planta acelerómetro PIN.

Fuente: Elaboración propia



Figura N°85: Fotografía de acelerómetro PIN.

Fuente: Fotografía propia.

B.2. Estación Atocongo (ATO)

Tabla N°18: Ficha técnica del acelerómetro en Atocongo.

Fuente: Elaboración propia.

| ACELERÓMETRO ATOCONGO | | | |
|-----------------------|-----------------------------------|------------------|------------------------|
| Longitud: | -76.980 | Latitud: | -12.151 |
| Ubicación: | Av. Los Héroes con Av. Buckingham | | |
| Provincia: | Lima | Distrito: | San Juan de Miraflores |
| Progresiva: | 9+050 | Área: | Sala Técnica |
| Tramo: | Tramo Antiguo | Viaducto: | Elevado |
| Código: | ATO | Estado: | Operativo |

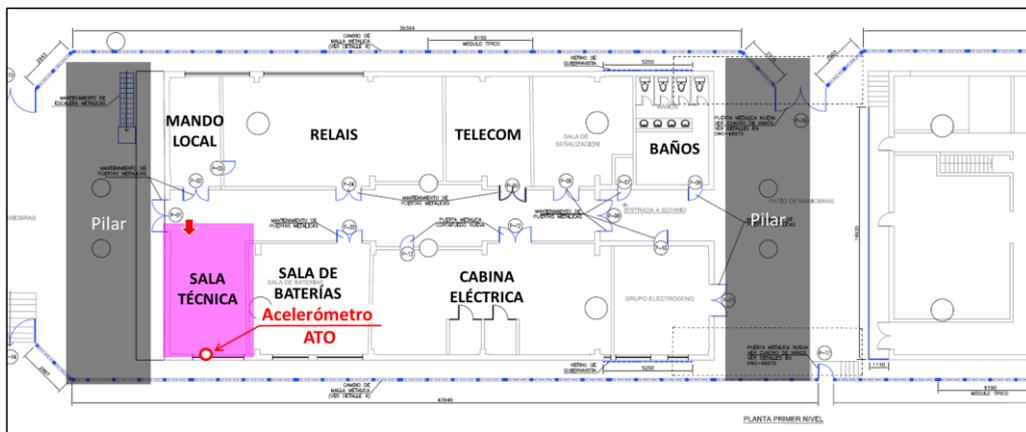


Figura N°86: Plano en planta acelerómetro ATO.

Fuente: Fotografía propia.



Figura N°87: Fotografía de acelerómetro ATO.

Fuente: Fotografía propia.

B.3. Estación Angamos (ANG)

Tabla N°19: Ficha técnica del acelerómetro en Angamos.

Fuente: Elaboración propia.

| ACELERÓMETRO ANGAMOS | | | |
|----------------------|------------------------------|------------------|--------------|
| Longitud: | -77.000 | Latitud: | -12.110 |
| Ubicación: | Av. Aviación con Av. Angamos | | |
| Provincia: | Lima | Distrito: | San Borja |
| Progresiva: | 14+600 | Área: | Sala Técnica |
| Tramo: | Tramo I | Viaducto: | Elevado |
| Código: | ANG | Estado: | Operativo |

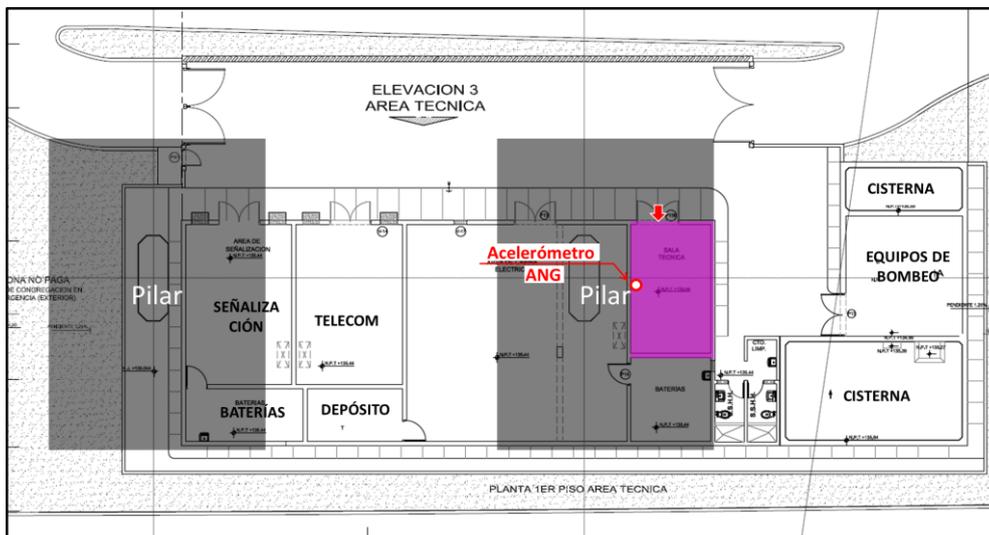


Figura N°88: Plano en planta acelerómetro ANG.

