

**UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA Y TECNOLOGIAS DE INFORMACION**  
**ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL**

Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

**Tesis de Grado**

**Determinación del efecto de los cambios de la temperatura ambiental en las  
frecuencias de vibrar en el puente tipo cerchas metálicas sobre el río Abangares  
(RN-1)**

Autor

Aicela María González Cruz

Tutor

Luis Alejandro Carvajal Soto, D.Sc, Ing.

Mayo, 2023



**UNIVERSIDAD LATINA  
DE COSTA RICA**

POWERED BY **Arizona State University**

## TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: Determinación del efecto de los cambios de la temperatura ambiental en las frecuencias de vibrar en el puente tipo cerchas metálicas sobre el Río Abangares (RN-1), por el (la) estudiante: GONZALEZ CRUZ AICELA MARIA, fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede San Pedro, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:

LUIS  
ALEJANDRO  
CARVAJAL  
SOTO (FIRMA)

Firmado digitalmente  
por LUIS ALEJANDRO  
CARVAJAL SOTO  
(FIRMA)  
Fecha: 2023.05.12  
17:22:09 -06'00'

---

Luis Alejandro Carvajal Soto  
Tutor

GERARDO  
ENRIQUE  
CHACON  
ROJAS (FIRMA)

Firmado digitalmente  
por GERARDO  
ENRIQUE CHACON  
ROJAS (FIRMA)  
Fecha: 2023.05.09  
09:35:01 -06'00'

---

Gerardo Chacón Rojas  
Lector

RONALD  
EUGENIO  
JIMENEZ  
CASTRO (FIRMA)

Firmado digitalmente por  
RONALD EUGENIO  
JIMENEZ CASTRO (FIRMA)  
Fecha: 2023.05.07 23:04:41  
-06'00'

---

Ronald Jiménez Castro  
Lector

## DECLARACIÓN JURADA

Yo, Aicela María González Cruz estudiante de la Universidad Latina de Costa Rica, declaro bajo fe de juramento y consciente de las responsabilidades penales de este acto, que soy Autor Intelectual de la Tesis titulada:

**Determinación del efecto de los cambios de la temperatura ambiental en las frecuencias de vibrar en el puente tipo cerchas metálicas sobre el río Abangares (RN-1)**

Por lo que libero a la Universidad de cualquier responsabilidad en caso de que mi declaración sea falsa.

Firmo en San José, 08 de mayo de 2023

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Aicela María González Cruz', with a horizontal line extending to the right.

Aicela María González Cruz

**Licencia De Distribución No Exclusiva (carta de la persona autora para uso didáctico)**

**Universidad Latina de Costa Rica**

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Yo (Nosotros):</b>            | Aicela María González Cruz   |
| <b>De la Carrera / Programa:</b> | Licenciatura en Ingeniería Civil   |
| <b>Modalidad de TFG:</b>         | Tesis  |
| <b>Titulado:</b>                 | Determinación del efecto de los cambios de la temperatura ambiental en las frecuencias de vibrar en el puente tipo cerchas metálicas sobre el río Abangares (RN-1) |

Al firmar y enviar esta licencia, usted, el autor (es) y/o propietario (en adelante el “**AUTOR**”), declara lo siguiente: **PRIMERO:** Ser titular de todos los derechos patrimoniales de autor, o contar con todas las autorizaciones pertinentes de los titulares de los derechos patrimoniales de autor, en su caso, necesarias para la cesión del trabajo original del presente TFG (en adelante la “**OBRA**”). **SEGUNDO:** El **AUTOR** autoriza y cede a favor de la **UNIVERSIDAD U LATINA S.R.L.** con cédula jurídica número 3-102-177510 (en adelante la “**UNIVERSIDAD**”), quien adquiere la totalidad de los derechos patrimoniales de la **OBRA** necesarios para usar y reusar, publicar y republicar y modificar o alterar la **OBRA** con el propósito de divulgar de manera digital, de forma perpetua en la comunidad universitaria. **TERCERO:** El **AUTOR** acepta que la cesión se realiza a título gratuito, por lo que la **UNIVERSIDAD** no deberá abonar al autor retribución económica y/o patrimonial de ninguna especie. **CUARTO:** El **AUTOR** garantiza la originalidad de la **OBRA**, así como el hecho de que goza de la libre disponibilidad de los derechos que cede. En caso de impugnación de los derechos autorales o reclamaciones instadas por terceros relacionadas con el contenido o la autoría de la **OBRA**, la responsabilidad que pudiera derivarse será exclusivamente de cargo del **AUTOR** y este garantiza mantener indemne a la **UNIVERSIDAD** ante cualquier reclamo de algún tercero. **QUINTO:** El **AUTOR** se compromete a guardar confidencialidad sobre los alcances de la presente cesión, incluyendo todos aquellos temas que sean de orden meramente institucional o de organización interna de la **UNIVERSIDAD** **SEXTO:** La presente autorización y cesión se regirá por las leyes de la República de Costa Rica. Todas las controversias, diferencias, disputas o reclamos que pudieran derivarse de la presente cesión y la materia a la que este se refiere, su ejecución, incumplimiento, liquidación, interpretación o validez, se resolverán por medio de los Tribunales de Justicia de la República de Costa Rica, a cuyas normas se someten el **AUTOR** y la

**UNIVERSIDAD**, en forma voluntaria e incondicional. **SÉPTIMO:** El **AUTOR** acepta que la **UNIVERSIDAD**, no se hace responsable del uso, reproducciones, venta y distribuciones de todo tipo de fotografías, audios, imágenes, grabaciones, o cualquier otro tipo de presentación relacionado con la **OBRA**, y el **AUTOR**, está consciente de que no recibirá ningún tipo de compensación económica por parte de la **UNIVERSIDAD**, por lo que el **AUTOR** haya realizado antes de la firma de la presente autorización y cesión. **OCTAVO:** El **AUTOR** concede a **UNIVERSIDAD**, el derecho no exclusivo de reproducción, traducción y/o distribuir su envío (incluyendo el resumen) en todo el mundo en formato impreso y electrónico y en cualquier medio, incluyendo, pero no limitado a audio o video. El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD**. puede, sin cambiar el contenido, traducir la **OBRA** a cualquier lenguaje, medio o formato con fines de conservación. **NOVENO:** El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD** puede conservar más de una copia de este envío de la **OBRA** por fines de seguridad, respaldo y preservación. El **AUTOR** declara que el envío de la **OBRA** es su trabajo original y que tiene el derecho a otorgar los derechos contenidos en esta licencia. **DÉCIMO:** El **AUTOR** manifiesta que la **OBRA** y/o trabajo original no infringe derechos de autor de cualquier persona. Si el envío de la **OBRA** contiene material del que no posee los derechos de autor, el **AUTOR** declara que ha obtenido el permiso irrestricto del propietario de los derechos de autor para otorgar a **UNIVERSIDAD** los derechos requeridos por esta licencia, y que dicho material de propiedad de terceros está claramente identificado y reconocido dentro del texto o contenido de la presentación. Asimismo, el **AUTOR** autoriza a que en caso de que no sea posible, en algunos casos la **UNIVERSIDAD** utiliza la **OBRA** sin incluir algunos o todos los derechos morales de autor de esta. **SI AL ENVÍO DE LA OBRA SE BASA**

**EN UN TRABAJO QUE HA SIDO PATROCINADO O APOYADO POR UNA AGENCIA U ORGANIZACIÓN QUE NO SEA UNIVERSIDAD U LATINA, S.R.L., EL AUTOR DECLARA QUE HA CUMPLIDO CUALQUIER DERECHO DE REVISIÓN U OTRAS OBLIGACIONES REQUERIDAS POR DICHO CONTRATO O ACUERDO. La presente autorización se extiende el día**

08

de

mayo

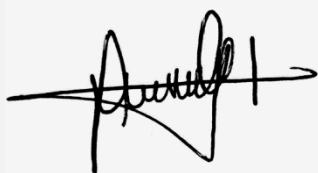
de

2023

a las

18:40

Firma del estudiante(s):



## **Agradecimientos**

Primeramente, un agradecimiento a Dios por permitirme concluir de manera exitosa esta etapa de mi vida. A mis padres por apoyarme en todo momento y por el esfuerzo al darme una carrera e impulsarme con mis objetivos profesionales.

De igual forma a mis hermanas Daniela, Aldana y Sofía, a mis amigos y a mi novio Álvaro por ser un apoyo incondicional durante todo este proceso. Me gustaría externar un sincero agradecimiento al ingeniero Luis Alejandro Carvajal por su vocación formativa, calidad humana y amplio conocimiento, esenciales para la ejecución exitosa del proyecto.

Finalmente, un agradecimiento a las instituciones CONAVI, MOPT y el IMN por brindarme información necesaria para desarrollar este proyecto.

## Resumen

Esta investigación determina el efecto de los cambios de temperatura ambiental que se producen en un puente tipo cerchas metálicas sobre las frecuencias dinámicas de este. Por medio de la utilización de un sensor GP2X tipo acelerómetro de alta sensibilidad se capta la respuesta dinámica del puente ante las excitaciones presentes durante las mediciones.

El monitoreo se realiza al puente ubicado sobre el río Abangares en la provincia de Guanacaste en la ruta nacional N°1. Su elección se fundamentó en dos criterios, el primero, por el tipo de superestructura que lo conforma como lo son 2 cerchas metálicas de distintos tamaños, y el segundo, por su ubicación, dado que según el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) se encuentra en una zona que presenta una temperatura promedio de  $27,56^{\circ}\text{C}$ , lo cual es ideal para tener un rango amplio de temperaturas.

Cabe destacar que esta investigación es pionera en el estudio de la dinámica estructural en puentes con esta tipología, que tiene como fin analizar si las variaciones en la temperatura ambiental trascienden en su comportamiento y así considerar esta incidencia en análisis de verificación de ocurrencia de daño estructural en futuros controles dinámicos.

La recolección de los datos de monitoreo se hace en un periodo de 13 horas, en lapsos de dos horas aproximadamente, colocando el instrumento de medición en dos puntos distintos de cada una de las cerchas que conforman el puente para cada serie de monitoreo. Se registran las aceleraciones de la estructura inducidas por la condición de servicio del puente, y la temperatura del ambiente.

Finalmente, se utiliza el software MATLAB y el programa ADDA para realizar la transformación de los datos de aceleraciones a frecuencias de vibrar y así identificar el comportamiento y la variación en los modos de flexión vertical.

En la cercha 1, se identificaron variaciones de las frecuencias de vibrar de los modos de esta estructura de hasta 4%, mientras que en la cercha 2, se observaron variaciones de hasta del 2% en sus frecuencias.

Palabras clave: Aceleraciones- Puente-Cercha-Frecuencias-Monitoreo-Estructura-Temperatura

## Abstract

This research determines the effect of environmental temperature changes that occur in a steel truss type bridge on its dynamic frequencies, through the use of a high sensitivity accelerometer type GP2X sensor.

The monitoring is done on the bridge located over the Abangares river in the province of Guanacaste on the national route No. 1. Two criteria were used in the selection; the first one is the type of superstructure that consists in two steel truss with different spans, and the second one, is its location, where according to the National Meteorological Institute (IMN) this place is located in an area with an average temperature of 27.56°C.

This research is a pioneer in the study of structural dynamics in bridges with this typology. The purpose of this study is to analyze the weather variations of the environmental temperature and its effect in the bridge dynamic behavior, in order to consider this behavior during the identification of the occurrence of structural damage in future dynamic controls.

The data collection was done in a period of 13 hours, in increments of two hours, by placing the measuring instrument in two different points of each truss for each monitoring lap. The accelerations of the structure induced by the service condition and the ambient temperature were recorded.

Finally, the MATLAB software and the ADDA program were used in order to analyze and transformate the acceleration data to vibration frequencies and the identification of variations in vertical bending modes.

In truss 1, variations of up to 4% in the vibration frequencies of the modes of this structure were identified, while in truss 2, variations of up to 2% in their frequencies were observed.

Keywords: Accelerations- Bridge-Truss-Frequencies-Monitoring-Structure-Temperature



## Índice

|   |    |
|---|----|
| 1. Introducción .....   | 13 |
| 1.1 Antecedentes .....  | 13 |
| 1.1.1 Monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones ambientales del puente sobre la Quebrada Salitral en Ruta Nacional No.27 (Lanamme-UCR, 2018)...   | 13 |
| 1.1.2 Monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones ambientales del puente sobre el río Virilla ruta nacional No.27 (Lanamme-UCR, 2018).....  | 14 |
| 1.1.3 Monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones ambientales de los puentes sobre el río Virilla ruta nacional No.3 (Lanamme-UCR, 2018) .....  | 15 |
| 1.1.4 Efectividad del uso de un sensor para la obtención de frecuencias de vibrar en los puentes río Virilla ruta N°27 y N°3, Quebrada Salitral Ruta N°27, Costa Rica (Rodríguez, 2021).....  | 15 |
| 1.1.5 Determinación experimental del efecto de la temperatura en las frecuencias de vibrar en un puente metálico (Céspedes, 2022) .....   | 16 |
| 1.1.6 Medición de la influencia de la temperatura en las frecuencias de vibración del puente Virilla en la Ruta Nacional No.3, Costa Rica (Marín, 2022) .....   | 17 |
| 1.1.7 Efecto del cambio de temperatura en el comportamiento dinámico del puente sobre el río Virilla en la ruta nacional 27 de Costa Rica (Sancho, 2022).....   | 18 |
| 1.1.8 Mediciones y análisis de vibraciones en el puente sobre el río Virilla (Navarro, 2015).....   | 19 |
| 1.1.9 Estudio de desarrollo de capacidad en la rehabilitación, planificación, mantenimiento y administración basado en los 29 puentes de la Red Vial Nacional en Costa Rica (Agencia de Cooperación Internacional del Japón, 2007)..... | 20 |
| 1.1.11 Estudio del periodo de vibración de puentes con vigas de acero en Panamá.....  | 21 |
| 1.2 Planteamiento del problema.....   | 21 |
| 1.3 Hipótesis .....   | 22 |
| 1.4 Objetivos.....  | 23 |

|   |    |
|---|----|
| 1.4.1 Objetivo General .....  | 23 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos .....   | 23 |
| 1.5 Justificación .....   | 23 |
| 1.6 Alcances y limitaciones .....   | 25 |
| 1.6.1 Alcances: .....   | 25 |
| 1.6.2 Limitaciones: .....   | 25 |
| 1.7 Impacto .....   | 25 |
| 2.Fundamentación teórica.....   | 26 |
| 2.1 Puentes .....   | 26 |
| 2.1.1 Componentes principales de un puente:.....                                | 27 |
| 2.1.2 Puentes de estructura de acero .....                                      | 27 |
| 2.1.3 Mantenimiento de los puentes metálicos .....                              | 29 |
| 2.2 Puentes de Costa Rica.....  | 29 |
| 2.3 Inspecciones y evaluaciones periódicas en puentes.....                      | 30 |
| 2.4 Puente sobre el río Abangares.....  | 31 |
| 2.5 Monitoreo de puentes metálicos .....  | 35 |
| 2.6 Efectos dinámicos por cambios de temperaturas en estructuras metálicas..... | 36 |
| 2.6.1 Variaciones de la temperatura ambiental de Costa Rica .....               | 37 |
| 2.7 Sensores tipo acelerómetros.....  | 39 |
| 2.7.1 Sensor acelerómetro GP2X-USB.....   | 39 |
| 2.8 Modos de vibrar de las estructuras.....                                     | 40 |
| 2.9 Espectro de respuesta.....  | 41 |
| 2.10 Procesamiento de los datos .....   | 41 |
| 2.10.1 Filtros de paso bajo .....   | 41 |
| 2.10.2 Ventanas de Hanning .....  | 41 |

|  |    |
|--|----|
| 2.10.3 Análisis de Fourier .....   | 41 |
| <b>3. Marco Metodológico</b> .....   | 44 |
| 3.1 Paradigma .....  | 44 |
| 3.2 Enfoque metodológico .....   | 44 |
| 3.3 Métodos de investigación .....   | 45 |
| 3.4 Categorías de análisis de investigación .....                          | 45 |
| 3.5 Técnicas de muestreo .....   | 46 |
| 3.6 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos .....             | 47 |
| 3.7 Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de datos..... | 48 |
| <b>4.Análisis de resultados</b> .....                                      | 50 |
| 4.1 Monitoreo.....   | 50 |
| 4.2 Expansión térmica en el puente .....                                   | 55 |
| 4.2.1 Primer punto.....  | 56 |
| 4.2.2 Segundo punto.....   | 57 |
| 4.2.3 Tercer punto .....   | 59 |
| 4.2.4 Cuarto punto.....  | 61 |
| 4.2.5 Quinto punto.....  | 62 |
| 4.3 Espectros de Fourier .....   | 63 |
| Frecuencias de modos de vibrar y temperatura ambiental.....                | 65 |
| 4.4.1 Cercha 1.....  | 65 |
| 4.4.2 Cercha 2.....  | 75 |
| <b>5.Conclusiones</b> .....  | 85 |
| <b>6.Recomendaciones</b> .....   | 87 |
| <b>Referencias Bibliográficas</b> .....                                    | 88 |
| <b>6.Glosario</b> .....  | 93 |

|               |    |
|---------------|----|
| 6.Anexos..... | 95 |
|---------------|----|

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Ubicación geográfica del puente sobre el río Abangares, Guanacaste .....         | 32 |
| Figura 2. Vista en elevación del puente.....   | 32 |
| Figura 3. Vista en planta del puente .....   | 33 |
| Figura 4. Variaciones de la temperatura en un periodo de 10 años.....                      | 38 |
| Figura 5. Acelerómetro.....  | 40 |
| Figura 6. Puntos donde se realizaron las mediciones .....                                  | 47 |
| Figura 7. Colocación del sensor en la superestructura .....                                | 48 |
| Figura 8. Diagrama de flujo para el desarrollo de la investigación.....                    | 49 |
| Figura 9. Variación de temperatura en CH1 A.....   | 51 |
| Figura 10. Variación de temperatura en CH1 B .....   | 51 |
| Figura 11. Variación de temperatura en CH1 punto A y B.....                                | 52 |
| Figura 12. Variación de temperatura CH2 A.....   | 53 |
| Figura 13. Variación de temperatura CH2 B.....   | 53 |
| Figura 14. Variación de temperatura CH2 punto A y B.....                                   | 54 |
| Figura 15. Distancia medida entre bastión y patín superior de viga diafragma .....         | 56 |
| Figura 16. Variación de distancia entre patín superior y bastión .....                     | 57 |
| Figura 17. Distancia medida entre el patín inferior de viga diafragma y bastión.....       | 58 |
| Figura 18. Variación de distancia entre patín inferior y bastión .....                     | 59 |
| Figura 19. Distancia medida entre el apoyo fijo articulado y la placa .....                | 60 |
| Figura 20. Variación de distancia entre el apoyo fijo articulado y la placa .....          | 61 |
| Figura 21. Variación de separación entre cuerdas superiores de cerchas.....                | 62 |
| Figura 22. Variación de separación entre cuerdas inferiores de cerchas.....                | 63 |
| Figura 23. Registro de frecuencias en CH1 A, 09:53, el eje Y muestra las frecuencias ..... | 64 |
| Figura 24. Registro de frecuencias en CH2 A, 02:10, el eje Y muestra las frecuencias ..... | 65 |
| Figura 25. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH1 A, modo A.....           | 68 |
| Figura 26. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH1 A, modo D.....           | 69 |
| Figura 27. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH1 B, modo C.....           | 70 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 28. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH1 B, modo E .....              | 71 |
| Figura 29. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH1 B, modo F .....              | 71 |
| Figura 30. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH1 A, modo B.....               | 73 |
| Figura 31. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH1 B, modo B.....               | 73 |
| Figura 32. Relación entre frecuencias y temperaturas ambientales de CH1 A y B, modo B74        |    |
| Figura 33. Porcentaje de variación en los modos de vibrar CH1 A .....                          | 74 |
| Figura 34. Porcentaje de variación en los modos de vibrar CH1 B .....                          | 75 |
| Figura 35. Relación entre frecuencias y temperatura ambiental, CH2 A, modo C .....             | 78 |
| Figura 36. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH2 B, modo C.....               | 78 |
| Figura 37. Relación entre frecuencias y temperaturas ambientales de CH2 A y B, modo C79        |    |
| Figura 38. Relación entre frecuencias y temperatura ambiental, CH2 A, modo D.....              | 80 |
| Figura 39. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH2 B, modo D.....               | 80 |
| Figura 40. Relación entre frecuencias y temperaturas ambientales de CH2 A y B, modo D<br>..... | 81 |
| Figura 41. Relación entre frecuencias y temperatura ambiental, CH2 B, modo A .....             | 81 |
| Figura 42. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH2 B, modo B .....              | 82 |
| Figura 43. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH2 B, modo E .....              | 83 |
| Figura 44. Porcentaje de variación en los modos de vibrar CH2 A .....                          | 83 |
| Figura 45. Porcentaje de variación en los modos de vibrar CH2 B .....                          | 84 |

## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Tránsito promedio diario de la Estación 504, Ruta Nacional 1.....  | 31 |
| Tabla 2. Longitud de cada cercha.....                                       | 31 |
| Tabla 3. Resumen de las características básicas del puente .....            | 34 |
| Tabla 4. Variables dependientes e independientes de la investigación .....  | 46 |
| Tabla 5. Puntos de medición .....   | 46 |
| Tabla 6. Resumen de monitoreos 1, 2 y 3 .....                               | 54 |
| Tabla 7. Resumen de monitoreos 4 y 5 .....                                  | 55 |
| Tabla 8. Resumen de monitoreos 6 y 7 .....                                  | 55 |
| Tabla 9. Frecuencias y temperaturas registradas en la CH1 puntos A y B..... | 65 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 10. Desviación estándar de frecuencias en CH1 puntos A y B .....  | 66 |
| Tabla 11. Covariancia de frecuencias en CH1 puntos A y B .....          | 66 |
| Tabla 12. Frecuencias promedio en CH2, puntos A y B .....               | 75 |
| Tabla 13. Desviación estándar de frecuencias en CH2, puntos A y B ..... | 76 |
| Tabla 14. Covariancia de frecuencias en CH2, puntos A y B .....         | 76 |

## **Anexos**

|   |     |
|---|-----|
| Anexo 1. Temperatura mínima diaria (°C).....  | 95  |
| Anexo 2. Temperatura media diaria (°C) .....  | 96  |
| Anexo 3. Temperatura máxima diaria (°C) ..... | 98  |
| Anexo 4.CH1A-01-43-R90-120 .....              | 100 |
| Anexo 5.CH1A-01-43-R60-90 .....               | 100 |
| Anexo 6.CH1A-01-43-R45-60 .....               | 100 |
| Anexo 7.CH1A-01-43-R30-45 .....               | 101 |
| Anexo 8CH1A-03-27-R90-120 .....               | 102 |
| Anexo 9.CH1A-03-27-R60-90 .....               | 102 |
| Anexo 10.CH1A-03-27-R45-60 .....              | 103 |
| Anexo 11CH1A-03-27-R30-45 .....               | 103 |
| Anexo 12CH1A-05-27-R90-120 .....              | 104 |
| Anexo 13.CH1A-05-27-R60-90 .....              | 104 |
| Anexo 14.CH1A-05-27-R45-60 .....              | 105 |
| Anexo 15.CH1A-05-27-R30-45 .....              | 105 |
| Anexo 16.CH1A-07-30-R90-120 .....             | 106 |
| Anexo 17.CH1A-07-30-R60-90 .....              | 106 |
| Anexo 18.CH1A-07-30-R45-60 .....              | 107 |
| Anexo 19.CH1A-07-30-R30-45 .....              | 107 |
| Anexo 20.CH1A-09-53-R90-120 .....             | 108 |
| Anexo 21.CH1A-09-53-R60-90 .....              | 108 |
| Anexo 22.CH1A-09-53-R45-60 .....              | 109 |
| Anexo 23.CH1A-09-53-R30-45 .....              | 109 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| Anexo 24.CH1A-11-53-R90-120..... | 110 |
| Anexo 25.CH1A-11-53-R60-90.....  | 110 |
| Anexo 26.CH1A-11-53-R45-60.....  | 111 |
| Anexo 27.CH1A-11-53-R30-45.....  | 111 |
| Anexo 28.CH1A-13-53-R90-120..... | 112 |
| Anexo 29.CH1A-13-53-R60-90.....  | 112 |
| Anexo 30.CH1A-13-53-R45-60.....  | 113 |
| Anexo 31.CH1A-13-53-R30-45.....  | 113 |
| Anexo 32.CH1B-01-54-R90-120..... | 114 |
| Anexo 33.CH1B-01-54-R60-90.....  | 114 |
| Anexo 34.CH1B-01-54-R45-60.....  | 115 |
| Anexo 35.CH1B-01-54-R30-45.....  | 115 |
| Anexo 36.CH1B-03-36-R90-120..... | 116 |
| Anexo 37.CH1B-03-36-R60-90.....  | 116 |
| Anexo 38.CH1B-03-36-R45-60.....  | 117 |
| Anexo 39.CH1B-03-36-R30-45.....  | 117 |
| Anexo 40.CH1B-05-39-R90-120..... | 118 |
| Anexo 41.CH1B-05-39-R60-90.....  | 118 |
| Anexo 42.CH1B-05-39-R45-60.....  | 119 |
| Anexo 43.CH1B-05-39-R30-45.....  | 119 |
| Anexo 44.CH1B-07-39-R90-120..... | 120 |
| Anexo 45.CH1B-07-39-R60-90.....  | 120 |
| Anexo 46.CH1B-07-39-R45-60.....  | 121 |
| Anexo 47.CH1B-07-39-R30-45.....  | 121 |
| Anexo 48.CH1B-10-03-R90-120..... | 122 |
| Anexo 49.CH1B-10-03-R60-90.....  | 122 |
| Anexo 50.CH1B-10-03-R45-60.....  | 123 |
| Anexo 51.CH1B-10-03-R30-45.....  | 123 |
| Anexo 52.CH1B-12-03-R90-120..... | 124 |
| Anexo 53.CH1B-12-03-R60-90.....  | 124 |
| Anexo 54.CH1B-12-03-R45-60.....  | 125 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| Anexo 55.CH1B-12-03-R30-45 .....  | 125 |
| Anexo 56.CH1B-14-03-R90-120 ..... | 126 |
| Anexo 57.CH1B-14-03-R60-90 .....  | 126 |
| Anexo 58.CH1B-14-03-R45-60 .....  | 127 |
| Anexo 59.CH1B-14-03-R30-45 .....  | 127 |
| Anexo 60.CH2A-02-10-R90-120 ..... | 128 |
| Anexo 61.CH2A-02-10-R60-90 .....  | 128 |
| Anexo 62.CH2A-02-10-R30-45 .....  | 129 |
| Anexo 63.CH2A-03-45-R90-120 ..... | 130 |
| Anexo 64.CH2A-03-45-R60-90 .....  | 130 |
| Anexo 65.CH2A-03-45-R45-60 .....  | 131 |
| Anexo 66.CH2A-03-45-R30-45 .....  | 131 |
| Anexo 67.CH2A-05-50-R90-120 ..... | 132 |
| Anexo 68.CH2A-05-50-R60-90 .....  | 132 |
| Anexo 69.CH2A-05-50-R45-60 .....  | 133 |
| Anexo 70.CH2A-05-50-R30-45 .....  | 133 |
| Anexo 71.CH2A-07-49-R90-120 ..... | 134 |
| Anexo 72.CH2A-07-49-R60-90 .....  | 134 |
| Anexo 73.CH2A-07-49-R45-60 .....  | 135 |
| Anexo 74.CH2A-07-49-R30-45 .....  | 135 |
| Anexo 75.CH2A-10-14-R90-120 ..... | 136 |
| Anexo 76.CH2A-10-14-R60-90 .....  | 136 |
| Anexo 77.CH2A-10-14-R45-60 .....  | 137 |
| Anexo 78.CH2A-10-14-R30-45 .....  | 137 |
| Anexo 79.CH2A-12-14-R90-120 ..... | 138 |
| Anexo 80.CH2A-12-14-R60-90 .....  | 138 |
| Anexo 81.CH2A-12-14-R45-60 .....  | 139 |
| Anexo 82.CH2A-12-14-R30-45 .....  | 139 |
| Anexo 83.CH2A-14-13-R90-120 ..... | 140 |
| Anexo 84.CH2A-14-13-R60-90 .....  | 140 |
| Anexo 85. CH2A-14-13-R45-60 ..... | 141 |



|  |     |
|--|-----|
| Anexo 86.CH2A-14-13-R30-45 .....                           | 141 |
| Anexo 87.CH2B-02-19-R90-120 .....                          | 142 |
| Anexo 88.CH2B-02-19-R60-90 .....                           | 142 |
| Anexo 89.CH2B-02-19-R45-60 .....                           | 143 |
| Anexo 90.CH2B-02-19-R30-45 .....                           | 143 |
| Anexo 91.CH2B-03-52-R90-120 .....                          | 144 |
| Anexo 92.CH2B-03-52-R60-90 .....                           | 144 |
| Anexo 93.CH2B-03-52-R45-60 .....                           | 145 |
| Anexo 94CH2B-03-52-R30-45 .....                            | 145 |
| Anexo 95.CH2B-05-59-R90-120 .....                          | 146 |
| Anexo 96.CH2B-05-59-R60-90 .....                           | 146 |
| Anexo 97.CH2B-05-59-R45-60 .....                           | 147 |
| Anexo 98.CH2B-05-59-R30-45 .....                           | 147 |
| Anexo 99.CH2B-07-58-R90-120 .....                          | 148 |
| Anexo 100.CH2B-07-58-R60-90 .....                          | 148 |
| Anexo 101.CH2B-07-58-R45-60 .....                          | 149 |
| Anexo 102.CH2B-07-58-R30-45 .....                          | 149 |
| Anexo 103.CH2B-10-25-R90-120 .....                         | 150 |
| Anexo 104.CH2B-10-25-R60-90 .....                          | 150 |
| Anexo 105.CH2B-10-25-R45-60 .....                          | 151 |
| Anexo 106.CH2B-10-25-R30-45 .....                          | 151 |
| Anexo 107.CH2B-12-24-R90-120 .....                         | 152 |
| Anexo 108.CH2B-12-24-R60-90 .....                          | 152 |
| Anexo 109.CH2B-12-24-R45-60 .....                          | 153 |
| Anexo 110.CH2B-12-24-R30-45 .....                          | 153 |
| Anexo 111.CH2B-14-22-R90-120 .....                         | 154 |
| Anexo 112.CH2B-14-22-R60-90 .....                          | 154 |
| Anexo 113.CH2B-14-22-R45-60 .....                          | 155 |
| Anexo 114.CH2B-14-22-R30-45 .....                          | 155 |
| Anexo 115. Registro de frecuencias en la CH1 A, 01:43..... | 156 |
| Anexo 116. Registro de frecuencias en la CH1 A, 03:27..... | 156 |

|  |     |
|--|-----|
| Anexo 117. Registro de frecuencias en la CH1 A, 05:27..... | 157 |
| Anexo 118. Registro de frecuencias en la CH1 A, 07:30..... | 157 |
| Anexo 119. Registro de frecuencias en CH1 A, 09:53.....    | 158 |
| Anexo 120. Registro de frecuencias en CH1 A, 11:53.....    | 158 |
| Anexo 121.Registro de frecuencias en CH1A,13:53.....       | 159 |
| Anexo 122. Registro de frecuencias en CH1 B, 01:54.....    | 159 |
| Anexo 123. Registro de frecuencias en CH1 B, 03:45.....    | 160 |
| Anexo 124. Registro de frecuencias en CH1 B, 05:39.....    | 160 |
| Anexo 125. Registro de frecuencias en CH1 B, 07:39.....    | 161 |
| Anexo 126. Registro de frecuencias en CH1 B, 10:03.....    | 161 |
| Anexo 127. Registro de frecuencias en CH1 B, 12:03.....    | 162 |
| Anexo 128. Registro de frecuencias en CH1 B, 14:03.....    | 162 |
| Anexo 129.Registro de frecuencias en CH2 A, 02:10.....     | 163 |
| Anexo 130.Registro de frecuencias en CH2 A, 03:45.....     | 163 |
| Anexo 131. Registro de frecuencias en CH2 A, 05:50.....    | 164 |
| Anexo 132. Registro de frecuencias en CH2 A, 07:49.....    | 164 |
| Anexo 133. Registro de frecuencias en CH2 A, 10:14.....    | 165 |
| Anexo 134. Registro de frecuencias en CH2 A, 12:14.....    | 165 |
| Anexo 135. Registro de frecuencias en CH2 A, 14:13.....    | 166 |
| Anexo 136. Registro de frecuencias en CH2 B, 02:19.....    | 166 |
| Anexo 137. Registro de frecuencias en CH2 B, 03:52.....    | 167 |
| Anexo 138. Registro de frecuencias en CH2 B, 05:59.....    | 167 |
| Anexo 139. Registro de frecuencias en CH2 B, 07:58.....    | 168 |
| Anexo 140. Registro de frecuencias en CH2 B, 10:25.....    | 168 |
| Anexo 141. Registro de frecuencias en CH2 B, 12:24.....    | 169 |
| Anexo 142. Registro de frecuencias en CH2 B, 14:22.....    | 169 |
| Anexo 143. Recolección de datos.....                       | 170 |
| Anexo 144. Recolección de datos.....                       | 170 |
| Anexo 145. Colocación del sensor.....                      | 171 |
| Anexo 146. Sensor GP2X.....                                | 171 |
| Anexo 147. Puente río Abangares.....                       | 172 |

## 1. Introducción

El Puente sobre el río Abangares fue construido en el año 1953 y está ubicado en la provincia de Guanacaste sobre la ruta nacional No.1. Este puente tiene una longitud total de 101,4 metros con un ancho de 9,32 metros. Su superestructura está conformada por dos cerchas metálicas, y consta de dos tramos, dos bastiones tipo marco y una pila tipo muro.

La investigación sigue dos de las recomendaciones propuestas por Marín (2022), la primera, sugiere realizar monitoreos sobre otras tipologías de puentes con el propósito de verificar el comportamiento dinámico en distintos tipos de puentes existentes en el país, la segunda, propone proteger el sensor del sol directo para tener temperaturas más exactas.

Además, se siguen las recomendaciones dadas por Céspedes (2022), donde propone hacer monitoreos en puentes metálicos en distintas zonas del país, y evaluar múltiples ventanas de Hanning.

En esta investigación se analizan las frecuencias dinámicas del puente a través del monitoreo por medio de la colocación de un sensor tipo acelerómetro en dos puntos distintos de cada cercha que conforma el puente durante un periodo de 13 horas. El dispositivo es capaz de reconocer 400 datos por segundo y registrar la temperatura del ambiente al mismo tiempo que las aceleraciones.

Una vez recolectados los datos, se realiza un análisis para determinar las variaciones de las frecuencias naturales de la estructura y su respuesta ante diferentes condiciones ambientales.

### 1.1 Antecedentes

1.1.1 Monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones ambientales del puente sobre la Quebrada Salitral en Ruta Nacional No.27 (Lanamme-UCR, 2018)

Este informe describe el programa de monitoreo de estructuras de puentes que lleva a cabo la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural del LanammeUCR, para detectar daños en puentes ubicados en la Red Vial Nacional. Se usa la aceleración para extraer

parámetros modales y así dar seguimiento al deterioro de la superestructura en el tiempo, además, sirve como complemento significativo en inspecciones visuales.

Se presenta inicialmente un resumen de las inspecciones visuales del puente sobre la Quebrada Salitral en las que se clasifica su estado como deficiente, debido al estado de la conservación del tablero y los apoyos.

El método que se utiliza para la identificación de parámetros modales requiere registros de aceleración en dirección vertical del puente y se obtienen mediante sensores de aceleración ubicados en las aceras del puente. Se colocan los sensores en los centros de los tramos 2 (central) y 3 (oeste) y el registro se hace en periodos de 5 minutos.

Como resultados, no se encontraron cambios abruptos en las formas modales en comparación a registros de 2016, y se identificaron 6 modos de oscilación sin anomalías significativas.

Sin embargo, se encontró un cambio de curvatura en uno de los nodos del costado aguas arriba del puente, cuya causa aún no se conoce, por lo que se recomendó darle seguimiento para documentar la evolución.

#### 1.1.2 Monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones ambientales del puente sobre el río Virilla ruta nacional No.27 (Lanamme-UCR, 2018)

Este informe estudia el comportamiento dinámico del puente río Virilla de la Ruta Nacional No.27 y también forma parte del programa de monitoreo en el sitio de puentes de la Red Vial Nacional, realizado por la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural del Lanamme-UCR.

Este informe resume los resultados que se obtienen mediante la implementación de 54 sensores de aceleración para identificar los parámetros modales en el puente, obtenidos a partir de registros de aceleración inducida por las cargas operativas en la dirección vertical a lo largo de los costados del puente, sin interrumpir el tránsito vehicular con el propósito de que los resultados se comparen con un próximo monitoreo para cuantificar el daño.

Se identifican cambios de curvatura en las formas modales y las posibles causas de los cambios podrían ser las reparaciones en la viga cajón principal del puente. También se detectó un agrietamiento superficial y un cambio de curvatura en uno de los nodos de

medición que afectó la amplitud modal de los nodos cercanos, lo que se considera un aspecto que debe ser monitoreado.

#### 1.1.3 Monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones ambientales de los puentes sobre el río Virilla ruta nacional No.3 (Lanamme-UCR, 2018)

Este informe le da seguimiento a los anteriores, forma parte de los monitoreos realizados por la Unidad de Puentes del Programa de Ingeniería Estructural del Lanamme-UCR.

Se obtienen registros de aceleración en los puentes sobre el río Virilla de la ruta nacional No.3, implementando sensores de aceleración colocados a lo largo de los costados de cada puente en puntos definidos previamente, sin necesidad de interrumpir el tránsito vehicular.

Los resultados indican que ambos puentes presentan un comportamiento dinámico normal y que las diferencias en las frecuencias y formas modales se deben a la construcción de cada estructura. Sin embargo, se recomienda realizar un seguimiento regular de las frecuencias modales y realizar una nueva prueba dinámica de los puentes en cinco años.

#### 1.1.4 Efectividad del uso de un sensor para la obtención de frecuencias de vibrar en los puentes río Virilla ruta N°27 y N°3, Quebrada Salitral Ruta N°27, Costa Rica (Rodríguez, 2021)

En esta investigación Rodríguez (2021) evalúa la eficiencia en la utilización de un único sensor para obtener frecuencias de un análisis dinámico realizado a tres diferentes puentes, obteniendo un promedio en los datos para realizar una comparación con datos anteriormente generados por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (Lanamme-UCR) a estas mismas estructuras, utilizando múltiples sensores de medición.

Se plantean tres tramos de medición para los tres puentes, en lapsos de registro de 5 minutos. El puente sobre el río Virilla en la Ruta Nacional No.27 cuenta con una longitud de 250 m y se registraron datos a 1/4, 1/3 y 1/2 de la longitud total el puente; en cuanto a la recopilación de datos del puente sobre la ruta No.3 con una longitud de 108 m, fue a 34 m,

54 m y 90 m del bastión dos. Por último, el puente de Quebrada Salitral con una longitud de 120 m se registraron datos a: 50 m, 60 m, 110 m medidos de uno de sus extremos.

El propósito del estudio fue obtener los datos en dominio de la frecuencia, mediante la transformación de estos por medio de la implementación del programa ADDA para posteriormente procesar las lecturas de aceleraciones en el dominio de la frecuencia y realizar la comparación con las investigaciones realizadas por el Lanamme-UCR.

Rodríguez (2021) concluyó que el uso de un sensor para el monitoreo dinámico es lo suficientemente eficiente ya que se obtuvieron porcentajes de diferencia máximos de 6% en el puente sobre el río Virilla sobre la ruta N°3, un máximo de 1% en el puente sobre río Virilla ubicado en la ruta N°27 y un 7% en el puente de Quebrada Salitral sobre la ruta N°27. Por lo que, se acepta la viabilidad del método, lo cual permite su implementación en futuros análisis dinámicos de otras estructuras de forma económica y eficaz.

Algunas de las recomendaciones de esta investigación proponen continuar realizando monitoreos a estos mismos puentes con diferentes escenarios como: monitorear por más horas del día a distintas temperaturas y con mejor discretización de los análisis en el dominio de la frecuencia.

#### 1.1.5 Determinación experimental del efecto de la temperatura en las frecuencias de vibrar en un puente metálico (Céspedes, 2022)

Céspedes (2022) determinó las variaciones del comportamiento dinámico del puente metálico vehicular tipo vigas continuas sobre la Quebrada Salitral ubicado sobre la Ruta Nacional N°27 a distintas temperaturas del ambiente, con el objetivo de conocer la incidencia de los cambios de la temperatura ambiental sobre la respuesta dinámica del puente.

El instrumento de medición fue colocado en el centro del puente el cual tiene una longitud de 160 m, es decir, a 80 m de ambos bastiones de la estructura, la toma de los datos experimentales se realizó desde las 3:30 a.m. hasta la 1:30 p.m. mediante el uso de un sensor tipo acelerómetro.

Las temperaturas de la toma los datos se mantuvieron entre 22°C a 36°C, lo que permitió tener una amplia variación.

Las tasas de variación de las frecuencias máximas fueron de hasta un 3% lo que significó que se deben considerar estos márgenes de variaciones térmicas ante verificaciones estructurales después de un evento extremo (sismo, huracán, impactos en la estructura, entre otros) para descartar la ocurrencia del daño (Céspedes, 2022).

Céspedes recomienda realizar monitoreos en los claros adyacentes al tramo lateral del puente para identificar la existencia de cambios en las las tasas de variación de la frecuencia medida desde otros tramos. Además, recomienda realizar pruebas a diferentes puentes metálicos, variar la cantidad de ventanas de Hanning y mayor número de puntos continuos en el cálculo del espectro de Fourier.

#### 1.1.6 Medición de la influencia de la temperatura en las frecuencias de vibración del puente Virilla en la Ruta Nacional No.3, Costa Rica (Marín, 2022)

En esta investigación se determinó la influencia de los cambios de temperatura ambiental sobre las frecuencias de vibrar en el puente sobre el Río Virilla ubicado en la Ruta Nacional N°3 como respuesta dinámica ante condiciones operacionales y temperaturas ambientales (Marín, 2022).

Este puente está conformado por un conjunto de vigas metálicas de alma llena prismáticas con un tablero de concreto reforzado, además, cuenta con una longitud de 124 m, dos carriles de 3,35 m, una acera peatonal y barreras de concreto y acero para el tráfico vehicular.

El desarrollo del estudio se hizo por medio de un monitoreo continuo a la estructura durante un periodo de 13 horas, de 2:00 am a 3:00 pm. Así mismo, la toma de los datos de aceleraciones se hizo mediante la utilización de un sensor tipo acelerómetro en periodos de una hora, tardando cerca de 10 minutos en cada punto instrumentado.

Los datos registrados fueron aceleraciones en el dominio del tiempo, por esta razón utilizando métodos matemáticos se transformaron en aceleraciones en el dominio de la frecuencia, permitiendo analizar las frecuencias modales del puente.

A raíz de las recomendaciones dadas por Rodríguez (2021) se seleccionaron dos puntos estratégicos de recolección de datos: mitad del tramo central y en el tramo lateral. Además, siguiendo la recomendación del estudio realizado por Céspedes (2022) se utilizan

131 072 puntos de discretización con el propósito de reducir el error que se genera por el propio cálculo del espectro de Fourier e incrementar la precisión en los resultados.

Marín (2022) concluye que las variaciones máximas de las frecuencias de vibrar del puente en el día del monitoreo van desde 0,44% hasta 6,57%. Además, demuestra la uniformidad en las tendencias de flexibilización de la estructura al aumentar la temperatura ambiental.

Marín (2022) recomienda monitorear la variación dinámica por cambios en la temperatura ambiental sobre diferentes tipologías de puentes para analizar su comportamiento, además, establecer criterios de estandarización para realizar pruebas dinámicas experimentales en puentes.

1.1.7 Efecto del cambio de temperatura en el comportamiento dinámico del puente sobre el río Virilla en la ruta nacional 27 de Costa Rica (Sancho, 2022)

Esta investigación, al igual que Rodríguez (2021), Céspedes (2022) y Marín (2022) forman parte de la línea de investigación de dinámica experimental en estructuras de la Universidad Latina de Costa Rica que inició en el año 2020 con el trabajo realizado por Rodríguez (2021).

Este estudio se basa en el registro de aceleraciones de un puente de concreto, construido con voladizos sucesivos contrapesados. El objetivo principal fue obtener las frecuencias de vibrar del puente sobre el Río Virilla ubicado en la ruta primaria No.27 a distintas temperaturas de ambiente (Sancho, 2022).

Este puente fue construido en el año 2001, y cuenta con una longitud de 160 m y un único tramo de superestructura por el que transitan diariamente un promedio de 64601 vehículos, según mediciones del año 2012.

El estudio permite determinar la influencia que tiene la temperatura de ambiente en el comportamiento dinámico de esta estructura, registrando datos desde la 1:30 am hasta las 2:30 pm del mismo día, en tres puntos de medición: 40 m, 60 m, 80 m medidos desde el bastión dos del puente.

Se utiliza un sensor tipo acelerómetro que cuenta con una capacidad de registrar 400 datos por segundo en cada eje. Los datos obtenidos son transformados del dominio del tiempo



al dominio de la frecuencia por medio de herramientas tecnológicas y matemáticas incorporadas en el programa ADDA.

La diferencia de temperaturas promedios fue de  $6,95\text{ }^{\circ}\text{C}$  con una temperatura promedio mínima de  $20,63\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una máxima de  $27,58\text{ }^{\circ}\text{C}$ , entrando en el rango de temperaturas registradas de la zona durante los últimos años.

Se obtuvieron variaciones de frecuencias en el modo A de  $-0,076\text{ Hz}/^{\circ}\text{C}$ , en el modo B de  $0,153\text{ Hz}/^{\circ}\text{C}$ , en el modo C de  $0,117\text{ Hz}/^{\circ}\text{C}$  y en el modo D de  $-0,215\%$  con porcentajes de variación de  $-0,380\%$ ,  $0,376\%$ ,  $0,117\%$ ,  $-0,302\%$ , respectivamente.

A pesar de que los resultados no mostraron uniformidad en tendencias de flexibilidad ni rigidez de la estructura. Según Sancho (2022), “por la tipología del puente se podría restringir la libertad de dilatación de este ante cambios de temperatura lo que podría estar ocasionado que, en lugar de dilatarse libremente la deformación térmica más bien esté provocando esfuerzos adicionales tipo compresivos en el puente”.