Fuente: Fotografía propia.

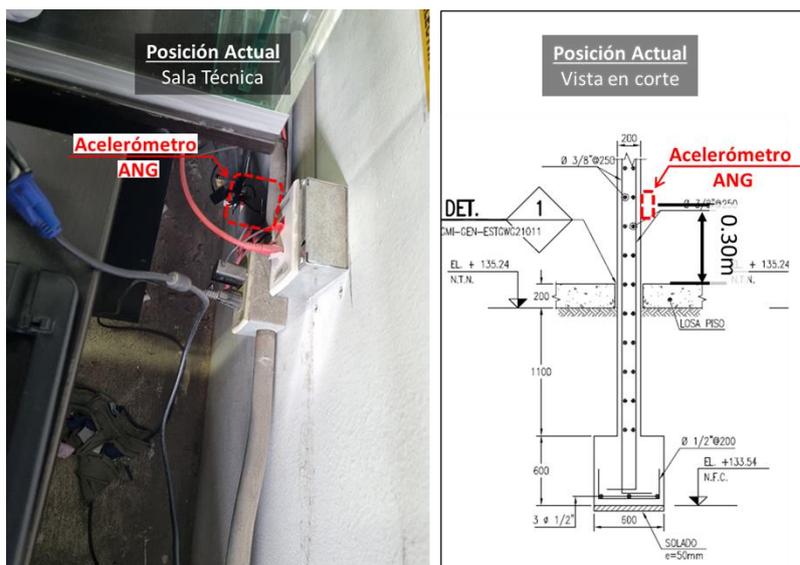


Figura N°89: Fotografía de acelerómetro ANG.

Fuente: Fotografía propia.

B.4. Estación Gamarra (GAM)

Tabla N°20: Ficha técnica del acelerómetro en Gamarra.

Fuente: Elaboración propia.

| ACELERÓMETRO GAMARRA | | | |
|----------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|
| Longitud: | -77.010 | Latitud: | -12.066 |
| Ubicación: | Av. Aviación con Jr. Hipólito Unanue | | |
| Provincia: | Lima | Distrito: | La Victoria |
| Progresiva: | 19+900 | Área: | Sala de Tableros |
| Tramo: | Tramo I | Viaducto: | Elevado |
| Código: | GAM | Estado: | Operativo |

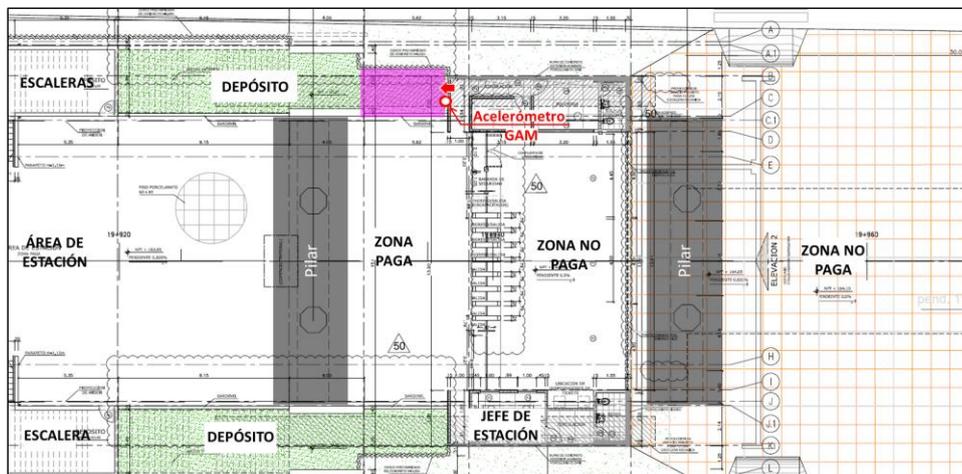


Figura N°90: Plano en planta acelerómetro GAM.

Fuente: Fotografía propia.