#### 1.1.8 Mediciones y análisis de vibraciones en el puente sobre el río Virilla (Navarro, 2015)

Esta investigación se realizó con el objetivo de la determinación de algunas características dinámicas en tres puntos del puente ubicado sobre el río Virilla en la Ruta Nacional N°1, por medio de pruebas de vibraciones en condiciones ambientales, es decir, sin interrumpir el tránsito vehicular en ambas direcciones (Navarro, 2015).

Según Navarro (2015), “las mediciones permitieron cuantificar las magnitudes vibratorias y la deformación en varias secciones del puente”, con dos objetivos principales, el primero fue verificar el desempeño del puente a nivel estructural y el segundo fue realizar una comparación de los resultados obtenidos con un modelo analítico del puente desarrollado en el software SAP 2000.

En cuanto a los resultados para el tramo de cercha, se identificaron las frecuencias de  $7,8\text{ Hz}$  en la dirección longitudinal "x",  $2,6\text{ Hz}$  en dirección transversal "y", y de  $1,96\text{ Hz}$  en la dirección vertical. En el caso del tramo de vigas, se determinaron las frecuencias de  $7,8\text{ Hz}$  en la dirección longitudinal,  $2,95\text{ Hz}$  en dirección transversal, y de  $2,65\text{ Hz}$ ,  $2,95\text{ Hz}$  y  $8,36\text{ Hz}$  en la dirección vertical.

1.1.9 Estudio de desarrollo de capacidad en la rehabilitación, planificación, mantenimiento y administración basado en los 29 puentes de la Red Vial Nacional en Costa Rica (Agencia de Cooperación Internacional del Japón, 2007)

Este estudio consistió en la inspección in sitio de 29 puentes existentes distribuidos en todo el país, de los cuales 17 fueron tipo viga de concreto y 12 tipo viga de acero, y dentro de este estudio se encontraba el puente sobre el Río Abangares de la Ruta Nacional N°1.

El método de evaluación del daño en estos puentes fue mediante inspecciones visuales, para poder identificar el deterioro de estas estructuras. Se observó daño en losas de 14 puentes, principalmente los que están ubicados sobre la ruta primaria N°1 causados por el volumen en el tráfico vehicular pesado y por la falta de mantenimiento en estos puentes; también se observaron daños en el arriostramiento de los puentes conformado por cerchas metálicas, inclusive en el Puente Río Abangares (Agencia de Cooperación Internacional del Japón, 2007).

La finalidad del estudio fue crear un plan de rehabilitación para estas estructuras. En primer lugar, se realizó un diagnóstico estructural, para luego con los resultados del diagnóstico realizar una evaluación estructural utilizando modelos computarizados para verificar los esfuerzos de los miembros, la capacidad de carga y la resistencia sísmica de los puentes, para determinar si era necesario reforzar la estructura y así cumplir con los códigos sísmicos nacionales e internacionales normalmente utilizados en Costa Rica, y garantizar su seguridad estructural.

La mayoría de los puentes necesitaron refuerzos o reparaciones en las vigas, pilas, columnas, muros, fundaciones y pilotes, así como en las juntas de expansión y en barandas. Además, se requirieron trabajos para proteger las pilas mediante muros de gaviones debido a que se observaron socavaciones en las zonas aledañas a las subestructuras durante las inspecciones.

Los diseños de reforzamiento propuestos plantearon el aumentar el grosor las losas de concreto e impermeabilizar la parte superior de las mismas. En cuanto a las vigas principales, se incrementó la sección y en muchos casos se agregaron cables externos para aumentar sus capacidades estructurales.

Además, se recomienda reforzar la subestructura, aumentando la sección de las vigas de las pilas y las columnas de la pared de las pilas. La mayoría de las fundaciones en los puentes también fueron reforzados, debido al aumento en la carga muerta de la superestructura, incrementando la profundidad y el ancho de la fundación. Para los pilotes, se sugiere aumentar la pila de acero de tipo H y la profundidad de la fundación. También se llevaron a cabo reparaciones en los accesorios deteriorados del puente.

#### 1.1.11 Estudio del periodo de vibración de puentes con vigas de acero en Panamá

En el artículo se presentan frecuencias de vibración de puentes de viga de acero junto con una ecuación que estima el periodo de vibración principal en función de la longitud de la estructura.

La investigación estuvo enfocada en obtener el primer modo de vibración donde para la detección de estas se realizó un análisis espectral aplicando la transformada de Fourier y de ahí se obtuvieron las frecuencias verticales en cada luz del puente.

Además, se utilizó un software llamado SPYDER con características similares a MATLAB que consistió en la aplicación de la transformada para obtener graficas de amplitud vs frecuencia y así realizar el respectivo análisis para lograr diferenciar el valor de frecuencia de la estructura y omitir frecuencias pertenecientes a alguno de los distintos tipos de vehículos que transitaron durante la prueba (García, 2019).

Se concluye que existe una alta correlación entre el período y la longitud de los 56 puentes estudiados. Además, se derivó una ecuación para estimar el período de los puentes de vigas de acero en función de su longitud, con un coeficiente de variación del 12%.

#### 1.2 Planteamiento del problema

En Costa Rica el estado de los puentes genera preocupación a especialistas, ya que en su mayoría las condiciones de estos se clasifican como deficientes e incluso críticas, y no se han tomado las medidas necesarias de mitigación para abordar la situación. Los problemas se han generado principalmente por la falta de mantenimiento de los puentes en rutas cantonales y nacionales (Umaña, 2018).

La falta de un control periódico por medio de monitoreos y estudios después de ejecutada la obra es una de las principales causas de permitir el desarrollo del deterioro, debido a que no se detectan las causas de daño a tiempo.

El monitoreo de las variaciones en las frecuencias de vibrar de un puente permite a los especialistas inferir si la estructura ha sufrido algún daño o no, y tomar decisiones adecuadas para su reparación o mantenimiento. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los cambios en la temperatura ambiental pueden afectar la geometría de los elementos estructurales de un puente, causando que se expandan o se contraigan, lo que a su vez puede alterar su rigidez.

Es importante identificar las variaciones en las frecuencias de vibrar de un puente provocadas por cambios de la temperatura ambiental, para evitar interpretaciones erróneas de daño estructural cuando las variaciones identificadas en el monitoreo se encuentran dentro del rango provocado por el efecto térmico.

De esta forma, se puede garantizar una evaluación adecuada y precisa del estado de la estructura, y tomar medidas preventivas o correctivas oportunas. Al mismo tiempo, podría crearse una base de datos en la Red Vial Nacional que facilite la toma de decisiones, y se de seguimiento a la salud estructural y permite contar con información base para planificar mantenimientos, rehabilitaciones o análisis antes del colapso.

¿Cuál es la influencia de la temperatura ambiental en las propiedades dinámicas en puentes tipo cercha como es el caso del puente Río Abangares de la Ruta Nacional No.1 en Costa Rica?

### 1.3 Hipótesis

Las variaciones en la temperatura ambiental en Costa Rica pueden influir significativamente en cómo los puentes tipo cercha metálica se comportan dinámicamente, y llegar a ser un factor relevante a la hora de analizar el daño que se haya podido producir en la estructura como consecuencia de eventos extremos, independientemente de su naturaleza.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General

Determinar el efecto de los cambios de temperatura ambiental en las frecuencias de vibrar del puente tipo cerchas metálicas sobre el río Abangares en la Ruta Nacional No.1 mediante el uso de un sensor tipo acelerómetro para el análisis de la respuesta dinámica.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

1. Instalar un acelerómetro en dos elementos verticales de cada cercha que conforma la estructura, para monitorear el comportamiento dinámico gravitacional.
2. Recopilar datos de respuesta dinámica del puente a distintas temperaturas ambientales en condiciones operacionales, por medio del uso de un acelerómetro.
3. Transformar los datos recopilados del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia con el programa ADDA.
4. Analizar los márgenes de variaciones dinámicas del puente debido a los cambios de temperatura ambiental.

## 1.5 Justificación

El territorio nacional sufre un déficit considerado en el manteniendo y renovación de su infraestructura vial, predominantemente en estructuras de puentes donde con el pasar de los años han ocurrido accidentes y en algunas ocasiones han provocado la muerte de personas como fue del colapso del puente ubicado en Turrubares en el año 2009.

Muchos de los puentes no cuentan con información y documentación actualizada y se desconoce su condición estructural, por lo que existe la necesidad de atender estas estructuras ya que muchas de estas obras han sobrepasado su vida útil. Según Ortiz (2012a) “alrededor del 40% de las estructuras de puentes ya han alcanzado su vida útil, la cual se estima en 50 años”, dentro de ellos se encuentra el puente ubicado sobre el Río Abangares en la Ruta Nacional N°1, construido en el año 1953.

El enfoque tradicional para evaluar los puentes en Costa Rica es realizar a través de inspecciones visuales rutinarias, actividades cualitativas, por lo que se requiere complementar con información cuantitativa que permita evaluar el desempeño y grado de deterioro de las estructuras de una forma más consistente y objetiva (Montalto, 2017).

Con el pasar de los años se han desarrollados herramientas avanzadas de computación para la resolución de problemas, de ahí nacieron proyectos como eBridge del Tecnológico de Costa Rica (TEC), investigación que inició en el año 2012, que consiste en la predicción remota de fallas en puentes mediante la implementación de una red inalámbrica de sensores que detectan comportamientos dinámicos, permitiendo así determinar niveles de desempeño, capacidad y vida remanente de las estructuras (Ortiz, 2012b).

El monitoreo de la salud estructural basado en el comportamiento dinámico constituye una estrategia innovadora para la gestión en infraestructura vial, específicamente en puentes. Este método ha resultado eficiente y económico (Rodríguez, 2021), siendo también una excelente herramienta complementaria a métodos tradicionales puesto que, permite detectar y ubicar daños a edades tempranas para cuantificar el deterioro en la estructura (Garita, 2018).

El propósito de la presente investigación es registrar la respuesta dinámica del puente Río Abangares a distintas temperaturas de ambiente en condiciones operacionales. Posteriormente, con los datos de aceleración en el dominio del tiempo, identificar las frecuencias de sus modos de vibrar para interpretar los resultados con herramientas computacionales como con el programa ADDA desarrollado por el ingeniero Luis Alejandro Carvajal Soto.

El monitoreo se ejecuta con la utilización de un sensor tipo acelerómetro que detecta cambios en respuesta de aceleración, además, permite registrar la temperatura del ambiente y aceleraciones en tres componentes espaciales “x”, “y” y “z”. Cabe mencionar que para esta investigación solo se analiza la componente gravitacional, es decir, el eje “y”.

Para la recolección de datos se seleccionan dos puntos diferentes en cada una de las cerchas que conforman el puente. El monitoreo se realiza en un periodo de 13 horas con lapsos de dos horas entre cada medición.

Finalmente, con los resultados se obtienen las, temperaturas ambientales y las frecuencias de vibrar del puente, en donde se identifican las frecuencias de los principales modos de vibrar, para analizar el comportamiento dinámico de la estructura con respecto a la influencia de la temperatura ambiental.

## 1.6 Alcances y limitaciones

### 1.6.1 Alcances:

1. Colocar un acelerómetro en cuatro puntos del puente sobre el Río Abangares para realizar el monitoreo durante 13 horas.
2. Transformar los datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia con el programa ADDA.
3. Conocer y analizar el cambio de las propiedades dinámicas del puente por variaciones en la temperatura ambiental.

### 1.6.2 Limitaciones:

1. Solo se realiza una campaña de monitoreo dentro de un día.
2. La cantidad de puntos donde se toman mediciones es limitada, ya que sólo se coloca el acelerómetro en dos puntos distintos de cada cercha.
3. La cantidad de horas en las que se toman mediciones es limitada, ya que el registro de datos solo se realiza durante un periodo de 13 horas.
4. En Costa Rica, las variaciones de temperatura no son significativas, lo que implica que el puente no estará expuesto a cambios drásticos en su temperatura.
5. No se cuenta con un levantamiento o informe previo similar al estudio, que se pueda usar para hacer una comparación.

## 1.7 Impacto

En cuanto al impacto social que puede generar esta investigación no es sólo para los habitantes de la zona de Abangares y los pueblos aledaños sino para todo el país. El estudio permite darle seguimiento a la integridad estructural de este puente, siendo un modelo a seguir para desarrollarse sobre los demás puentes con tipologías similares dentro de la Red Vial Nacional de Costa Rica.

El propósito de la investigación es incentivar tanto a instituciones públicas como privadas a realizar este tipo de estudios, para crear un inventario nacional, y de esta manera no solo asegurar el óptimo funcionamiento en condiciones operacionales de la estructura sino también la seguridad de quienes transiten en él.

Mejor infraestructura vial conlleva al crecimiento económico en todo el territorio nacional. Como es sabido, un puente permite conectar dos comunidades, lo que genera beneficios a nivel comercial pues, reactiva la economía facilitando el acceso a los pueblos de modo que las actividades comerciales se realicen de manera más simple, trasladando productos que se elaboren en la zona a los mercados, viabilizando y garantizando mejor calidad de vida para los habitantes y el desarrollo de los pueblos.

Este tipo de estudios son económicamente beneficiosos puesto que, si no se cuenta con numerosa cantidad de sensores por su elevado costo, permite la utilización de un único sensor reduciendo costos y su efectividad, tal como se comprobó en la investigación realizada por Rodríguez (2021).

Así mismo, cabe mencionar que este tipo de investigación no produce ningún impacto sobre la estructura por analizar ni el medio ambiente, ya que las pruebas y herramientas tecnológicas que se utilizan no generan daños, lo que es importante para un país que busca ser carbono neutral.

Este estudio sustenta la línea de investigación de la Universidad Latina de Costa Rica dirigida por el ingeniero Luis Alejandro Carvajal Soto, la cual busca dar seguimiento a la salud estructural de los puentes en Costa Rica.

## 2. Fundamentación teórica

### 2.1 Puentes

Los puentes son vitales en todo país pues, se necesita de infraestructura para poder realizar actividades relacionadas con el crecimiento y servicio de la sociedad. La infraestructura vial se ha convertido en una parte muy importante porque permite conectar ciudades y crear vínculos en actividades sociales y económicas.

La importancia de los puentes radica en que permiten conectar lugares que quizás serían inaccesibles sin su existencia, usualmente se construyen para cruzar ríos, mares, lagos, valles y caminos.

El diseño estructural de este tipo de obras civiles tiene una amplia variación pues, depende de los requerimientos por cubrir, ya sea en el flujo del tráfico, geometría, ubicación,



clima, materiales, entre muchos otros factores, por lo que cada diseño es único y existen gran variedad de puentes.

Cuando se diseña un puente se pretende garantizar el soporte de manera efectiva, de modo que siempre en su análisis la resistencia sea mayor que de los distintos tipos de cargas y condiciones ambientales a las que estará sujeta durante toda su vida útil, tales como: carga muerta, por tráfico, lluvia, viento, sismos, fuerzas de empujes del suelo o del agua, de ahí que el proceso de diseño es complejo y consta de datos de entrada, normas, métodos y resultados (Gonzalez, 2020).

#### 2.1.1 Componentes principales de un puente:

Para entender el comportamiento dinámico de un puente, es importante conocer sus componentes principales. Cada uno cumple una función específica en la estructura y su correcto funcionamiento es vital para garantizar la seguridad y la estabilidad del puente.

**Superestructura:** Compuesta por todos los elementos estructurales que se encuentran sobre los apoyos del puente tales como vigas, cerchas, arcos, diafragmas, sistemas de arrostamiento, entre otros.

**Subestructura:** Comprende los elementos estructurales diseñados para soportar el peso de la superestructura y las cargas a las que estará sujeta, tales como los apoyos, bastiones y las pilas (MOPT, 2007).

**Accesorios:** Constituye la superficie de rodamiento, barandas, juntas de expansión, entre otros elementos que no estén incluidos en las dos categorías anteriores.

#### 2.1.2 Puentes de estructura de acero

Los puentes de acero son utilizados en todo el mundo, en diferentes formas estructurales y longitudes de luz por ser un material sumamente versátil. El acero posee una serie de características que lo hacen adecuado como: construcción de geometrías complejas, la superestructura es más ligera comparándola con otros materiales tales como el concreto reforzado o presforzado, y su alta resistencia en tracción y en compresión.

Ocasionalmente se construyen puentes con estructuras tipo cerchas metálicas cuando se tienen luces de mediana longitud, en donde el alcance y capacidad estructural de vigas queda limitada, y cuando se requiere soportar mayores cargas. Si bien es cierto, las luces de

las dos cerchas del puente Río Abangares son de 40 y 60 metros, las cuales son actualmente posibles de fabricar con superestructuras tipo viga, para la época de su construcción no lo era, especialmente en Costa Rica.

En la ingeniería se le conoce como “luz” a la distancia horizontal entre apoyos de una viga, en donde el momento flector es proporcional a la luz al cuadrado, y las cargas a las que está sometida una estructura. El efecto del momento flector prácticamente se anula en estructuras tipo cercha, al orientarse la convergencia de las fuerzas de sus elementos en sus uniones a un único punto; Sin embargo, si se producen pares de fuerzas proporcionales a la luz del puente en sus cuerdas superiores e inferiores y por su equilibrio estática logrado geoméricamente se transfieren a las diagonales de la estructura.

Por lo anterior, las cerchas tienen un excelente comportamiento ante cargas axiales que, por su estructuración mediante nodos de unión, eliminan prácticamente el momento flector y transfieren eficientemente de manera axial las fuerzas a sus elementos, razón por la que se implementan en puentes.

Además, las estructuras tipo cercha poseen una adecuada respuesta dinámica por su redundancia, y son estructuras con relaciones peso/resistencia óptimas, siendo esta, una característica clave cuando se trata de este tipo de estructuras (GERARDAU CORSA, 2020).

El acero es fabricado bajo normas y estándares controlados por algunas entidades en muchos países, por ejemplo: American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), American Institute of Steel Construction (AISC), Japanese Industrial Standards (JIS) , entre muchas más. En Costa Rica, generalmente se norma el diseño y construcción de puente bajo las normas del AASHTO principalmente, y del AISC..

En cuanto a los principales problemas que presenta la construcción de puentes de acero es la ocurrencia de falla por fatiga. La fatiga afecta la vida útil de los puentes de acero, ya que ocurre el deterioro de este material, o la acumulación de daños en una zona causados por cargas cíclicas donde consecuentemente se producirán grietas que con el pasar del tiempo causarán la fractura de los elementos (Lin, 2017).

### 2.1.3 Mantenimiento de los puentes metálicos

Es importante el control de estas estructuras ya que influyen en la continuidad del servicio de transporte, ya que gracias a ellos se recorre de forma permanente y segura un trayecto.

Por lo tanto, para asegurar la vida útil y evitar el deterioro de un puente se debe establecer planes de mantenimiento en función de factores físicos y ambientales. Algunos de estos factores asociados con la degradación del material pueden ser causados por reacciones químicas por exposición al aire, agua y suelo, produciendo reducciones en la capacidad del material lo que produce el aumento de esfuerzos y deformaciones en la estructura (González, 2020).

Las emisiones de ácido corrosivo e hidrocarburos en combinación con la humedad aceleran el proceso de degradación, por lo que la prevención contra la corrosión es la manera más económica y efectiva de preservar los elementos que componen una estructura de un puente metálico.

Generalmente en los puentes metálicos se utilizan pinturas epoxi para aislar el contacto directo del agua y prolongar la vida de los puentes, además, en Costa Rica existe la norma INTE Q125 que está relacionada con las pinturas y recubrimientos aplicados a sustratos metálicos

## 2.2 Puentes de Costa Rica

En Costa Rica la condición de los puentes ha sido un tema de escaso interés por muchos años, debido a la falta de programas y técnicas de mantenimiento capaces de identificar el deterioro sufrido por las estructuras (Zamora, 2010). Muchos de los puentes presentan graves problemas estructurales, dado a conoceren los estudios mencionados anteriormente que se realizaron por el Lanamme-UCR sobre el estado de puentes de la red vial nacional.

Esta problemática ha ocasionado la muerte de personas, como el caso del colapso del Puente Turrubares en el año 2009; así mismo, ha provocado múltiples colisiones, entre otras catástrofes, lo cual, evidencia la presencia de un déficit de atención en el área de infraestructura vial en el territorio nacional.

Desde el año 2007, el Costa Rica cuenta con un programa informático para la gestión de puentes llamado Sistema de Administración de Estructuras de Puentes (SAEP), desarrollado por JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón). A pesar de la existencia del SAEP, tanto el MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transportes) como el CONAVI (Consejo Nacional de Vialidad) han tenido limitaciones para el mejor aprovechamiento de este instrumento.

Costa Rica no cuenta con un plan concreto y detallado para la gestión de puentes en todo el país. Aunque se han realizado algunas gestiones y mantenimientos de puentes en diferentes regiones del país, no existe un plan integral que aborde de manera efectiva el estado de todos los puentes, su seguridad y su durabilidad (Castillo, 2014).

### 2.3 Inspecciones y evaluaciones periódicas en puentes

Uno de los aspectos más importantes en la conservación de toda obra civil lo conforma su inspección y vigilancia. Comúnmente, los puentes de carreteras son obras singulares en una red vial, por esta razón es que, si quedan fuera de servicio o con algún límite de capacidad, producen un grave problema para el transporte por carretera. Estas razones han movido a la mayoría de los países desarrollados a incrementar las medidas relacionadas con su conservación (Zigurat Global Institute of Technology, 2019).

La inspección es un conjunto de acciones técnicas, realizadas según un plan previo, con el objetivo de monitorear la integridad y segura operación de un bien, alertando de manera temprana deterioros observados.

La evaluación de deterioro de puentes mediante inspección visual es importante y se realiza periódicamente. Los datos recopilados se utilizan para estimar los costos de reparación, priorizar la reparación y clasificar el grado de deterioro. Es fundamental que los datos sean precisos y registrados correctamente para que sean fiables y útiles para la administración de puentes, además, el inspector debe llenar algunos formularios y comprender completamente la información que recopile para cumplir con su propósito (MOPT, 2007)

## 2.4 Puente sobre el río Abangares

Este puente está ubicado en el distrito de Las Juntas, cantón de Abangares de la provincia de Guanacaste sobre la Ruta Nacional N°1. Esta ruta nacional es categorizada como primaria y tiene un tránsito promedio diario de 11.433 vehículos medidos en el año 2015 como se muestra en la Tabla 1

Tabla 1. Tránsito promedio diario de la Estación 504, Ruta Nacional 1

| RUTA | SECCIÓN | ESTACIÓN | AÑO  | TPDA  | LIVIANO | CAR_LIV | BUS | CAM2 | CAM3 | CAM4 | CAM5/6 |
|------|---------|----------|------|-------|---------|---------|-----|------|------|------|--------|
| 1    | 504     | 50010    | 2015 | 11433 | 55,45   | 20,14   | 3,2 | 8,06 | 1,63 | 0,45 | 11,07  |

Fuente: Planificación Estratégica Multimodal de Infraestructura y Servicios de Transporte, por MOPT, 2022.

El puente fue construido en el año 1953, y tiene una longitud de 101,4 m entre las juntas de expansión de los extremos y un ancho total de 9,32 m, con dos tramos de cerchas. Posee dos carriles, uno en cada sentido, con vigas principales de acero y su superestructura es tipo cercha metálica, además, se encuentra apoyado sobre bastiones en sus extremos y una pila en el centro.

En la Tabla 2 se detalla la longitud de cada cercha que compone el puente.