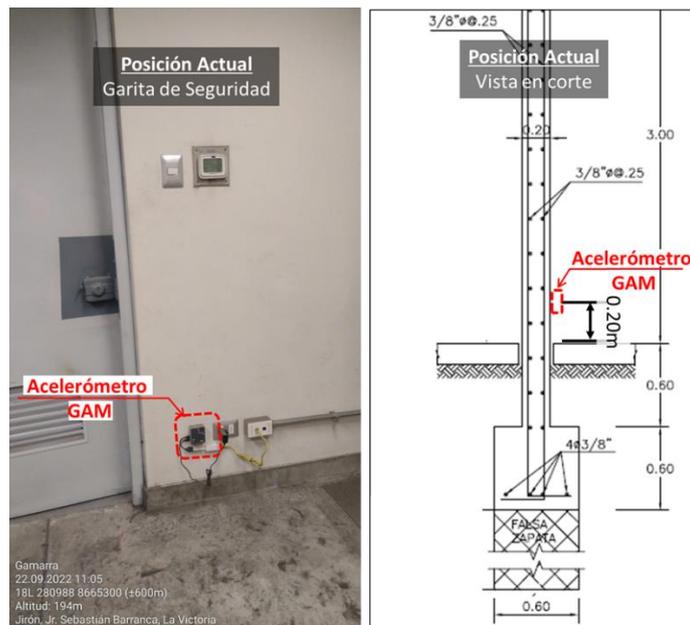


Figura N°91: Fotografía de acelerómetro GAM.

Fuente: Fotografía propia.

B.5. Estación Pirámides del Sol (PIR)

Tabla N°21: Ficha técnica del acelerómetro en Pirámides del Sol.
Fuente: Elaboración propia.

| ACELERÓMETRO PIRÁMIDES DEL SOL | | | |
|--------------------------------|---|------------------|--------------------------|
| Longitud: | -77.003 | Latitud: | -12.018 |
| Ubicación: | Av. Próceres de la Independencia con Av. Pirámide del Sol | | |
| Provincia: | Lima | Distrito: | San Juan de Lurigancho |
| Progresiva: | 25+850 | Área: | Garita de Control |
| Tramo: | Tramo II | | Viaducto: Elevado |
| Código: | PIR | | Estado: Operativo |

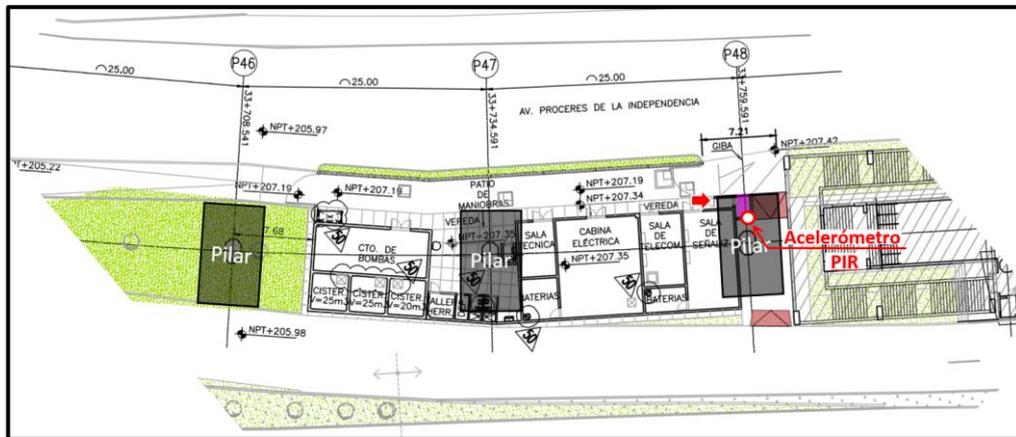


Figura N°92: Plano en planta acelerómetro PIR.
Fuente: Fotografía propia.