Tabla 2. Longitud de cada cercha

| Cercha       | 1      | 2      |
|--------------|--------|--------|
| Longitud (m) | 61,039 | 39,496 |

Fuente: MOPT

Coordenadas del puente:

**Latitud: 10°15'9.06''N**

**Longitud: 85°0'48.23''O**

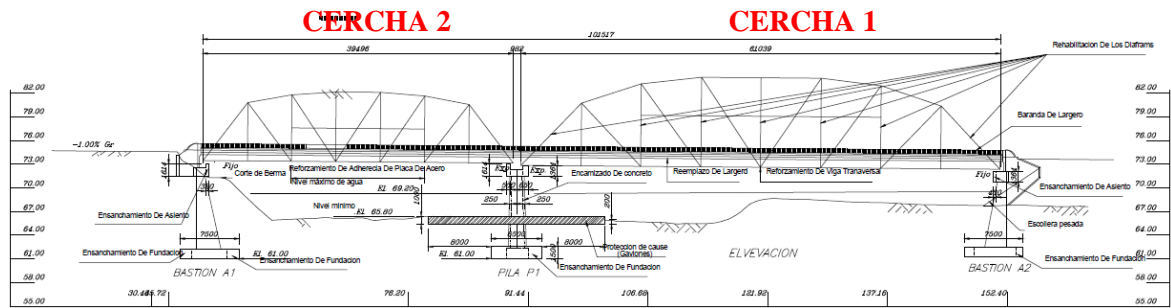
A continuación, se presenta una imagen aérea de la ubicación geográfica del puente y en Figura 2, y en la Figura 3 se presentan vistas en elevación y en planta del puente, respectivamente.

Figura 1. Ubicación geográfica del puente sobre el río Abangares, Guanacaste



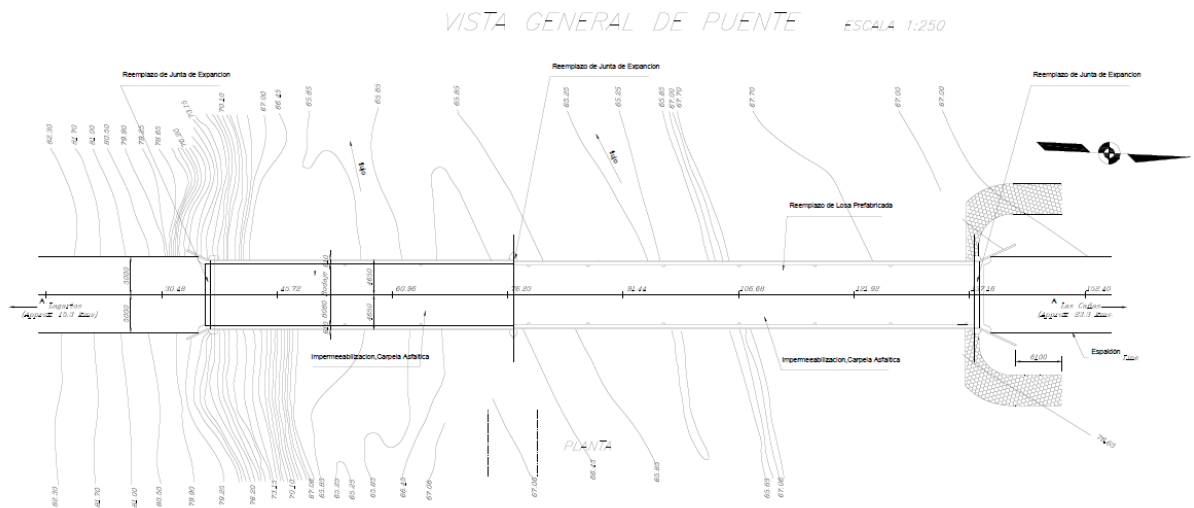
Fuente: Google Earth

Figura 2. Vista en elevación del puente



Fuente: MOPT, 2007

Figura 3. Vista en planta del puente



Fuente: MOPT, 2007

Cabe destacar que paralelo a este puente se ha proyectado un puente nuevo que formará parte de la ampliación de la Ruta Nacional 1. Una vez construido el nuevo puente nuevo, el puente actual operará únicamente en un sentido del flujo vehicular, y la estructura con en el sentido opuesto.

A continuación, se muestra la Tabla 3 que resume las características básicas del puente en estudio.

Tabla 3. Resumen de las características básicas del puente

|                                       |                                      |                                   |
|---------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Geometría                             | Tipo de estructura                   | Puente                            |
|                                       | Longitud total (m)                   | 101,40                            |
|                                       | Ancho total (m)                      | 9,32                              |
|                                       | Ancho de la calzada (m)              | 7,30                              |
|                                       | Número de tramos                     | 2                                 |
|                                       | Alineación del puente                | Recto                             |
|                                       | Número de carriles                   | 2                                 |
| Superficie de rodamiento y accesorios | Superficies de rodamiento            | Asfalto                           |
|                                       | Ancho de aceras (m)                  | 0,61                              |
|                                       | Tipo de baranda                      | Acero                             |
|                                       | Ubicación de las juntas de expansión | Sobre los bastiones y pila        |
|                                       | Tipo de juntas                       | Placa deslizante                  |
| Superestructura                       | Número de superestructuras           | 2                                 |
|                                       | Tipo de super estructura             | Cerchas de paso inferior          |
|                                       | Reforzada                            | Sí, según estudio de JICA (2007)  |
|                                       | Tipo de estructura principal         | Cerchas de acero                  |
| Apoyos                                | Tipo de apoyo sobre bastiones        | Fijo                              |
|                                       | Tipo de apoyo sobre pilas            | Expansivo                         |
| Subestructura                         | Número de elementos                  | 2 bastiones y 1 pila              |
|                                       | Tipo de bastiones                    | Marco                             |
|                                       | Tipo de pilas                        | Muro                              |
|                                       | Tipo de cimentación                  | Placa aislada                     |
| Diseño y construcción                 | Especificación de diseño original    | 1949 AASHO Standard Specification |
|                                       | Carga viva de diseño original        | H15-S12-44                        |
|                                       | Fecha de diseño                      | 1952                              |
|                                       | Fecha de construcción                | 1953                              |

Fuente: Tomada y modificada de la Unidad de Puentes del Lanamme (p.8), 2011.



El puente Río Abangares formó parte del estudio realizado en el año 2007 por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), que tenía como propósito mejorar la gestión de puentes en la región y garantizar la seguridad de los usuarios, mediante una evaluación y diseño de refuerzo estructural. Como producto de este estudio se obtuvieron los diseños del reforzamiento de este puente, y posteriormente el gobierno de Costa Rica contrata la ejecución del reforzamiento.

Para el caso de este puente en estudio, se propuso reemplazar: la losa, el arriostramiento transversal, la baranda, las juntas de expansión, asimismo, el incremento de la sección estructural de la cuerda inferior y la sección de las vigas. Y en el caso de la subestructura propone aumentar el grosor de las fundaciones y a la pila se le construye un encamisado de concreto (JICA, 2007).

Para el año 2010 la estructura formó parte de un proceso de evaluación de puentes de la red vial nacional realizado por la Unidad de Puentes del Lanamme de la Universidad de Costa Rica, MOPT. Posterior a la evaluación, se realiza un informe con el propósito de que la información recolectada sirva como material de referencia para conocer las características del puente antes de proceder con la rehabilitación de este.

El informe del Lanamme-UCR indica que después de la evaluación realizada en el puente, se llegó a la conclusión de que su estado de deterioro es crítico. Esto se debe a que muchos de los elementos que conforman la estructura presentan un mal estado y corrosión. Además, concuerda con la evaluación realizada por JICA en el 2007.

## 2.5 Monitoreo de puentes metálicos

El monitoreo en puentes metálicos consiste en medir pequeños cambios en determinados periodos de tiempo en condiciones operacionales y su desarrollo se ha ido incrementando en los últimos años en muchos países debido a los adelantos tecnológicos en instrumentación y procesamiento digital de señales.

Las técnicas de monitoreo facilitan identificar la presencia, ubicación y magnitudes de daños en estructuras, partiendo de cambios en características estáticas, dinámicas y mecánicas, pudiéndose así adoptar estas técnicas a distancia y en tiempo real reduciendo los costos de monitoreo.

Es común la utilización de sensores con alta sensibilidad, los cuales se adaptan a cada estructura y son capaces de captar múltiples datos en periodos de tiempos establecidos causados por vibraciones de múltiples fuentes (ej. Caicedo, 2001).

Instalar un sistema de monitoreo continuo es invertir en el futuro dado que garantiza predecir de manera más exacta la vida útil del puente. Generalmente las estimaciones de la vida útil de un puente son bastante conservadoras una vez finalizada la obra, por lo que muchas estructuras pueden considerarse fuera de servicio tempranamente. La implementación de este tipo de sistemas beneficia los países económica y ambientalmente permitiendo tomar medias correctas para el comportamiento y alargar ciclos de vida de las estructuras (Tecnovial, s.f).

El monitoreo dinámico periódico de puentes es una técnica ampliamente utilizada en países de primer mundo, para darle seguimiento a la salud estructural de los puentes. Esta técnica implica realizar mediciones de parámetros dinámicos, como la vibración y la respuesta estructural, de manera periódica, por ejemplo, cada tres, seis o doce meses, con el propósito de detectar posibles problemas en los puentes antes de que se conviertan en situaciones críticas. De esta manera, se pueden tomar medidas preventivas para prolongar la vida útil de los puentes y reducir los costos de mantenimiento a largo plazo.

## 2.6 Efectos dinámicos por cambios de temperaturas en estructuras metálicas

Las variaciones en las temperaturas ambientales sobre los puentes metálicos dan como resultado la expansión o contracción de la superestructura de un puente si no presenta ningún tipo de restricción, pero, si se encuentra restringido, total o parcialmente por sus columnas de soporte, pilas o estribos, se producirán esfuerzos inducidos térmicamente. Los cambios de temperatura entre los diferentes elementos que conforman estas estructuras darán como resultado distorsiones rotacionales y traslacionales de la superestructura (Lobo, 2022).

Los puentes están en constante oscilación, ocasionada por el tránsito vehicular y peatonal, así también por vientos, microsismos, entre otras fuentes de excitación dinámica, pero, también es necesario tomar en cuenta las propiedades estructurales dinámicas de los materiales, los cuales no siempre se conocen del todo el comportamiento que tienen ante distintas condiciones térmicas.

Las altas temperaturas producen deformaciones en las estructuras metálicas, lo que ocasiona cambios de volumen. Como en la longitud de los materiales, si el cambio de temperatura no es uniforme se pueden originar tensiones, las que van a depender de la rigidez de la estructura, es por lo que una estructura rígida tendrá tensiones térmicas significativas (Sonzogni, s.f).

En Costa Rica la Universidad Latina a través de una línea de investigación ha venido estudiando el comportamiento dinámico de los puentes ante las variaciones de la temperatura ambiental, por ejemplo, los estudios Rodríguez (2021), Céspedes (2022), Marín (2022) y Sancho (2022), y del presente estudio están sobre esta misma línea de investigación.

#### 2.6.1 Variaciones de la temperatura ambiental de Costa Rica

El clima en Costa Rica es muy variado. Su ubicación confiere características tropicales, dividiendo el país en varias zonas climáticas con dos estaciones: lluviosa (mayo a noviembre) y seca (diciembre a mayo). La diversidad en el clima se debe a la geografía del territorio nacional pues, posee zonas montañosas elevadas con climas frescos y zonas llanas con climas secos y altas temperaturas.

En las últimas décadas los ciclos de oscilación en las temperaturas y precipitaciones se han visto caracterizados por fuertes variaciones, lo que significa extremos climáticos y meteorológicos. Uno de los factores responsables de esta variabilidad ha sido el efecto invernadero generado por las emisiones de gases producto de actividades humanas (MINAE, 2022).

Para poder caracterizar un clima es necesario estudiarlo por un extenso periodo para la obtención de resultados de datos estadísticos que sirven para realizar proyecciones futuras y caracterizar sus tendencias (IMN, 2022).

Específicamente en la provincia de Guanacaste el aumento en la temperatura en los últimos años ha sido significativo, ocurren sequías de forma recurrente, pero cada diez años estas son más prolongadas. La última gran sequía que afectó esa provincia se prolongó del 2010 al 2015 como consecuencia de factores como El Niño, vientos alisios y la temperatura superficial del mar. Todo esto ha contribuido con el incremento de la aridez de esta región

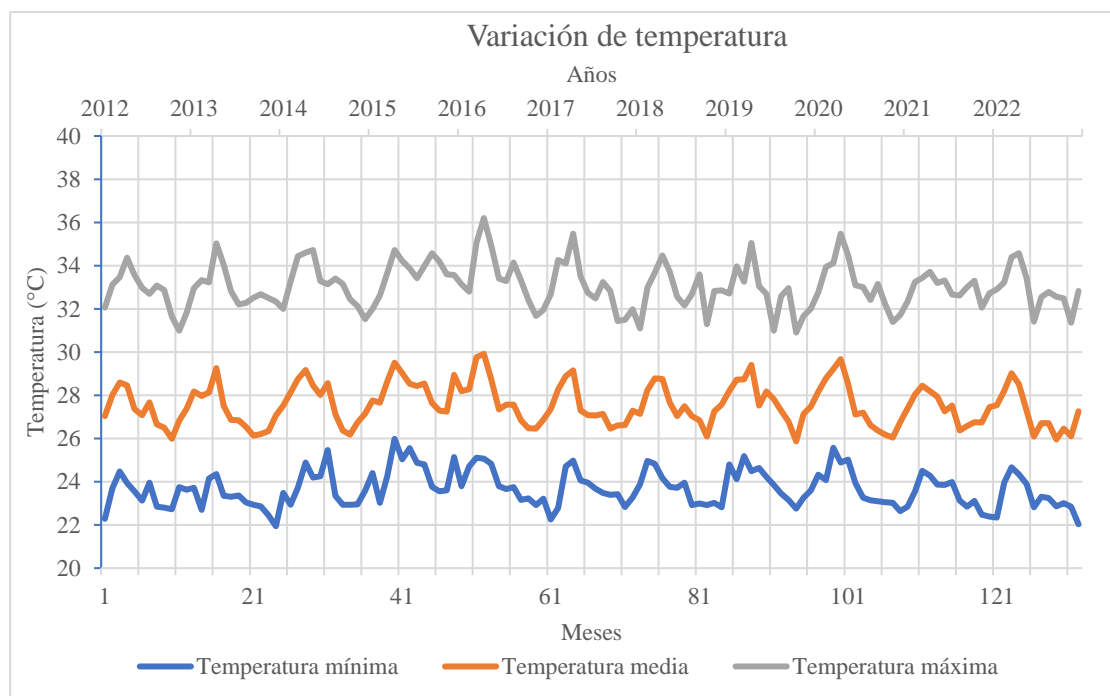
del país, con efectos en la agricultura y en la escasez de agua para solventar las necesidades básicas (Blanco, 2019).

El territorio nacional cuenta con diferentes estaciones meteorológicas que cambian de acuerdo con la ubicación geográfica. Para esta investigación se tomó la estación Hacienda Taboga en Cañas, Guanacaste con latitud norte:  $10^{\circ}20'45''$  y longitud oeste:  $85^{\circ}10'39''$ .

Para conocer las variaciones de la temperatura en la zona donde está ubicado el puente se solicitó al Instituto Meteorológico Nacional (IMN) los valores de las temperaturas diarias de un periodo de 10 años.

Tomando el promedio de temperaturas diarias registradas en dicha estación desde el año 2012 hasta el 2022, la temperatura mínima es de:  $23,68^{\circ}\text{C}$ , la temperatura máxima es de:  $33,06^{\circ}\text{C}$  y la temperatura media es de:  $27,56^{\circ}\text{C}$ .

Figura 4. Variaciones de la temperatura en un periodo de 10 años



Fuente: Elaboración propia con datos del IMN

En la Figura 4 se puede observar la variación de temperatura promedio diaria que tuvo cada mes en los últimos 10 años. Además, se puede deducir que en Costa Rica se presentan temperaturas similares en las distintas épocas del año. Esto permite que las

mediciones en el puente se puedan realizar en un día típico del año ya que las temperaturas que experimentará el puente se encontraran dentro de ese rango de variación.

## 2.7 Sensores tipo acelerómetros

Los sensores son dispositivos que detectan cambios en el entorno, y la información recibida es normalmente convertida a un impulso eléctrico que posteriormente es procesado por una serie de circuitos que generan una acción predeterminada en un aparato, sistema o máquina. Además, son capaces de transformar un fenómeno físico en un voltaje analógico medible convertido en una pantalla legible para lecturas o procesamientos de datos específicos. (SDI, 2022).

Los sensores tipo acelerómetros son instrumentos utilizados para medir vibraciones con una alta sensibilidad para detectar movimientos. Además, son ampliamente utilizados por la versatilidad en conexión, gran variedad de tipos y tamaños y no tiene necesidad de obstaculizar pasos (Smith, 2020).

### 2.7.1 Sensor acelerómetro GP2X-USB

Este dispositivo fabricado por la marca SENSR es el utilizado en el estudio para realizar el monitoreo del puente sobre el Río Abangares.

El dispositivo recolecta medidas de aceleración cuando se desee, además, es capaz de detectar movimientos en tres ejes, lo que permite al usuario registrar, monitorear y evaluar movimientos como: paso de vehículos, personas, microsismos, choques, caídas, y adicionalmente registra la temperatura ambiental presente durante la medición.

El instrumento mide aceleraciones en tiempo real con una tasa de muestreo de 400 datos por segundo y su conexión se hace mediante una terminal de tipo USB.

Especificaciones del dispositivo

Tamaño: 3,9 "x2,5 "x1,14"

Peso: 5,5 oz

Potencia: 25 mA máximo

Figura 5. Acelerómetro



Fuente: SENSAR, 2010

## 2.8 Modos de vibrar de las estructuras

En la actualidad, en muchos países se da importancia a los estudios modales de las estructuras en su etapa de diseño y funcionamiento ya que trae múltiples beneficios a corto y largo plazo. Usualmente estos análisis modales se hacen bajo condiciones controladas por lo que detienen su operación para minimizar la influencia de excitaciones externas no conocidas.

Sin embargo, es difícil detener el funcionamiento de los puentes, por lo que las medidas se deben hacer utilizando métodos basados en registros en condiciones operacionales y ambientales de datos de vibraciones dinámicas para no interferir en el funcionamiento normal de esta (Hormazábal, 2018).

Los modos de vibración y correspondientes frecuencias son parámetros de toda estructura y dependen de la su masa, rigidez, material, geometría entre otros. Las frecuencias es un parámetro que se pueden medirse en uno o más puntos de una estructura.

Realizar una correcta elección de puntos de medición garantiza que las mediciones proporcionen información útil para determinar los parámetros modales del sistema. Los parámetros modales de un puente existente se obtienen por medio de monitoreos de las vibraciones de este, expresados como respuesta de la estructura en el dominio de la frecuencia en un tiempo determinado.

Este tipo de estudios pueden ser utilizados en validación de modelos numéricos, la predicción de respuesta vibratoria, el control de vibraciones y la estimación de los efectos de modificaciones estructurales (Bedolla, 2013).

## 2.9 Espectro de respuesta

Los espectros de respuesta son diagramas que describen la respuesta dinámica de estructuras como consecuencia o reacción ante una excitación, puede expresarse en aceleraciones, velocidades o desplazamientos. Estos diagramas representan la respuesta de la estructura en el dominio del tiempo, y generalmente se discretizan en cantidades de puntos que son función de  $2^n$ . En el caso del presente estudio se utiliza una discretización de  $2^{17}$ , equivalente a 131.872 puntos de discretización.

## 2.10 Procesamiento de los datos

### 2.10.1 Filtros de paso bajo

Se aplica para eliminar las frecuencias no comunes en obras civiles, así permite observar con mayor claridad las que interesan en el análisis, en este caso las frecuencias que se eliminan son las superiores a 20 Hz.

### 2.10.2 Ventanas de Hanning

Se aplican para hacer un mejor cálculo de la transformada de Fourier y evitar saltos que podrían interferir en los resultados de construcción de los espectros de Fourier.

En esta investigación se hacen análisis con múltiples ventanas de tiempo y sus correspondientes ventanas de Hanning, considerando cuatro tamaños de rangos de tiempo para la definición del tamaño de estas ventanas de análisis, para posteriormente realizar un promedio entre ellas y obtener la desviación estándar que viene a representar el error significativo en el análisis.

### 2.10.3 Análisis de Fourier

Toda función periódica puede representarse mediante múltiples series de funciones senos y cosenos.

Por su parte, la transformada de Fourier es un procedimiento matemático fundamental para convertir señales entre el dominio del tiempo o espacio, al dominio de la frecuencia, y viceversa mediante la transformada inversa de Fourier (Nieto,2021).

La función original suele recibir el nombre de  $x(t)$ , siendo muy común que 't' sea el tiempo, mientras que la función transformada suele recibir el nombre de  $X(f)$ , siendo 'f' la frecuencia.

En la ingeniería civil, es común el uso de estas transformadas para calcular el comportamiento de grandes estructuras, como puentes, ante fuerzas de alta energía como el viento, vehículos y sismos (Martinez, 2021).

En esta investigación se implementa en el programa ADDA desarrollado por el Profesor Luis Alejandro Carvajal Soto, el cual está compuesto por rutinas matemáticas para el cálculo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Para la Transformada Rápida de Fourier:

En las siguientes ecuaciones a y b son coeficientes espectrales:

Ecuación 1. Transformada Rápida de Fourier

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\omega} (a_n \cos(n\omega_T t) + b_n \sin(n\omega_T t))$$

$$\omega_T = \frac{2\pi}{T}$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \cos(n\omega_T t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T F(t) \sin(n\omega_T t) dt$$

para  $n = 1, 2, 3 \dots$

Fuente: Rodriguez, 2005

Por otro lado, la transformada discreta de Fourier (DFT) es un método matemático que convierte una lista finita de muestras igualmente espaciadas de una función en una lista de coeficientes de una combinación finita de sinusoides complejas, ordenado por sus



frecuencias, que tienen los mismos valores de la muestra. La DFT convierte la función de la muestra a partir de su dominio original en el tiempo al dominio de la frecuencia (Mohamad, 2016).

Ecuación 2. Transformada discreta de Fourier

$$x_k = x(t_k) = \frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\frac{N}{2}} \left( a_i \cos\left(\frac{2it_k\pi}{T}\right) + b_i \text{sen}\left(\frac{2it_k\pi}{T}\right) \right)$$

Donde:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k$$

$$a_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \cos\left(\frac{2ik\pi}{N}\right)$$

$$b = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k \text{sen}\left(\frac{2ik\pi}{N}\right)$$

Fuente: Rodríguez, 2005

### **3. Marco Metodológico**

#### **3.1 Paradigma**

En los últimos años ha incrementado la necesidad de determinar el deterioro en estructuras civiles a temprana edad para garantizar la seguridad a los usuarios y de manera análoga reducir posibles costos de reparaciones.

La inspección basada en vibraciones es un método muy particular, puesto que determina un cambio en la respuesta de una estructura debido a un defecto local en cualquier parte de una estructura global por medio de un análisis del cambio de respuesta.

Costa Rica ha tenido un desarrollo lento en cuanto a técnicas de monitoreo, generalmente no se realiza este tipo de estudios por instituciones del gobierno y se ve reflejado en los niveles de deterioro y falta de información de la condición estructural de los puentes.

Una alternativa para conocer el estado de la salud estructural de los puentes son los monitoreos a través de la caracterización de propiedades dinámicas que se ha ido implementando con investigaciones desarrolladas por la Universidad Latina de Costa Rica, el Instituto Tecnológico de Costa Rica y Universidad de Costa Rica.

Incentivar la realización de este tipo de análisis en el país contribuye a que los puentes sean intervenidos a tiempo ante variaciones de sus comportamientos modales, que al ser un método relativamente económico y amigable con el ambiente, está al alcance de instituciones públicas y privadas encargadas del mantenimiento y salud estructural de puentes (Rodríguez, 2021).

A partir de los resultados del monitoreo del puente en cuestión, se pretende obtener información experimental de las propiedades dinámicas del puente Río Abangares, extrayendo directamente parámetros modales de la estructura con el propósito de que en futuros monitoreos del puente sean comparables los resultados, y de existir variaciones identificar posibles daños.

#### **3.2 Enfoque metodológico**

La orientación de esta investigación es buscar comprobar la hipótesis planteada, en donde se busca conocer los márgenes de variaciones del comportamiento dinámico del

puede como respuesta a los cambios de temperatura ambiental, el enfoque es cuantitativo, y por tanto, todos los análisis serán basados en medidas numéricas de las aceleraciones experimentadas por el puente.

El objetivo principal es la determinación del efecto de los cambios de temperatura ambiental en la respuesta dinámica de este puente, mediante el análisis de las aceleraciones en el dominio del tiempo obtenidas a través de un monitoreo continuo durante 12 horas.

Posteriormente, transformar los valores del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia con la Transformada de Fourier, así como, los márgenes en porcentajes de variación de la respuesta dinámica en la estructura.

### 3.3 Métodos de investigación

La recolección de los datos se hace durante 12 horas, con el uso de un único sensor tipo acelerómetro en cuatro distintos puntos del puente, a través del cual son registradas las aceleraciones y temperaturas cada dos horas aproximadamente, en periodos de monitoreo variables de 6:15 minutos a 12:30 minutos.

Posteriormente, los datos recolectados son transformados al dominio de la frecuencia utilizando el software MATLAB y el programa ADDA desarrollado por el ingeniero Luis Alejandro Carvajal Soto.

Finalmente, se procede a realizar el análisis de los resultados obtenidos, con el fin de identificar el efecto que provocan las temperaturas ambientales en las frecuencias de vibración del puente.

### 3.4 Categorías de análisis de investigación

Para esta investigación se pretende comparar las frecuencias de vibraciones obtenidas a distintas horas del día en el puente sobre el Río Abangares, y con ello analizar el rango de variaciones en las frecuencias de vibrar provocado por efectos de la temperatura ambiental.

Tabla 4. Variables dependientes e independientes de la investigación

| Objetivos específicos   | Variable independiente                 | Instrumento o método para utilizar | Variable dependiente                       |
|---|--|------------------------------------|--|
| Recopilar datos de respuesta dinámica del puente a distintas temperaturas ambientales en condiciones operacionales, por medio del uso de un acelerómetro. | Temperatura                            | Acelerómetro                       | Aceleraciones en el dominio del tiempo     |
| Analizar los márgenes de variaciones dinámicas del puente debido a los cambios de temperatura ambiental.  | Aceleraciones en el dominio del tiempo | Programa ADDA                      | Frecuencias en el dominio de la Frecuencia |

Elaboración propia

### 3.5 Técnicas de muestreo

El registro de las aceleraciones se realiza en cuatro puntos del puente, que, al estar compuesto por dos cerchas metálicas, se toman dos puntos en cada una de estas.

La primera cercha tiene una longitud de 61,039 m y la segunda una longitud de 39,496 m y las mediciones en ambas cerchas se toman en un punto cercano al centro y otro cercano al bastión, esto con el fin de encontrar frecuencias de distintos modos de vibrar de ambas cerchas. De esta forma, los puntos donde se coloca el sensor partiendo del inicio de la junta de expansión de cada bastión de apoyo de cada cercha son:

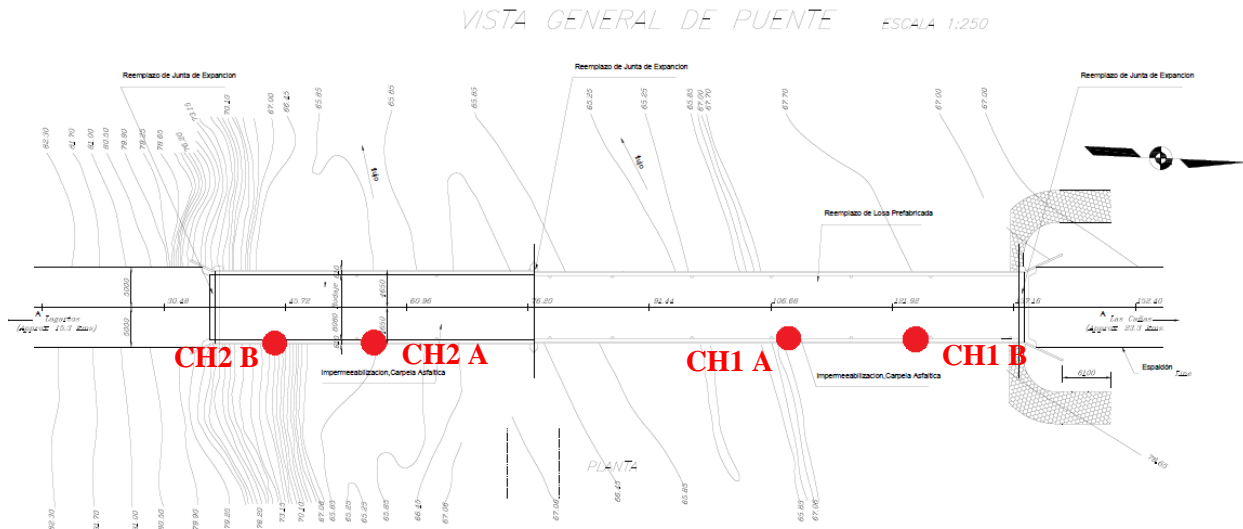
Tabla 5. Puntos de medición

| Cercha       | 1     |       | 2     |       |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
|              | A     | B     | A     | B     |
| Punto        |       |       |       |       |
| Longitud (m) | 30,73 | 23,13 | 22,85 | 11,55 |

Elaboración propia

Cabe recalcar que al igual que en otros estudios, la ubicación del sensor para las mediciones debe ser la misma entre medición para mayor precisión en los datos.

Figura 6. Puntos donde se realizaron las mediciones



### 3.6 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Como instrumento de medición se utiliza un único sensor tipo acelerómetro para el registro de datos del puente tipo cerchas metálicas (ej. Rodríguez, 2021).

El dispositivo permite capturar las excitaciones dinámicas en el puente junto con la temperatura ambiental, valores fundamentales para esta investigación. Además, la recolección es discretizada ya que el sensor es capaz de registrar 400 datos por segundo.

A partir del monitoreo se obtienen datos de aceleración tanto en el sentido gravitacional, como en los sentidos longitudinal y transversal del puente. Tal como se ha indicado, estos valores en el dominio del tiempo son posteriormente transformados al dominio de la frecuencia para el análisis del comportamiento dinámico que tiene el puente ante sus condiciones operacionales.

En cuanto a la colocación del sensor GP2 X USB (marca SENSR) se hace fijándolo al puente a través de un dispositivo tipo imán de alta adherencia a estructuras metálicas, se seleccionan dos elementos verticales que contiene cada cercha para realizar el monitoreo (presentados en la Tabla 5), y se trabajó en la pasarela peatonal fijada en la estructura del puente, de tal manera que no se obstruyera el tránsito vehicular como se observa en la Figura 7.

Figura 7. Colocación del sensor en la superestructura



Fuente: Propia

### 3.7 Técnicas e instrumentos para el procesamiento y análisis de datos

Se realiza una serie de monitoreos con el sensor anteriormente descrito, por medio del cual son recolectados datos en cuatro diferentes puntos del puente, y a su vez se registra la temperatura del ambiente durante el periodo de medición con el mismo sensor.

Son obtenidos datos de aceleraciones como respuesta dinámica del puente a distintos cambios de temperatura ambiental ocurridos durante el monitoreo.

Los valores recolectados están en dominio del tiempo por lo que es necesario utilizar el software MATLAB y el programa ADDA para realizar la utilización de la función matemática “Transformada de Fourier” para proceder a transformar los resultados al dominio de la frecuencia.

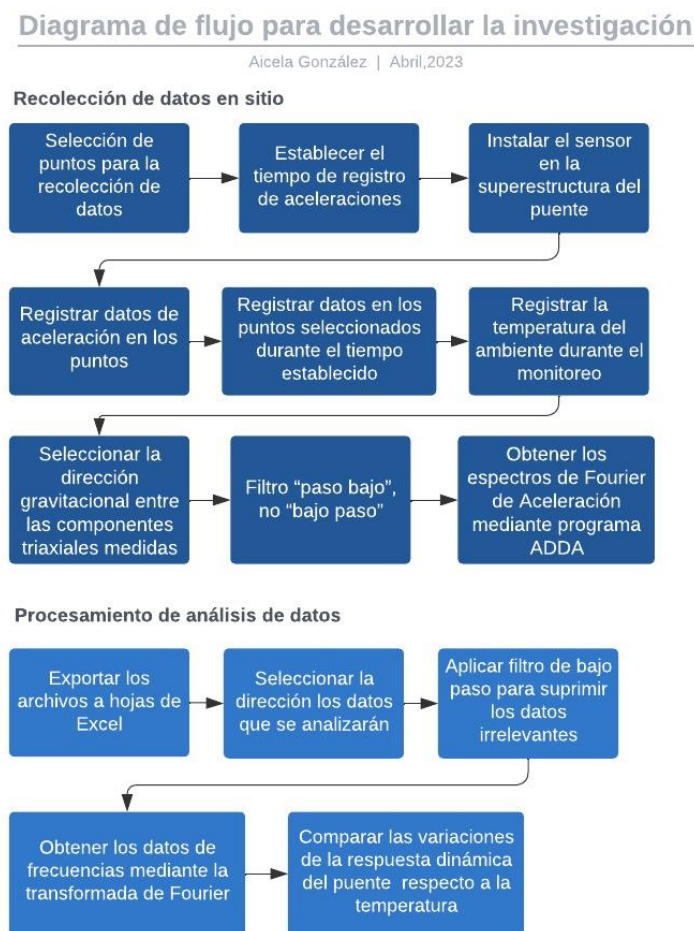
Dentro de las rutinas del programa ADDA, se aplica un filtro de paso bajo y múltiples ventanas de tiempo para mayor claridad de las frecuencias y mejorar los espectros de Fourier

de aceleración. Seguidamente, se promedian los espectros de cada ventana de análisis para realizar una comparación entre las distintas frecuencias identificadas en las distintas mediciones recolectadas a distintas temperaturas ambientales. Finalmente, se determina la existencia de variación en el comportamiento dinámico de la estructura a través de las variaciones de las frecuencias identificadas.

En este estudio se analiza únicamente la componente gravitacional del puente, en donde mayor cantidad de energía de vibración actúa.

En la Figura 8 se observa un diagrama de flujo que resume los pasos generales para el desarrollo de la investigación.

Figura 8. Diagrama de flujo para el desarrollo de la investigación



Fuente: Propia

## **4. Análisis de resultados**

### 4.1 Monitoreo

Para el análisis se trabaja sobre siete registros de monitoreo en cuatro diferentes puntos del puente, distribuidos de la siguiente manera:

CH1 A: 30,73 m de la junta de expansión más cercana

CH1 B: 23,13 m de la junta de expansión más cercana

CH2 A: 22,85 m de la junta de expansión más cercana

CH2 B: 11,55 m de la junta de expansión más cercana

Donde,

**CH1 A:** Cercha 1 punto A

**CH1 B:** Cercha 1 punto B

**CH2 A:** Cercha 2 punto A

**CH2 B:** Cercha 2 punto B

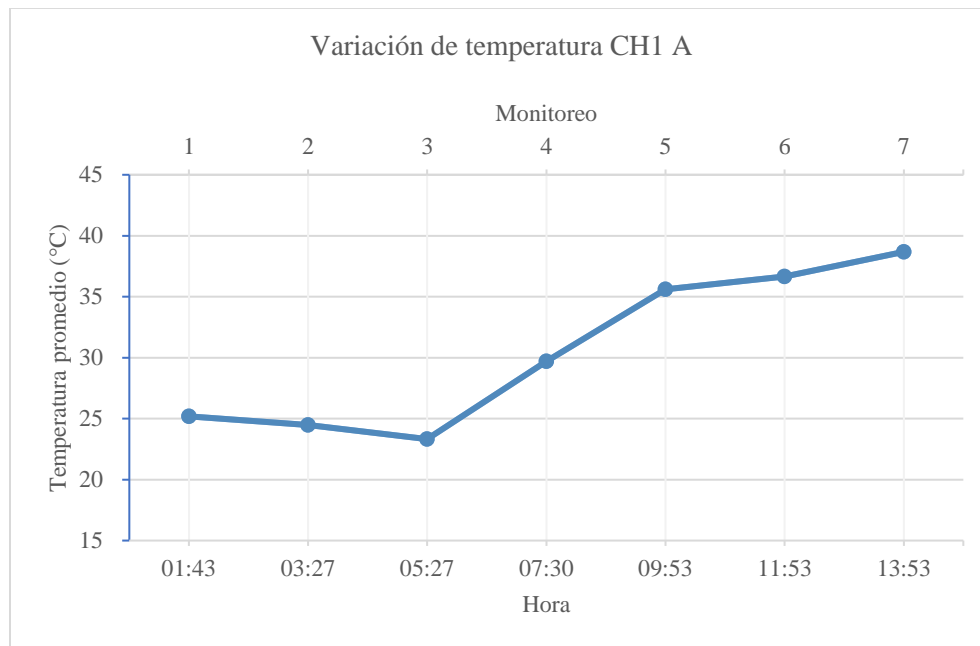
A pesar de que el dispositivo es capaz de reconocer las aceleraciones en las tres componentes espaciales (x, y, z), para esta investigación sólo se analiza la gravitacional, registrando datos en periodos cercanos a 500 segundos aproximadamente, es decir, que se obtienen cerca de 200.000 datos de aceleración por cada medición, considerando la capacidad del dispositivo de medir con una tasa de muestreo de 400 datos por segundo.

El primer registro se hace cerca de las 2:00 am con una temperatura promedio de 25,19 °C y el último a las 2:22 pm con una temperatura de 39,53 °C. La periodicidad de las mediciones es de 2 horas aproximadamente.

En la Figura 9 y Figura 10 se muestran las variaciones de la temperatura durante cada registro de la cercha 1 en los puntos A y B. Adicional, en la Figura 11 se construye un gráfico comparativo de ambos puntos.

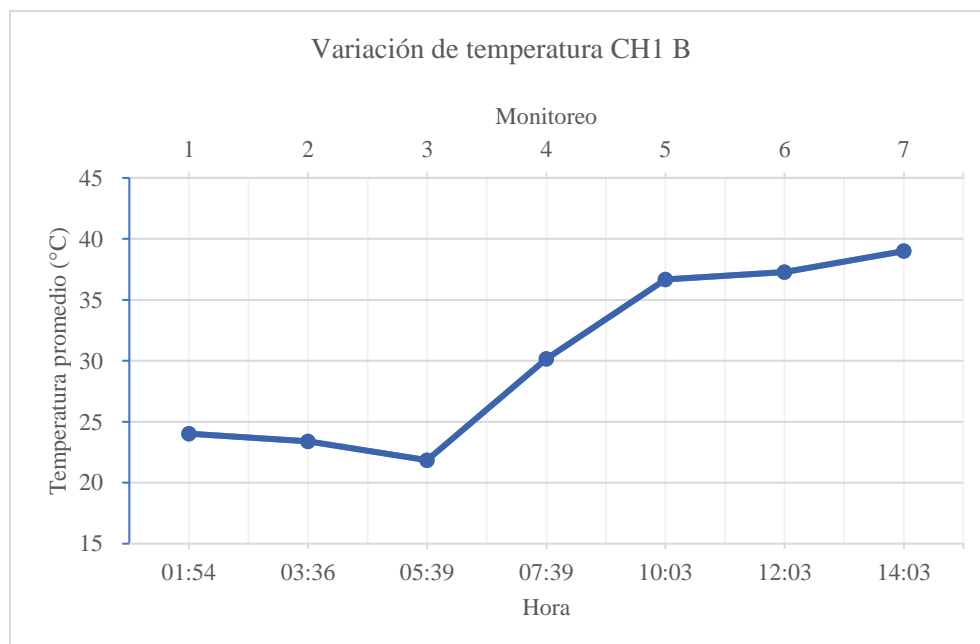


Figura 9. Variación de temperatura en CH1 A



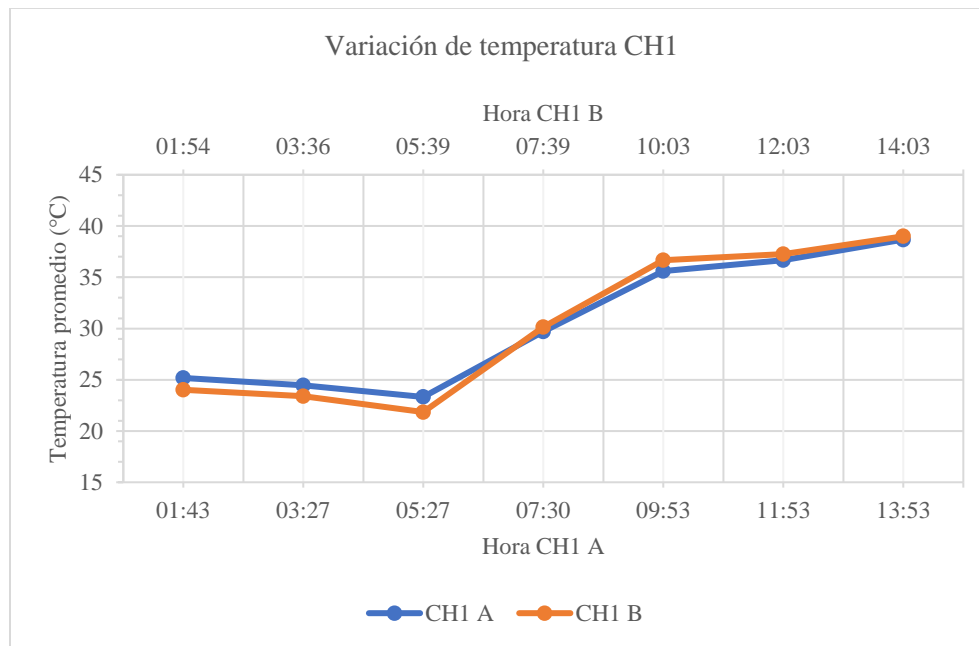
Fuente: Propia

Figura 10. Variación de temperatura en CH1 B



Fuente: Propia

Figura 11. Variación de temperatura en CH1 punto A y B

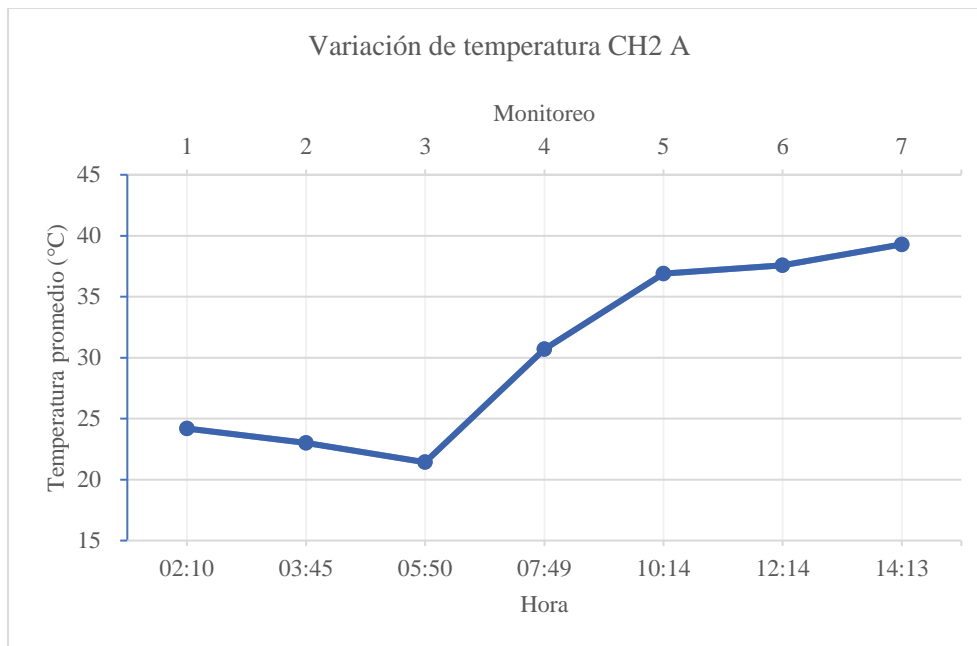


Fuente: Propia

Se puede inferir de la Figura 11 una similitud en el comportamiento de la temperatura en ambos puntos, puesto que la diferencia de hora en cada punto no difiere más de 12 min, y la temperatura en Costa Rica no tiende a cambiar drásticamente en un lapso tan corto.

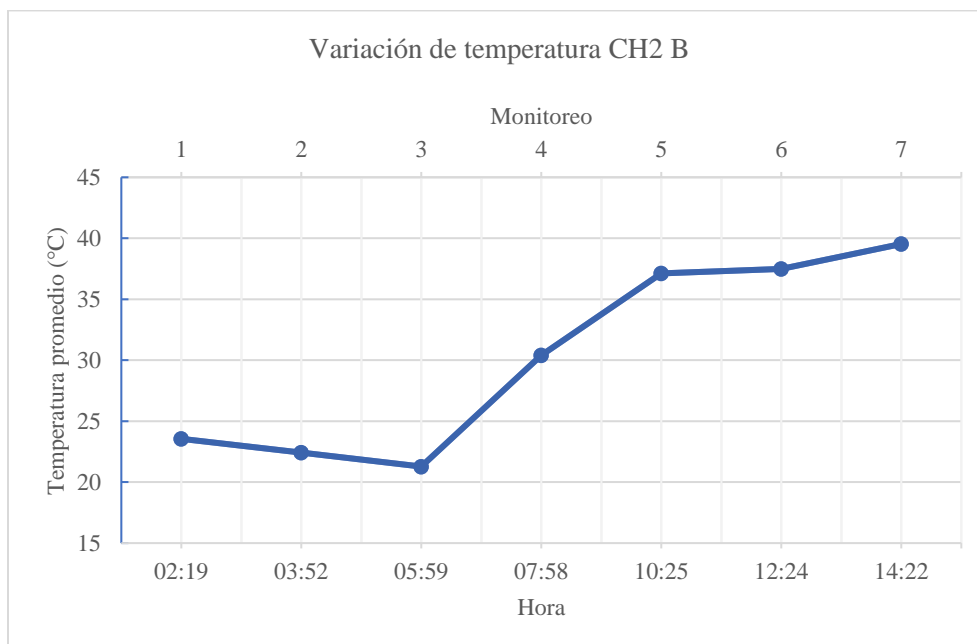
Al igual que en la CH1, a continuación, en la Figura 12 y en la Figura 13 se observa la variación de temperatura que hubo en la CH2 en los puntos A y B respectivamente, y posteriormente, en la Figura 14, se combinan ambos comportamientos para visualizar si difieren las temperaturas entre cada punto.