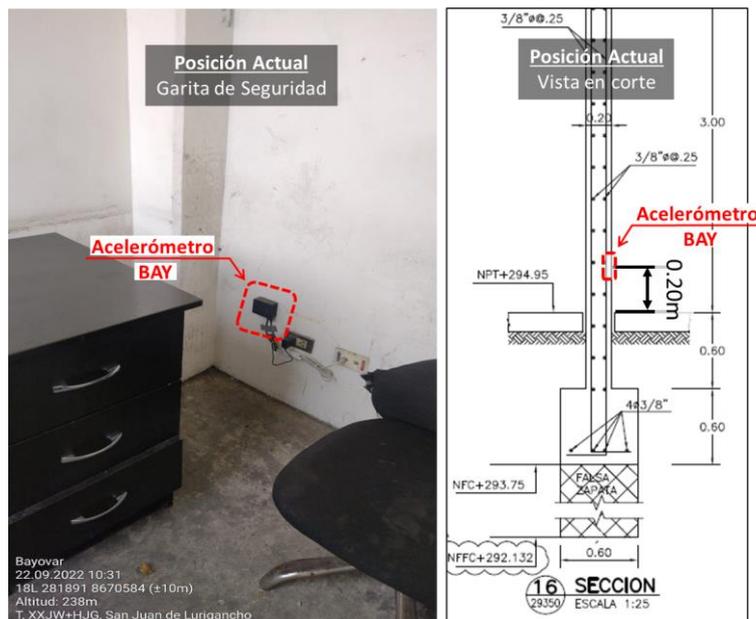


Figura N°93: Fotografía de acelerómetro PIR.
Fuente: Fotografía propia.

ANEXO C: Nivel de calificación empleada para puentes

Tabla N°23: Nivel de calificación empleada para puentes.
Fuente: Guía Para Inspección de Puentes (2019).

| CONDI- CIÓN | DESCRIPCIÓN | NECESIDAD DE ATENCIÓN |
|--|---|--|
| 1 SATISFAC- TORIA | -Buen estado. Sin daño o los daños son leves. La estabilidad estructural, seguridad vial y durabilidad están aseguradas. | Labores de mantenimiento rutinario preventivo. |
| 2 ADECUA- DA | - Deficiencias no afectan el funcionamiento adecuado del puente, en donde los elementos principales ¹ pueden presentar deterioros que afecten únicamente por durabilidad. - Deterioros deben ser tratados por aspectos de durabilidad, evitar la progresión del daño en elementos secundarios ² , o procurar un adecuado nivel de seguridad vial a los usuarios. | Reparaciones menores que se programan en conjunto con el siguiente mantenimiento periódico del puente. |
| 3 DEFICIEN- TE | - Deterioro significativo que podría afectar aspectos funcionales pero los componentes estructurales del puente funcionan aún de forma adecuada, sin impacto en los márgenes de seguridad estructural. - Daño o defecto en seguridad vial riesgoso para los usuarios. | Es necesario programar una intervención no rutinaria en conjunto con el siguiente mantenimiento periódico. |
| 4 SERIA | -Puente estable, pero con deterioro en uno o varios elementos estructurales primarios, o falla en secundarios, que reducen significativamente los márgenes de seguridad estructural. Si no se trata la progresión del deterioro, este podría conducir a una situación inestable a futuro. - Deficiencia en seguridad vial muy riesgosa para los usuarios. | Atención pronta. Se recomienda atender pronto el puente para evitar la progresión del daño. Se debe atender una situación peligrosa en la seguridad vial de forma prioritaria incluyendo el señalamiento al usuario de la condición tránsito riesgosa |
| 5 ALARMAN- TE | La estabilidad de la estructura puede estar comprometida en un periodo de tiempo costo debido a la progresión activa del daño, o la deficiencia compromete (o podría comprometer en el corto plazo) parcial o totalmente el tránsito vehicular sobre el puente. | Atención prioritaria. Los trabajos de rehabilitación son prioritarios y se recomienda colocar señales visibles al usuario indicando la condición riesgosa del puente. Según el tipo de daño, es posible que sea necesaria una evaluación |

| | | |
|---|--|---|
| | | de la capacidad estructural actual de la estructura para juzgar si es necesario restringir su uso. |
| 6 RIESGO INACEPTA- BLE | <ul style="list-style-type: none">- Condición de deterioro inaceptable en puentes de importancia muy alta o situación de puentes inestable con riesgo alto de colapso.- Daño severo en un elemento crítico³ o daños severos de extendidos sobre varios elementos principales.- Daño irreversible que posiblemente requiera el cambio del puente o una rehabilitación mayor. | Atención inmediata. Cerrar el puente o restringir su uso inmediatamente. Evaluar la necesidad de colocación de soportes temporales o un puente provisional. Realizar una evaluación estructural con propuesta para rehabilitación o cambio del puente o iniciar proceso de rehabilitación o de construcción de una estructura nueva. |

¹ Elementos principales: Tablero, vigas principales de superestructura, torres, cables, apoyos, pilas, bastiones, cimentaciones, y elementos de refuerzo o rehabilitación estructural sobre elementos principales.

² Elementos secundarios: Dispositivos y señalamiento de seguridad vial, elementos de los accesos y obras/dispositivos/señalamiento/tratamientos de protección contra eventos extraordinarios (impacto vehicular, sismo, avenida) o por durabilidad.

³ Elemento crítico: elemento principal no redundante cuya falla lleva al colapso de la estructura.