Figura 12. Variación de temperatura CH2 A



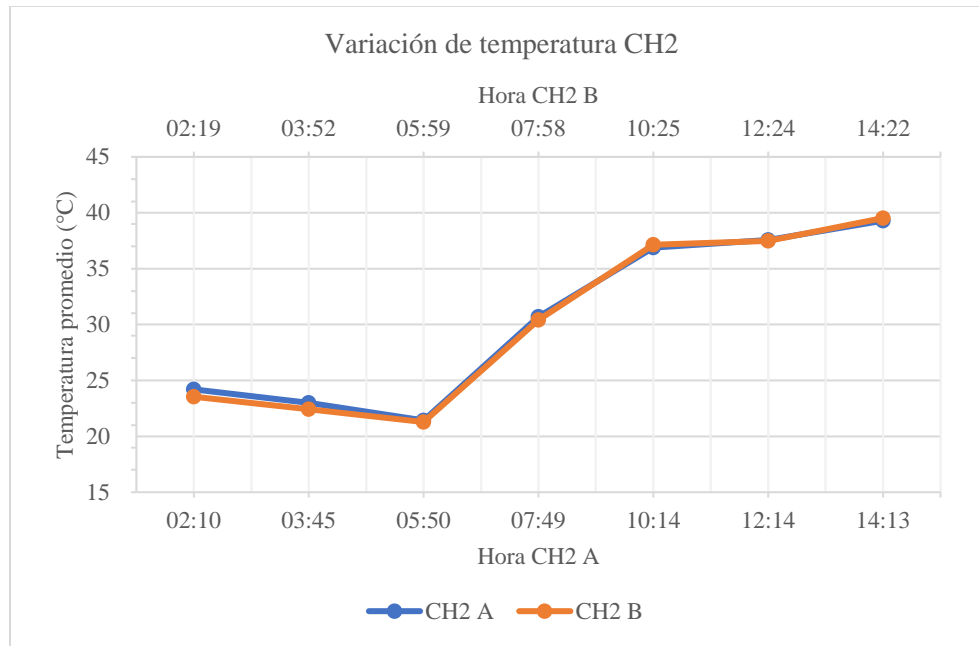
Fuente: Propia

Figura 13. Variación de temperatura CH2 B



Fuente: Propia

Figura 14. Variación de temperatura CH2 punto A y B



Fuente: Propia

Como se muestra en la Figura 14, el comportamiento en el punto A y B es muy similar, los valores no difieren más de 1°C entre cada punto de la hora medida.

A continuación, se presenta la tabla: Tabla 6, y la Tabla 8 que contienen la medición, hora de medición, duración y el código de cada monitoreo.

Tabla 6. Resumen de monitoreos 1, 2 y 3

|      | Monitoreo 1      |              |            | Monitoreo 2      |              |            | Monitoreo 3      |              |            |
|------|------------------|--------------|------------|------------------|--------------|------------|------------------|--------------|------------|
|      | Hora de medición | Duración (s) | Código     | Hora de medición | Duración (s) | Código     | Hora de medición | Duración (s) | Código     |
| CH1A | 01:43            | 450          | CH1A-01-43 | 03:27            | 451          | CH1A-03-27 | 05:27            | 639          | CH1A-05-27 |
| CH1B | 01:54            | 742          | CH1B-01-54 | 03:36            | 361          | CH1B-03-36 | 05:39            | 461          | CH1B-05-39 |
| CH2A | 02:10            | 476          | CH2A-02-10 | 03:45            | 351          | CH2A-03-45 | 05:50            | 475          | CH2A-05-50 |
| CH2B | 02:19            | 514          | CH2B-02-19 | 03:52            | 580          | CH2B-03-52 | 05:59            | 461          | CH2B-05-59 |

Fuente: Propia

Tabla 7. Resumen de monitoreos 4 y 5

| Medición | Monitoreo 4      |              |            | Monitoreo 5      |              |            |
|----------|------------------|--------------|------------|------------------|--------------|------------|
|          | Hora de medición | Duración (s) | Código     | Hora de medición | Duración (s) | Código     |
| CH1A     | 07:30            | 513          | CH1A-07-30 | 09:53            | 541          | CH1A-09-53 |
| CH1B     | 07:39            | 451          | CH1B-07-39 | 10:03            | 501          | CH1B-10-03 |
| CH2A     | 07:49            | 461          | CH2A-07-49 | 10:14            | 501          | CH2A-10-14 |
| CH2B     | 07:58            | 501          | CH2B-07-58 | 10:25            | 496          | CH2B-10-25 |

Fuente: Propia

Tabla 8. Resumen de monitoreos 6 y 7

| Medición | Monitoreo 6      |              |            | Monitoreo 7      |              |            |
|----------|------------------|--------------|------------|------------------|--------------|------------|
|          | Hora de medición | Duración (s) | Código     | Hora de medición | Duración (s) | Código     |
| CH1A     | 11:53            | 512          | CH1A-11-53 | 13:53            | 496          | CH1A-13-53 |
| CH1B     | 12:03            | 551          | CH1B-12-03 | 14:03            | 487          | CH1B-14-03 |
| CH2A     | 12:14            | 531          | CH2A-12-14 | 14:13            | 451          | CH2A-14-13 |
| CH2B     | 12:24            | 451          | CH2B-12-24 | 14:22            | 460          | CH2B-14-22 |

Fuente: Propia

#### 4.2 Expansión térmica en el puente

En estructuras como los puentes, las deformaciones por cambios de temperatura se producen de forma cíclica. Un ciclo anual, donde la estructura sufre un alargamiento en verano por la dilatación del tablero y un acortamiento en invierno por la contracción de este. El segundo ciclo es el diario (con menor amplitud que el primero), producido en las primeras horas de la mañana cuando el tablero se contrae por las temperaturas nocturnas y se dilata en el transcurso de la mañana y tarde por el aumento de estas durante el día (Berecibar, 2012).

Para comprobar la teoría descrita anteriormente se registran cinco mediciones en la distancia de separación en entre cinco puntos del puente, tres en los apoyos de la cercha 2, y dos entre ambas cerchas en sus apoyos en la pila.

**Primer punto:** Separación entre bastión y patín superior de viga diafragma externo.

**Segundo punto:** Separación entre bastión y patín inferior de viga diafragma externo.

**Tercer punto:** Distancia vertical del apoyo fijo articulado y la placa de apoyo.

**Cuarto punto:** Separación entre alas superiores de cercha 1 y 2 en los puntos de apoyo de la pila.

**Quinto punto:** Separación entre alas inferiores de cercha 1 y 2 en los puntos de apoyo de la pila.

Los registros son iniciados a las 06:00 am hasta las 2:30 pm aproximadamente, con una variación de temperatura promedio de 18,25 °C. En cada medición se registra la distancia de separación, temperatura y hora.

#### 4.2.1 Primer punto

Se registran cinco datos de la distancia de separación entre el extremo superior del patín de la viga diafragma con respecto al bastión como se muestra en la Figura 15.

Figura 15. Distancia medida entre bastión y patín superior de viga diafragma

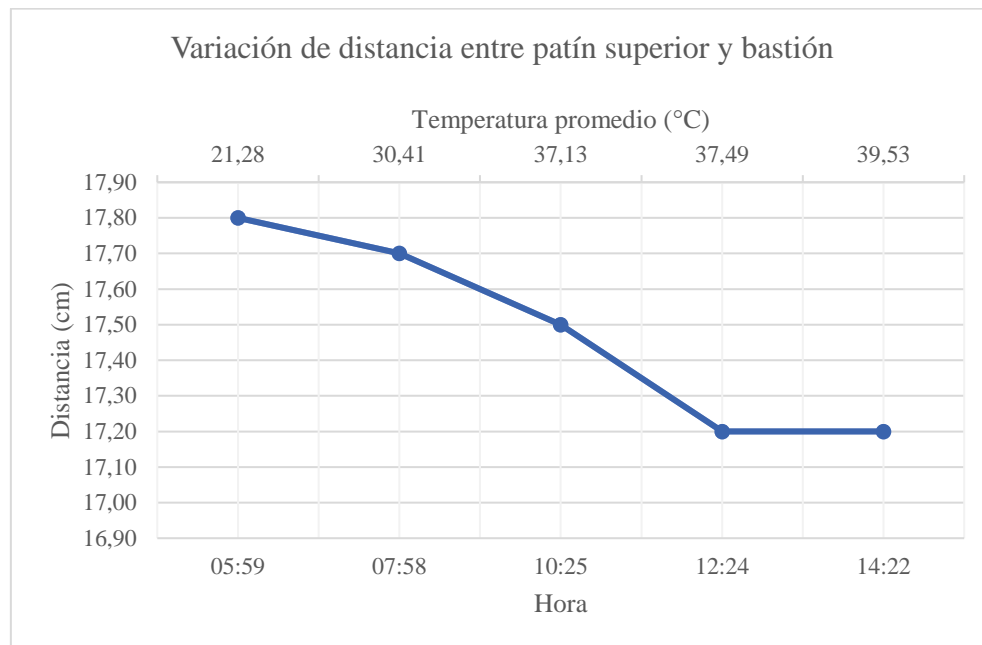


Fuente: Propia

Basado en los datos recolectados se gráfica el comportamiento de la distancia medida respecto a la hora y temperatura, la cual se observa en la Figura 16. Se infiere como la

distancia de separación se reduce 6 mm en función de la hora de medición y el correspondiente aumento en la temperatura a medida que va aumentando la temperatura.

Figura 16. Variación de distancia entre patín superior y bastión



Fuente: Propia

#### 4.2.2 Segundo punto

Se registraron cinco datos de la distancia de separación entre el extremo inferior del patín de la viga diafragma con respecto al bastión como se muestra en la Figura 17. Además, se grafica la variación en la separación a medida que fue aumento la temperatura ambiental.

Figura 17. Distancia medida entre el patín inferior de viga diafragma y bastión

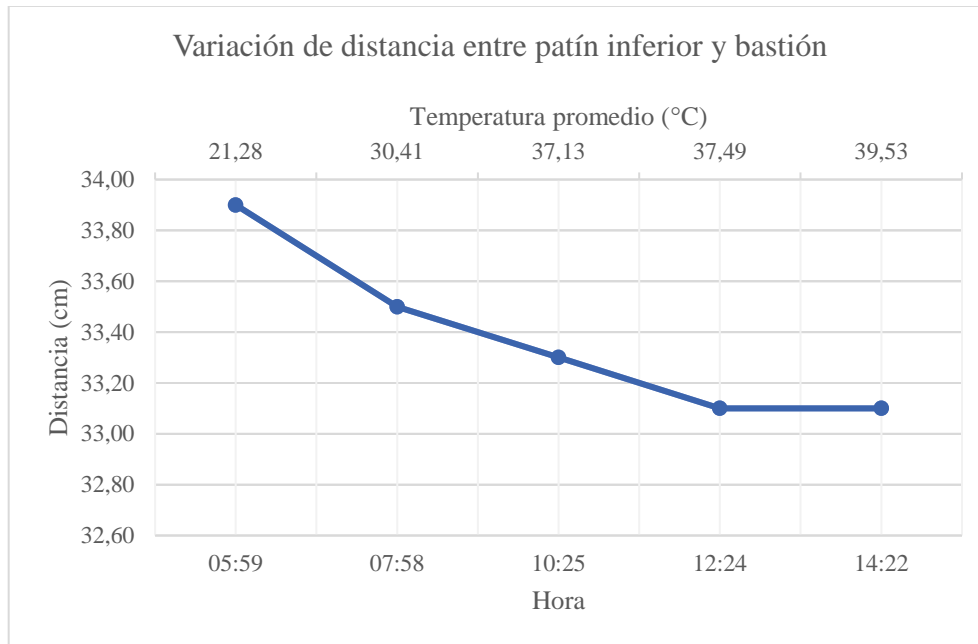


Fuente: Propia

Como se observa en la Figura 18, a medida que aumenta la temperatura ambiental provoca que la temperatura de los elementos estructuras en el puente también incrementen ocasionando una dilatación del material; esto se ve reflejado con la reducción de la distancia de separación, en este caso 8 mm.



Figura 18. Variación de distancia entre patín inferior y bastión



Fuente: Propia

#### 4.2.3 Tercer punto

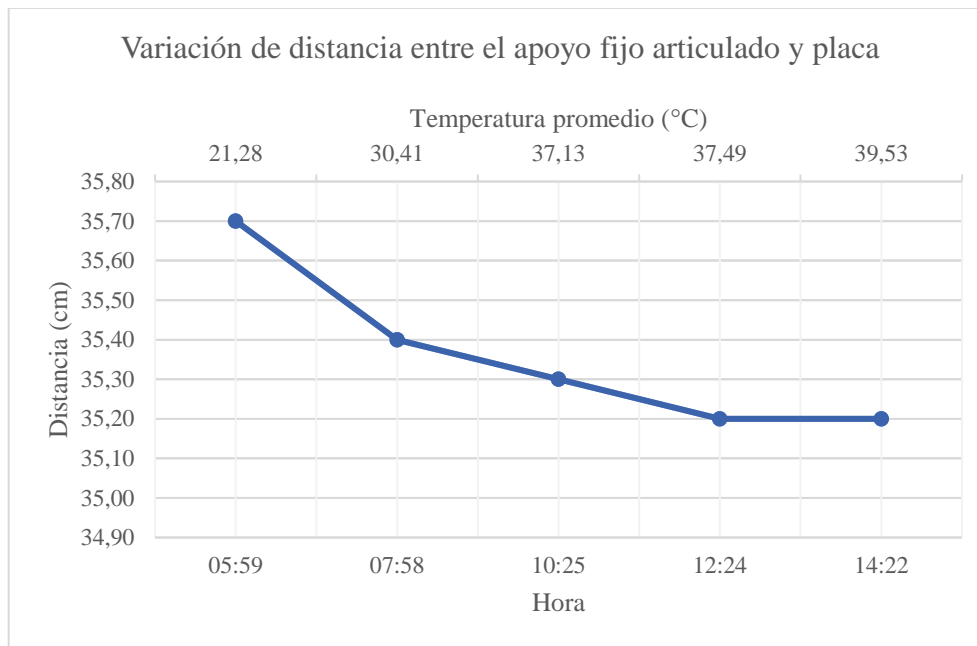
Al igual que en los puntos anteriores, se tomaron cinco mediciones de la distancia de separación vertical del apoyo fijo articulado con respecto a la placa inferior de apoyo, como se muestra en la Figura 19. Posteriormente, en la Figura 20 se gráfica el comportamiento experimentado a medida que cambia la temperatura de ambiente en cada medición. Esta variación ocurre debido al giro experimentado por el apoyo simple en este bastión.

Figura 19. Distancia medida entre el apoyo fijo articulado y la placa



Fuente: Propia

Figura 20. Variación de distancia entre el apoyo fijo articulado y la placa

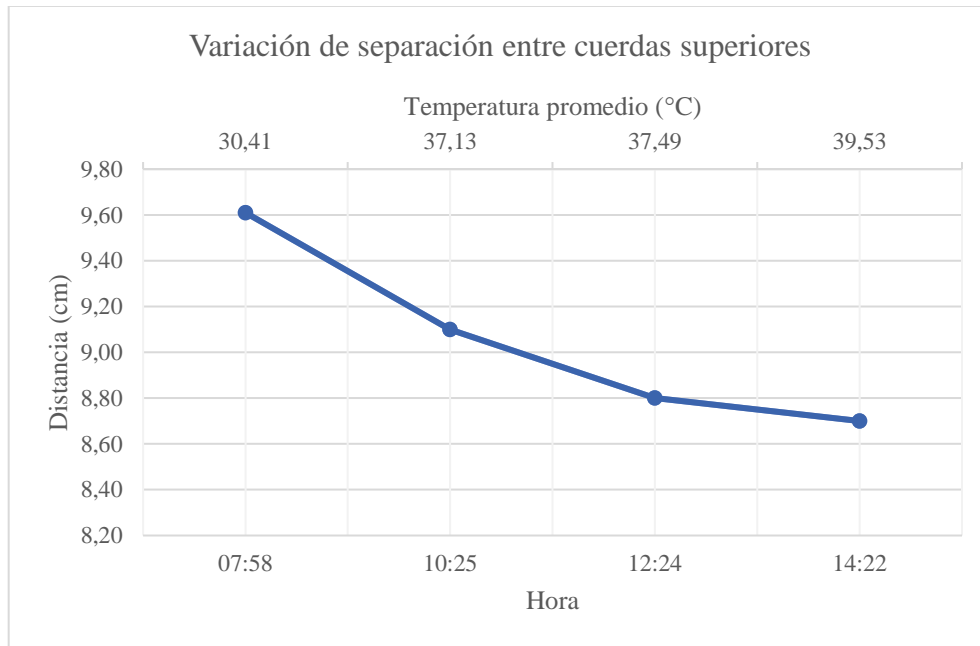


Fuente: Propia

#### 4.2.4 Cuarto punto

En este punto se considera la distancia de separación entre cuerdas superiores de la cercha A y la cercha B en los puntos de apoyo de la pila. En esta ocasión se realizan cuatro mediciones, comenzando a las 8:00 am hasta las 02:30 pm con una variación en la temperatura de  $9,12^{\circ}\text{C}$ . Donde se registra una variación de  $0,91\text{ cm}$  entre la primera medición y la última.

Figura 21. Variación de separación entre cuerdas superiores de cerchas

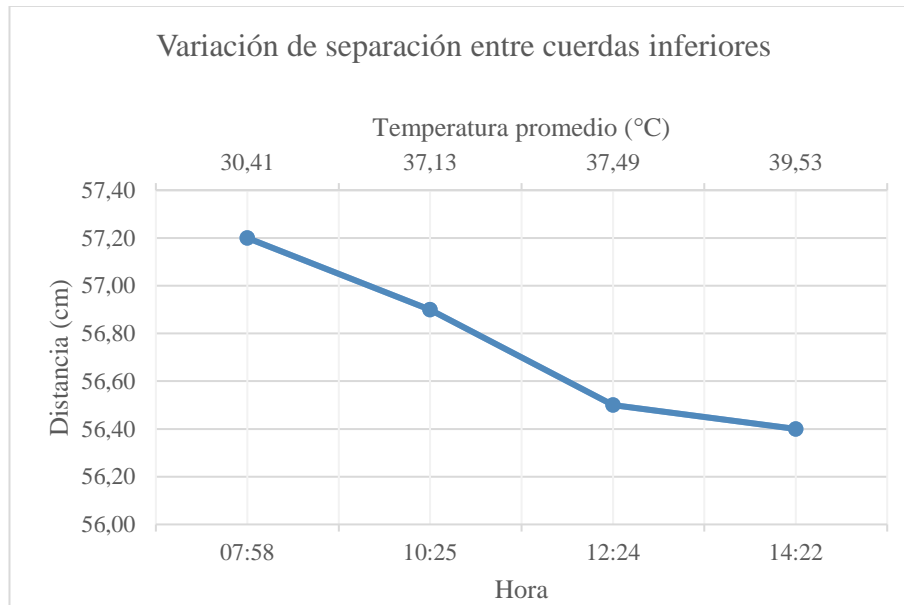


Fuente: Propia

#### 4.2.5 Quinto punto

En este último punto se mide la distancia de separación entre cuerdas inferiores de la cercha A y la cercha B en los puntos de apoyo de la pila. Se realizan cuatro mediciones, comenzando a las 8:00 am hasta las 02:30 pm con una variación en la temperatura de 9,12°C aproximadamente. Se registra una variación de 0,8 cm entre la primera y la última medición.

Figura 22. Variación de separación entre cuerdas inferiores de cerchas



Fuente: Propia

#### 4.3 Espectros de Fourier

Para la identificación de las frecuencias de los modos de vibrar del puente se utiliza el programa ADDA, que obtiene cada uno de los espectros de Fourier de aceleración para la caracterización de las frecuencias de vibrar de cada cercha.

En la obtención del espectro de Fourier se considera un error generado por el propio cálculo del espectro como tal, relacionado con la discretización de los datos. Para reducir este error se utilizan 131.072 puntos de discretización, lo que incrementa el número de puntos continuos y así lograr mayor precisión en los resultados. La adopción de esta cantidad de puntos de discretización nace de las recomendaciones dadas en Céspedes (2022).

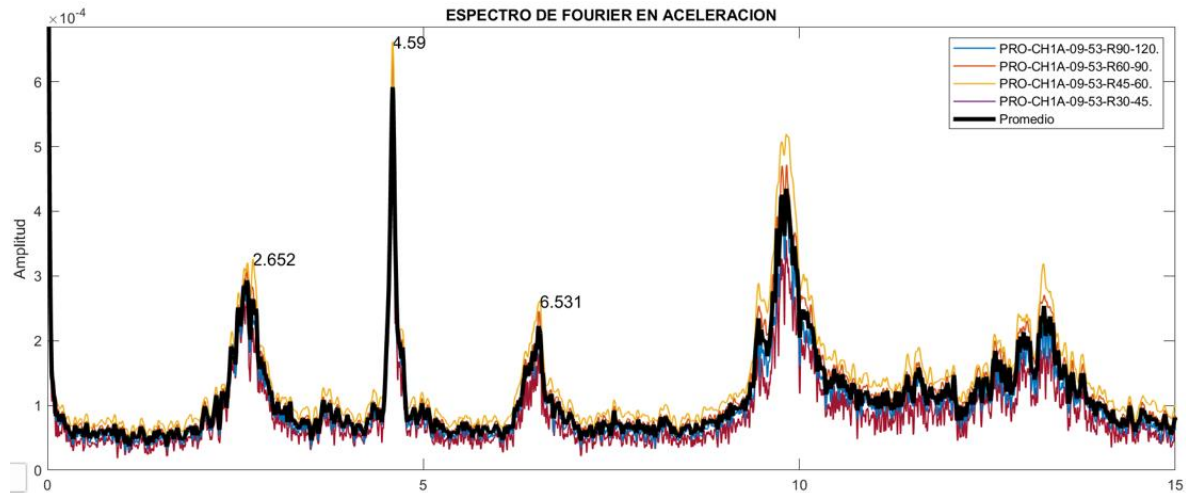
Adicional a lo anterior, por cada medición se usan cuatro diferentes rangos de tamaño de ventanas de Hanning. Se aplican ventanas de tiempo en rangos de 30 a 45 segundos, de 45 a 60 segundos, de 60 a 90 segundos, y de 90 a 120 segundos, para luego, en cada rango de tamaño de ventana, promediar todas las ventanas y obtener una desviación estándar que viene a representar el error significativo del análisis.

Los anexos de este estudio contienen los espectros de Fourier para todas las mediciones realizadas, sin embargo, a continuación se muestra un ejemplo de un espectro de

Fourier que contiene el promedio de los cuatro rangos de tiempo de las ventanas de análisis de la cercha 1 (CH1) a las 09:53 am, donde se observan claramente tres frecuencias de formas modales.

En la Figura 23 se identifican 3 modos de vibrar, siendo el número en la parte superior de cada pico la frecuencia correspondiente en Hz.

Figura 23. Registro de frecuencias en CH1 A, 09:53, el eje Y muestra las frecuencias



Fuente: Propia

A continuación, se muestra un espectro de Fourier en la cercha 2 (CH2) registrado a las 02:10 am, donde se observan con claridad las frecuencias de dos modos de vibrar.

En la Figura 24 se identifican 2 modos de vibrar, siendo el número en la parte superior de cada pico la frecuencia correspondiente en Hz.

Figura 24. Registro de frecuencias en CH2 A, 02:10, el eje Y muestra las frecuencias



Fuente: Propia

Frecuencias de modos de vibrar y temperatura ambiental

#### 4.4.1 Cercha 1

Para el análisis de las frecuencias se descartan algunos modos de vibrar basados en el criterio de que en algunos casos no se identifican con claridad, o los valores se interponen entre sí por la cercanía de las frecuencias de modos cercanos. Quizás existen dichos modos, pero para el análisis en cuestión no se toman en cuenta.

Seguidamente, en la Tabla 9 se presentan las frecuencias identificadas con su respectiva temperatura ambiental. En la Tabla 10 aparece la desviación estándar en cada modo de vibrar, y en la Tabla 11 se muestran la covarianza de la Cercha 1.

Tabla 9. Frecuencias y temperaturas registradas en la CH1 puntos A y B

| Código               | Temperatura promedio (°C) | Modo A (Hz) | Modo B (Hz) | Modo C (Hz) | Modo D (Hz) | Modo E (Hz) | Modo F (Hz) |
|----------------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>CR-CH1A-05-27</b> | 23.32                     | 2.6855      | 4.6204      | -           | 6.5216      | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-03-27</b> | 24.47                     | 2.7069      | 4.6143      | -           | 6.543       | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-01-43</b> | 25.19                     | 2.6886      | 4.5929      | -           | -           | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-07-30</b> | 29.71                     | 2.6337      | 4.5807      | -           | 6.5033      | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-09-53</b> | 35.61                     | 2.652       | 4.5898      | -           | 6.5308      | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-11-53</b> | 36.67                     | -           | 4.6173      | -           | 6.5216      | -           | -           |

| Código               | Temperatura promedio (°C) | Modo A (Hz) | Modo B (Hz) | Modo C (Hz) | Modo D (Hz) | Modo E (Hz) | Modo F (Hz) |
|----------------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>CR-CH1A-13-53</b> | 38.68                     | 2.6428      | 4.6356      | -           | 6.6101      | -           | -           |
| <b>CR-CH1B-05-39</b> | 21.85                     | -           | 4.6204      | -           | -           | 7.6324      | 8.1726      |
| <b>CR-CH1B-03-36</b> | 23.39                     | -           | 4.6204      | -           | -           | -           | -           |
| <b>CR-CH1B-01-54</b> | 24.03                     | -           | 4.5898      | 4.6692      | -           | -           | -           |
| <b>CR-CH1B-07-39</b> | 30.15                     | -           | 4.5746      | 4.6967      | -           | 7.5531      | 8.2642      |
| <b>CR-CH1B-10-03</b> | 36.68                     | -           | 4.5929      | 4.6936      | -           | 7.5684      | 8.2062      |
| <b>CR-CH1B-12-03</b> | 37.27                     | -           | 4.6234      | 4.7729      | -           | 7.5958      | 8.1879      |
| <b>CR-CH1B-14-03</b> | 39                        | -           | 4.6387      | 4.8279      | -           | 7.6538      | 8.1482      |

Fuente: Propia

Tabla 10. Desviación estándar de frecuencias en CH1 puntos A y B

| Desviación estándar (Hz) |             |             |             |             |             |             |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Código                   | Modo A (Hz) | Modo B (Hz) | Modo C (Hz) | Modo D (Hz) | Modo E (Hz) | Modo F (Hz) |
| <b>CR-CH1A-05-27</b>     | 0.0034      | 0.0051      | -           | 0.0022      | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-03-27</b>     | 0.004       | 0.0022      | -           | 0.0015      | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-01-43</b>     | 0.0336      | 0.0015      | -           | -           | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-07-30</b>     | 0.0022      | 0.0015      | -           | 0.0185      | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-09-53</b>     | 0.0398      | 0.0015      | -           | 0.0089      | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-11-53</b>     | -           | 0           | -           | 0.01        | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-13-53</b>     | 0.0022      | 0           | -           | 0.0015      | -           | -           |
| <b>CR-CH1B-05-39</b>     | -           | 0.0015      | -           | -           | 0.0022      | 0           |
| <b>CR-CH1B-03-36</b>     | -           | 0.0015      | -           | -           | -           | -           |
| <b>CR-CH1B-01-54</b>     | -           | 0.0015      | 0.0076      | -           | -           | -           |
| <b>CR-CH1B-07-39</b>     | -           | 0.0015      | 0.0113      | -           | 0.0082      | 0.0512      |
| <b>CR-CH1B-10-03</b>     | -           | 0.0022      | 0.0034      | -           | 0.0034      | 0.0022      |
| <b>CR-CH1B-12-03</b>     | -           | 0.0015      | 0.0022      | -           | 0.0037      | 0.0489      |
| <b>CR-CH1B-14-03</b>     | -           | 0.0015      | 0.0488      | -           | 0           | 0.0803      |

Fuente: Propia

Tabla 11. Covariancia de frecuencias en CH1 puntos A y B

| C.O.V                |             |             |             |             |             |             |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Código               | Modo A (Hz) | Modo B (Hz) | Modo C (Hz) | Modo D (Hz) | Modo E (Hz) | Modo F (Hz) |
| <b>CR-CH1A-05-27</b> | 0.127       | 0.0331      | -           | 0.0022      | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-03-27</b> | 0.1491      | 0.0468      | -           | 0.0233      | -           | -           |



| C.O.V                |             |             |             |             |             |             |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Código               | Modo A (Hz) | Modo B (Hz) | Modo C (Hz) | Modo D (Hz) | Modo E (Hz) | Modo F (Hz) |
| <b>CR-CH1A-01-43</b> | 1.2499      | 0.0332      | -           | -           | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-07-30</b> | 0.0819      | 0.0333      | -           | 0.2845      | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-09-53</b> | 1.5015      | 0.0332      | -           | 0.1362      | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-11-53</b> | -           | 0           | -           | 0.1534      | -           | -           |
| <b>CR-CH1A-13-53</b> | 0.1295      | 0           | -           | 0.0231      | -           | -           |
| <b>CR-CH1B-05-39</b> | -           | 0.033       | -           | -           | 0.0283      | 0           |
| <b>CR-CH1B-03-36</b> | -           | 0.033       | -           | -           | -           | -           |
| <b>CR-CH1B-01-54</b> | -           | 0.0332      | 0.1634      | -           | -           | -           |
| <b>CR-CH1B-07-39</b> | -           | 0.0015      | 0.0334      | -           | 0.2409      | 0.1088      |
| <b>CR-CH1B-10-03</b> | -           | 0.047       | 0.0727      | -           | 0.0451      | 0.0263      |
| <b>CR-CH1B-12-03</b> | -           | 0.033       | 0.0452      | -           | 0.0492      | 0.5972      |
| <b>CR-CH1B-14-03</b> | -           | 0.0329      | 1.10104     | -           | 0           | 0.9856      |

Fuente: Propia

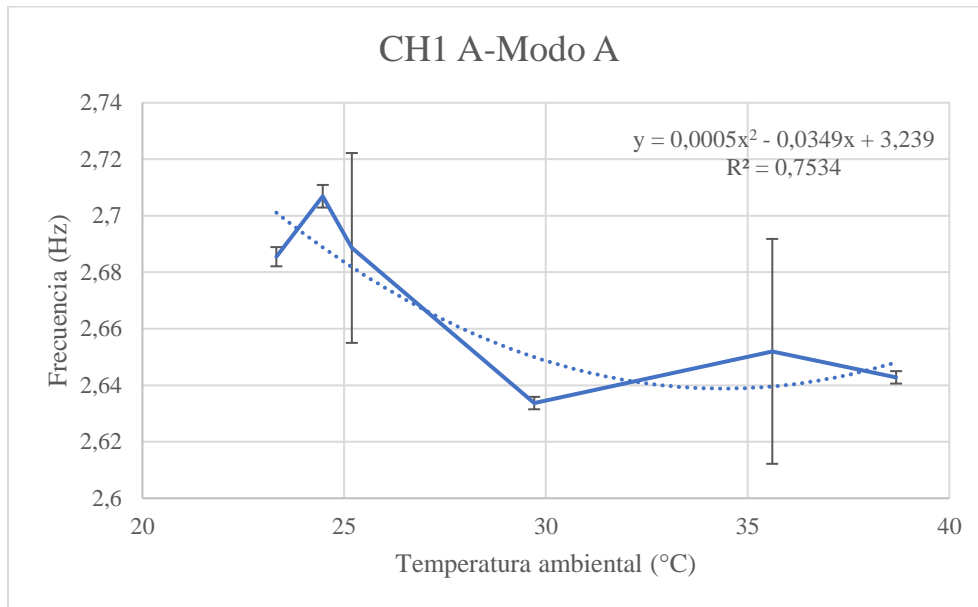
Se puede observar que no son identificadas las frecuencias en los modos C, E, F en el punto A de medición. En el caso del punto B de medición no se identificaron con claridad los modos de vibrar A y D.

A continuación, se grafica el comportamiento de los modos de vibrar identificados en cada punto de la Cercha 1 con respecto a la temperatura ambiental.

Adicional a esto, se muestra como error la desviación estándar, es decir el rango de variación entre las curvas promedio de las ventanas de análisis aplicadas en cada punto de medición para las distintas horas de monitoreo.

En la Figura 25 se muestra el modo A, donde se observa una disminución en la frecuencia de vibración a medida que la temperatura ambiental aumenta (la estructura se flexibiliza). Sin embargo, al experimentarse una temperatura superior a 34.9 °C, se produce un aumento en la frecuencia en dicho modo (la estructura se rigidiza). Es importante destacar que la diferencia entre la frecuencia máxima (2.697 Hz) y la mínima (2.630 Hz) fue del 2.55%

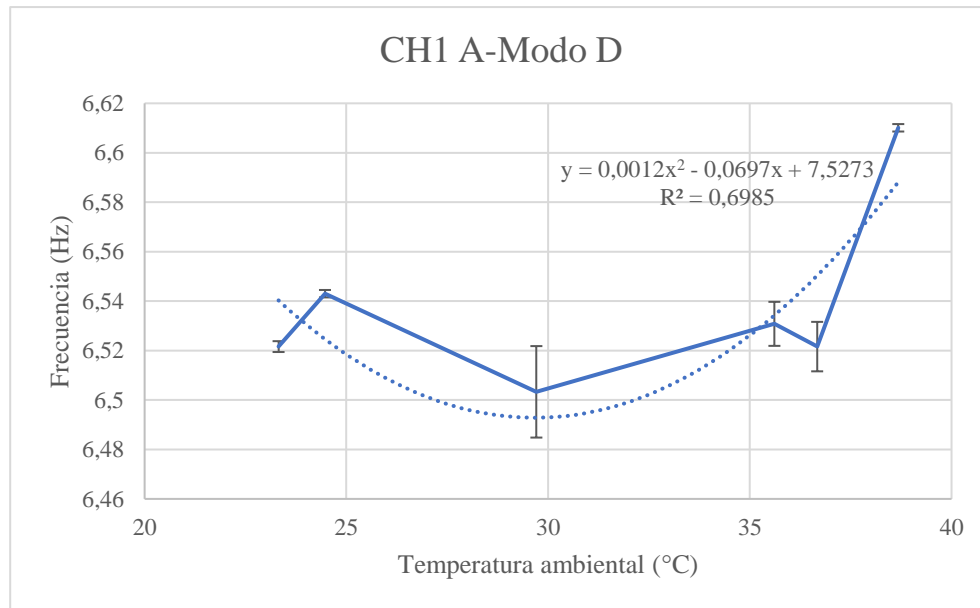
Figura 25. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH1 A, modo A



Fuente: Propia

En la Figura 26 se muestra el comportamiento del modo D, donde se observa que a medida que la temperatura de ambiente aumenta, la frecuencia de vibración en este modo disminuye (la estructura se flexibiliza) hasta llegar a una temperatura de 29.04 °C, a partir de la cual la frecuencia comienza a aumentar (la estructura se rigidiza). En este modo en particular, la diferencia entre la frecuencia máxima (6.627 Hz) y la mínima (6.515 Hz) es del 1.71%.

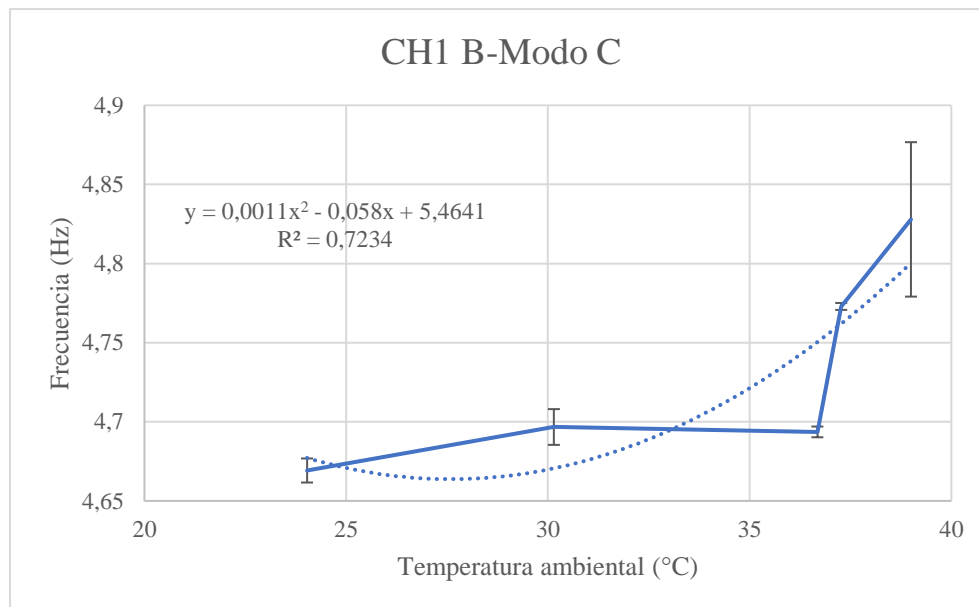
Figura 26. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH1 A, modo D



Fuente: Propia

En la Figura 27 muestra el comportamiento del modo C, donde se puede observar claramente que a medida que la temperatura de ambiente aumenta y supera los 26.36 °C, la frecuencia tiende a aumentar (la estructura se rigidiza). En este modo en particular, la variación entre la frecuencia máxima (4.879 Hz) y la mínima (4.700 Hz) es del 3.74%.

Figura 27. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH1 B, modo C

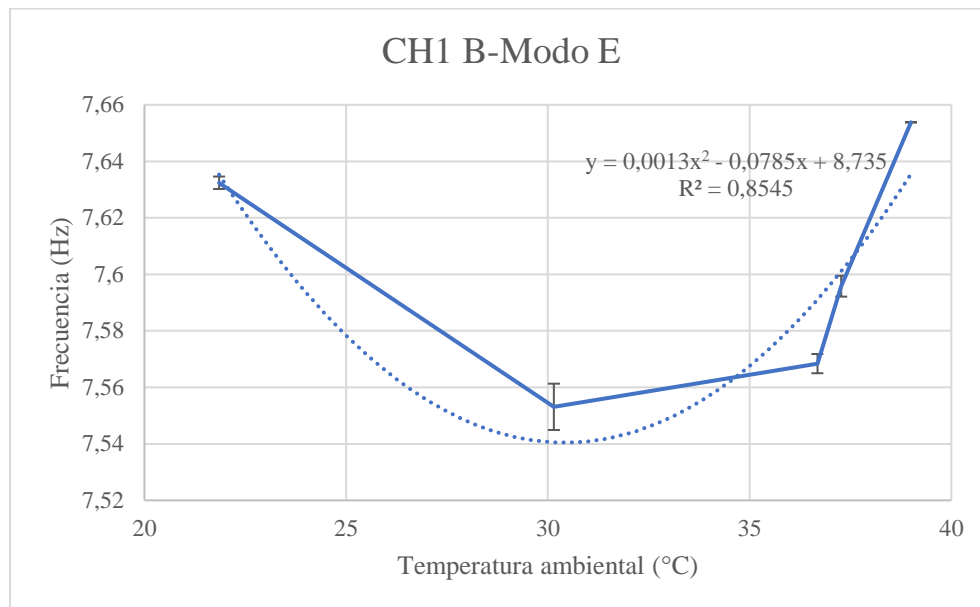


Fuente: Propia

Para el caso de la Figura 28 y Figura 29 se observa que los modos E y F tienen un comportamiento similar pero invertido. En el modo E, la frecuencia disminuye (la estructura se flexibiliza) hasta que se alcanza una temperatura ambiental de 30.19 °C y luego esta frecuencia comienza a aumentar (la estructura se rigidiza) a medida que la temperatura de ambiente continúa aumentando. En este modo, la diferencia entre la frecuencia máxima (7.651 Hz) y la mínima (7.550 Hz) es del 1.34%.

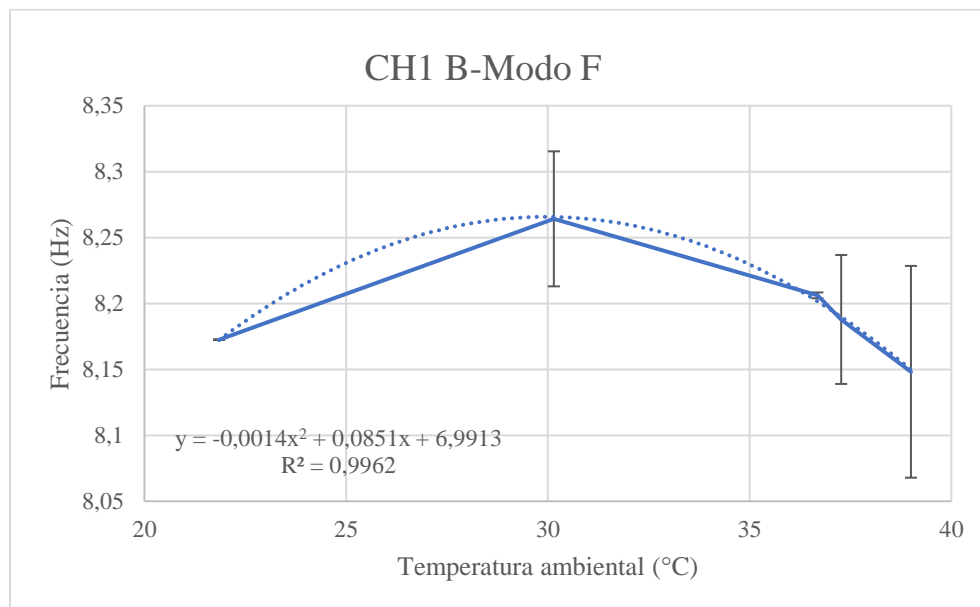
En el caso del modo F se puede observar que la frecuencia comienza a aumentar (la estructura se rigidiza) hasta que la temperatura de ambiente alcanza 30.39°C, momento a partir del cual, la estructura empieza a flexibilizarse y la frecuencia comienza a disminuir. En este modo en particular, la variación entre la frecuencia máxima de 8.285 Hz y la mínima de 8.181 Hz es del 1.2%.

Figura 28. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH1 B, modo E



Fuente: Propia

Figura 29. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH1 B, modo F



Fuente propia

### **Análisis comparativo entre CH1 A y CH1 B para el modo de vibrar B**

En la Figura 30 se muestra el comportamiento del modo B en la CH1 medido en el punto A, donde la frecuencia desciende (la estructura se flexibiliza) hasta que la temperatura ambiente alcanza  $30.11^{\circ}\text{C}$  y luego esta frecuencia comienzan a aumentar (la estructura se rigidiza) conforme aumenta la temperatura de ambiente. En este modo, la variación entre la frecuencia máxima (4.651 Hz) y la mínima (4.585 Hz) es del 1.44%.

En el caso de la Figura 31 se muestra el comportamiento de modo B en la CH1 medido en el punto B, el cual presenta un comportamiento similar al del punto A, donde la frecuencia desciende (la estructura se flexibiliza) hasta que la temperatura ambiente alcanza  $30.12^{\circ}\text{C}$  y luego esta frecuencia comienza a aumentar (la estructura se rigidiza) al seguir aumentando la temperatura ambiental. En este punto, la variación entre la frecuencia máxima (4.632 Hz) y la mínima (4.569 Hz) es del 1.38%.

La Figura 32 representa el comportamiento de la frecuencia de este Modo B, medido en ambos puntos, en donde se observa con mayor claridad la similitud en los comportamientos.

De forma general para este modo de vibrar B, y el resto de los modos identificados tanto en esta Cercha 1, en donde no ocurre una variación lineal del cambio en frecuencia con respecto la temperatura ambiental, sino más bien una variación polinómica, se debe a la naturaleza de la superestructura, que está compuesta por múltiples elementos que se expanden y se contraen en diferentes momentos del día.

En la mayoría de los modos de vibrar, a medida que la temperatura de ambiente aumenta, la estructura comienza a flexibilizarse y la frecuencia de vibración disminuye.

Una vez la temperatura ambiental supera los valores descritos anteriormente, los elementos de la superestructura se ven restringidos entre sus nodos, lo que provoca una rigidez en la estructura y un aumento en la frecuencia de los modos de vibración. Sin embargo, deber considerarse que en el modo de vibrar F identificado, se experimentó un comportamiento inverso.

Figura 30. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH1 A, modo B

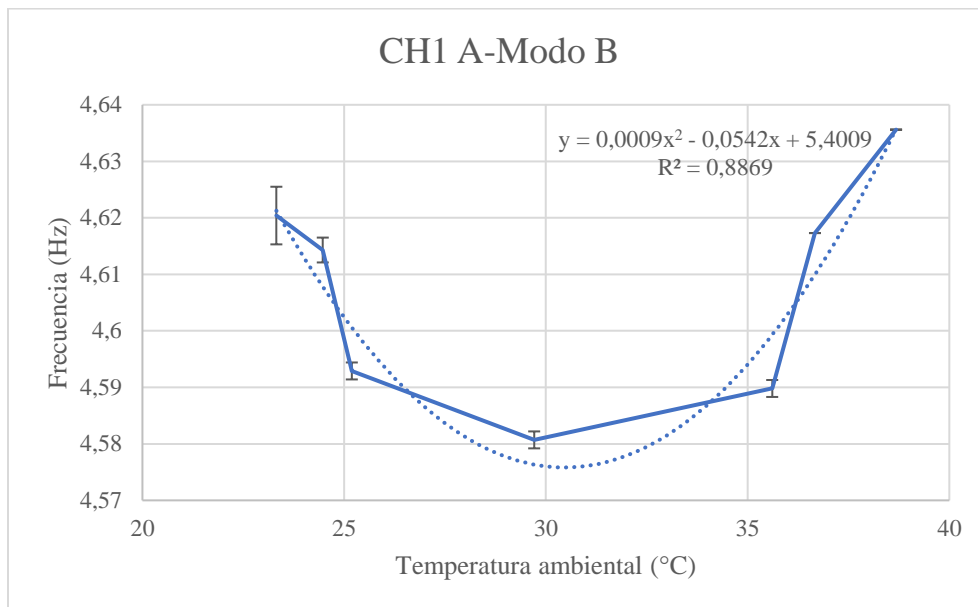


Figura 31. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH1 B, modo B

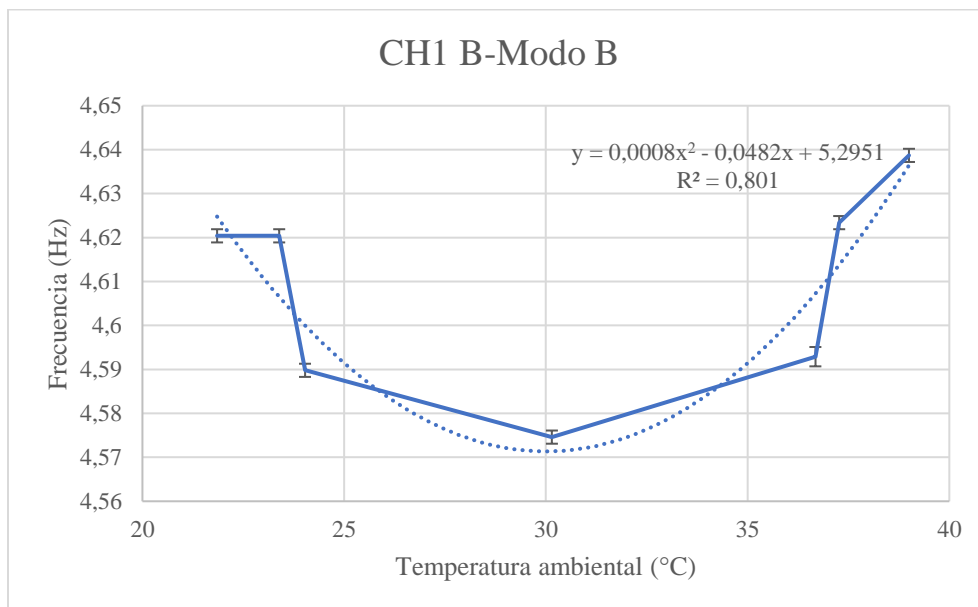
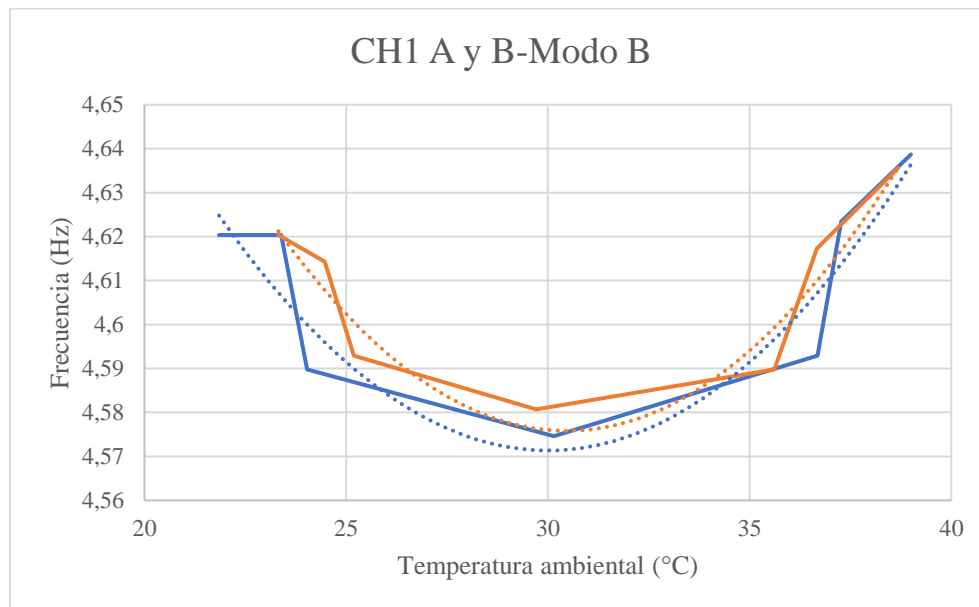


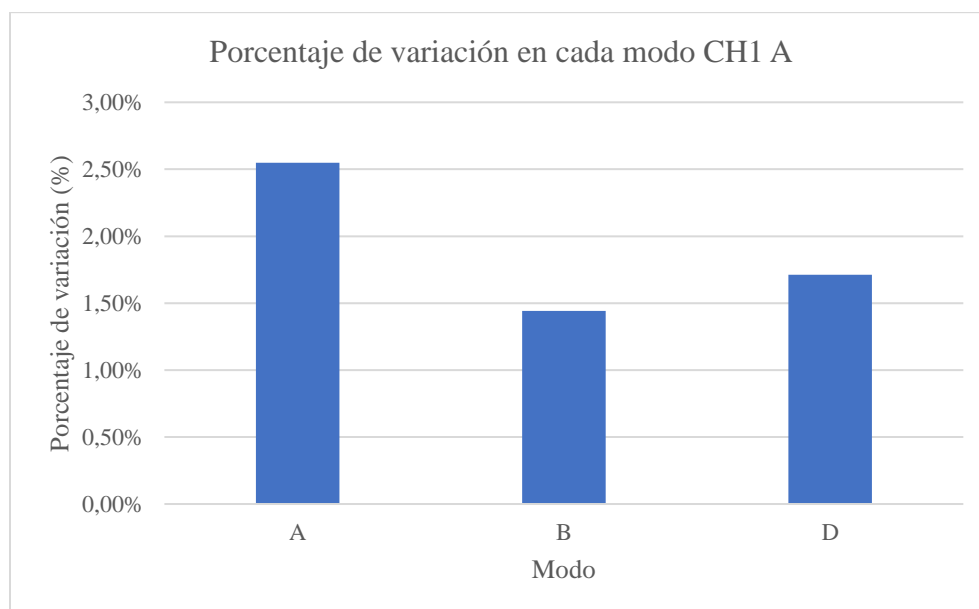
Figura 32. Relación entre frecuencias y temperaturas ambientales de CH1 A y B, modo B



Fuente: Propia

En la siguiente figura se muestran los porcentajes de variación en cada modo de vibrar de la CH1 medidos en los puntos A y B

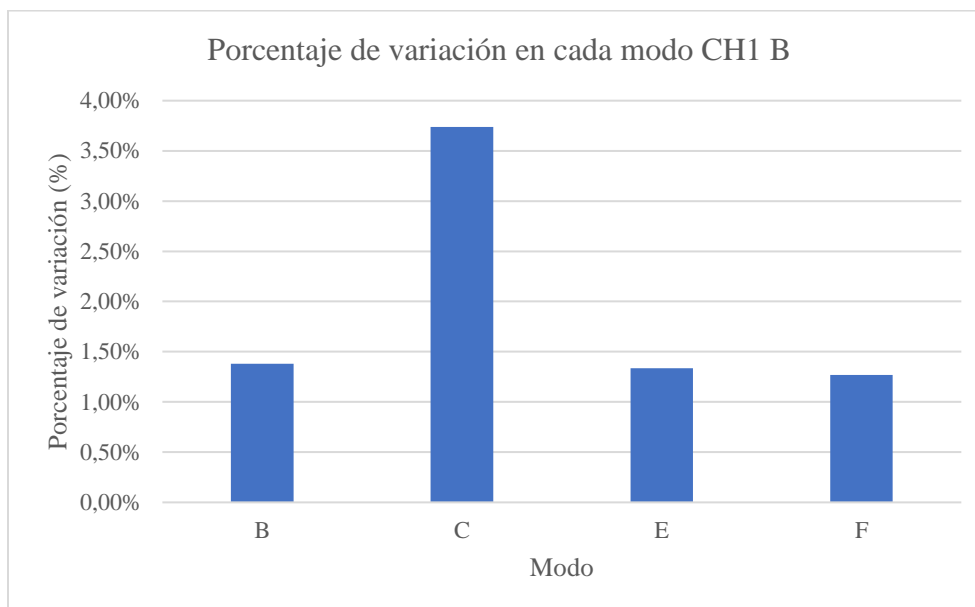
Figura 33. Porcentaje de variación en los modos de vibrar CH1 A



Fuente: Propia



Figura 34. Porcentaje de variación en los modos de vibrar CH1 B



Fuente: Propia

## 4.4.2 Cercha 2

Para mejor comprensión, se ordenan los datos de la de cercha 2 de la misma forma que en la cercha 1. A continuación, en la Tabla 12 se presenta las frecuencias de cada forma modal identificada con su respectiva temperatura ambiental, en la Tabla 13 se presenta la desviación estándar en cada modo de vibrar y la Tabla 14 se muestran todos los la covarianza de la Cercha 2.

Tabla 12. Frecuencias promedio en CH2, puntos A y B

| Frecuencia promedio (Hz) |                           |             |             |             |             |             |
|--------------------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Código                   | Temperatura promedio (°C) | Modo A (Hz) | Modo B (Hz) | Modo C (Hz) | Modo D (Hz) | Modo E (Hz) |
| <b>CR-CH2A-05-50</b>     | 21.42                     | -           | -           | 3.8055      | 6.4758      | -           |
| <b>CR-CH2A-03-45</b>     | 23.01                     | -           | -           | 3.8086      | 6.464       | -           |
| <b>CR-CH2A-02-10</b>     | 24.2                      | -           | -           | 3.8055      | 6.4728      | -           |
| <b>CR-CH2A-07-49</b>     | 30.69                     | -           | -           | 3.7964      | 6.4697      | -           |
| <b>CR-CH2A-10-14</b>     | 36.88                     | -           | -           | 3.8116      | 6.4545      | -           |
| <b>CR-CH2A-12-14</b>     | 37.56                     | -           | -           | 3.857       | 6.491       | -           |
| <b>CR-CH2A-14-13</b>     | 39.29                     | -           | -           | 3.8544      | 6.5033      | -           |
| <b>CR-CH2B-05-59</b>     | 21.28                     | 2.4872      | 3.1342      | 3.7994      | 6.4758      | 6.6925      |

| Frecuencia promedio (Hz) |                           |             |             |             |             |             |
|--------------------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Código                   | Temperatura promedio (°C) | Modo A (Hz) | Modo B (Hz) | Modo C (Hz) | Modo D (Hz) | Modo E (Hz) |
| <b>CR-CH2B-03-52</b>     | 22.42                     | 2.4811      | 3.1189      | 3.8116      | 6.4636      | 6.7383      |
| <b>CR-CH2B-02-19</b>     | 23.55                     | 2.493       | 3.04        | 3.8086      | 6.4697      | 6.7291      |
| <b>CR-CH2B-07-58</b>     | 30.41                     | 2.4872      | 3.1128      | 3.8086      | 6.4484      | 6.7261      |
| <b>CR-CH2B-10-25</b>     | 37.13                     | -           | 3.0975      | 3.8177      | 6.4423      | 6.6956      |
| <b>CR-CH2B-12-24</b>     | 37.49                     | 2.6703      | 3.1464      | 3.8483      | 6.4911      | 6.7444      |
| <b>CR-CH2B-14-22</b>     | 39.53                     | 2.8137      | 3.1464      | 3.8635      | 6.5094      | 6.7474      |

Fuente: Propia

Tabla 13. Desviación estándar de frecuencias en CH2, puntos A y B

| Desviación estándar (Hz) |             |             |             |             |             |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Código                   | Modo A (Hz) | Modo B (Hz) | Modo C (Hz) | Modo D (Hz) | Modo E (Hz) |
| <b>CR-CH2A-05-50</b>     | -           | -           | 0.0037      | 0.0031      | -           |
| <b>CR-CH2A-03-45</b>     | -           | -           | 0.0015      | 0.0015      | -           |
| <b>CR-CH2A-02-10</b>     | -           | -           | 0           | 0.0046      | -           |
| <b>CR-CH2A-07-49</b>     | -           | -           | 0.0022      | 0.0084      | -           |
| <b>CR-CH2A-10-14</b>     | -           | -           | 0.0043      | 0           | -           |
| <b>CR-CH2A-12-14</b>     | -           | -           | 0.0037      | 0.0015      | -           |
| <b>CR-CH2A-14-13</b>     | -           | -           | 0.0015      | 0.0015      | -           |
| <b>CR-CH2B-05-59</b>     | 0.0046      | 0.0026      | 0.0053      | 0.0022      | 0.0026      |
| <b>CR-CH2B-03-52</b>     | 0.0037      | 0.0073      | 0.0015      | 0           | 0.0015      |
| <b>CR-CH2B-02-19</b>     | 0.007       | 0.0026      | 0.0022      | 0.0015      | 0.0034      |
| <b>CR-CH2B-07-58</b>     | 0.0022      | 0.0031      | 0.0037      | 0           | 0.0015      |
| <b>CR-CH2B-10-25</b>     | -           | 0.0022      | 0.0053      | 0.0026      | 0.0026      |
| <b>CR-CH2B-12-24</b>     | 0.0154      | 0.0031      | 0           | 0.0026      | 0.0034      |
| <b>CR-CH2B-14-22</b>     | 0.0085      | 0.0068      | 0.0034      | 0.0022      | 0.0015      |

Fuente: Propia

Tabla 14. Covariancia de frecuencias en CH2, puntos A y B

| C.O.V                |             |             |             |             |             |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Código               | Modo A (Hz) | Modo B (Hz) | Modo C (Hz) | Modo D (Hz) | Modo E (Hz) |
| <b>CR-CH2A-03-45</b> | -           | -           | 0.0401      | 0.0236      |             |
| <b>CR-CH2A-02-10</b> | -           | -           | 0           | 0.0707      |             |
| <b>CR-CH2A-05-50</b> | -           | -           | 3.8055      | 0.0471      |             |
| <b>CR-CH2A-07-49</b> | -           | -           | 0.0568      | 0.1292      |             |

| C.O.V                |             |             |             |             |             |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Código               | Modo A (Hz) | Modo B (Hz) | Modo C (Hz) | Modo D (Hz) | Modo E (Hz) |
| <b>CR-CH2A-10-14</b> | -           | -           | 0.1132      | 0           |             |
| <b>CR-CH2A-12-14</b> | -           | -           | 0.0969      | 0.0235      |             |
| <b>CR-CH2A-14-13</b> | -           | -           | 0.0396      | 0.0235      |             |
| <b>CR-CH2B-05-59</b> | 0.184       | 0.08443     | 0.1391      | 0.0333      | 0.0395      |
| <b>CR-CH2B-03-52</b> | 0.1506      | 0.2346      | 0.04        | 0           | 0.0226      |
| <b>CR-CH2B-02-19</b> | 0.2805      | 0.0887      | 0.0567      | 0.0236      | 0.0507      |
| <b>CR-CH2B-07-58</b> | 0.0868      | 0.098       | 0.0981      | 0           | 0.0227      |
| <b>CR-CH2B-10-25</b> | -           | 0.0697      | 0.1385      | 0.041       | 0.0395      |
| <b>CR-CH2B-12-24</b> | 0.5771      | 0.097       | 0           | 0.0407      | 0.0506      |
| <b>CR-CH2B-14-22</b> | 0.3019      | 0.2169      | 0.0883      | 0.0332      | 0.0226      |

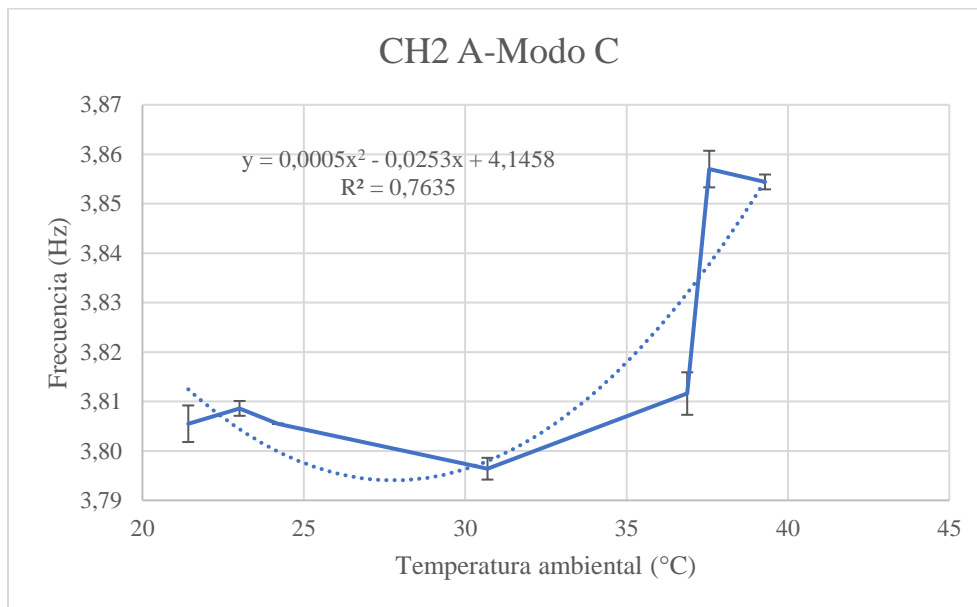
Fuente: Propia

Como se puede observar en la Figura 35 el comportamiento de la CH2 A en el modo C no es lineal, sino que la función que más se ajusta es la parabólica, la frecuencia va aumentando conforme la temperatura es mayor. En este modo, la diferencia entre la frecuencia máxima (3.924 Hz) y la mínima (3.826 Hz) es del 2.49%.

En la Figura 36 se observa el comportamiento del modo C en CH2 medico en el punto B, la frecuencia tiende a aumentar (la estructura se rigidiza). En este modo, la diferencia entre la frecuencia máxima (3.840 Hz) y la mínima (3.794 Hz) es del 1.19%.

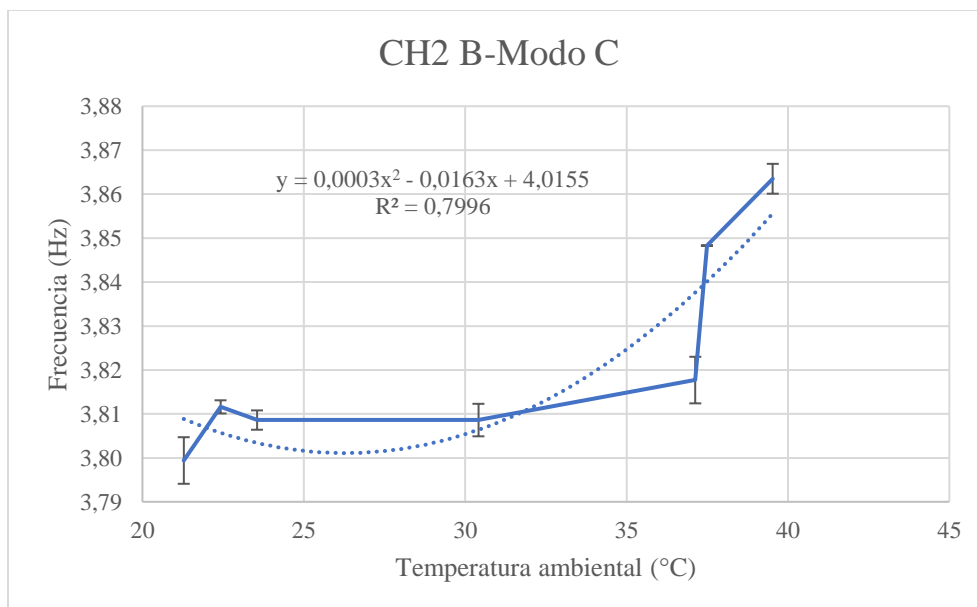
En la Figura 37 se representan ambos puntos para observar con mayor claridad la similitud entre los puntos.

Figura 35. Relación entre frecuencias y temperatura ambiental, CH2 A, modo C



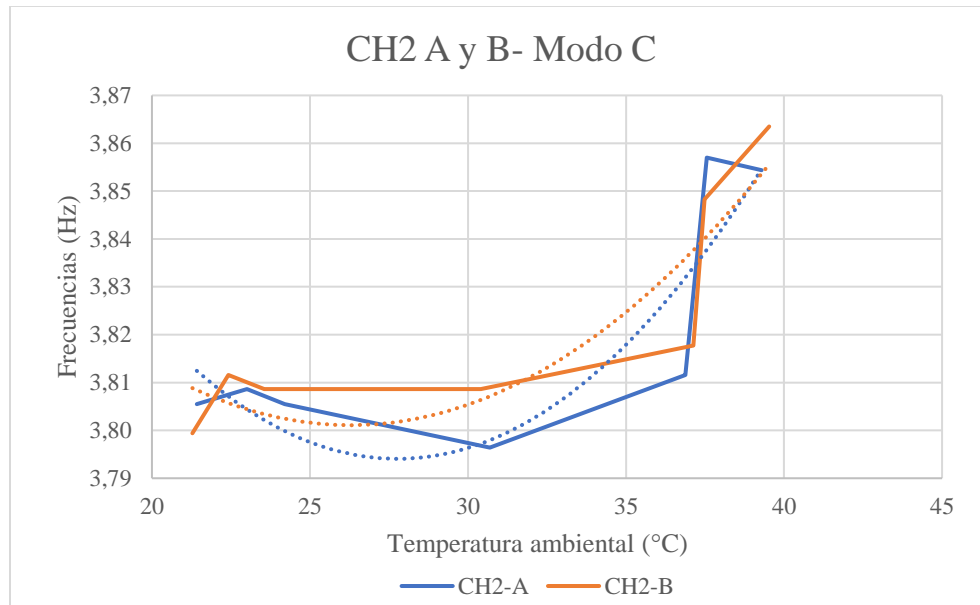
Fuente: Propia

Figura 36. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH2 B, modo C



Fuente: Propia

Figura 37. Relación entre frecuencias y temperaturas ambientales de CH2 A y B, modo C



Fuente: Propia

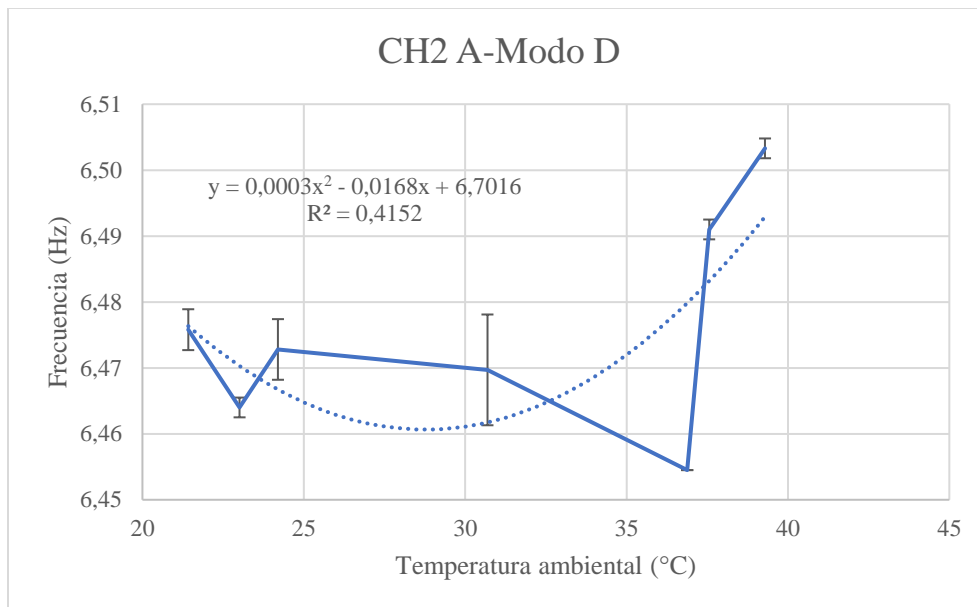
En el caso de las figuras: Figura 38, Figura 39, Figura 40 se puede observar que la frecuencia del modo de vibrar D en la CH2 se comporta de manera similar obtenidos en los puntos de medición A y B.

En el punto A, la frecuencia tiende a disminuir a medida que aumenta la temperatura de ambiente (la estructura se flexibiliza), pero cuando la temperatura ambiental aumenta y sobre pasa los 28 °C la frecuencia comienza a aumentar. Además, se encuentra que la diferencia entre la frecuencia máxima (6.505 Hz) y la mínima (6.466 Hz) es del 0.59%.

Para el punto B, la frecuencia mínima se detecta a los 27.5 °C y la diferencia entre la frecuencia máxima (6.561 Hz) y la mínima (6.474 Hz) es del 1.32%.

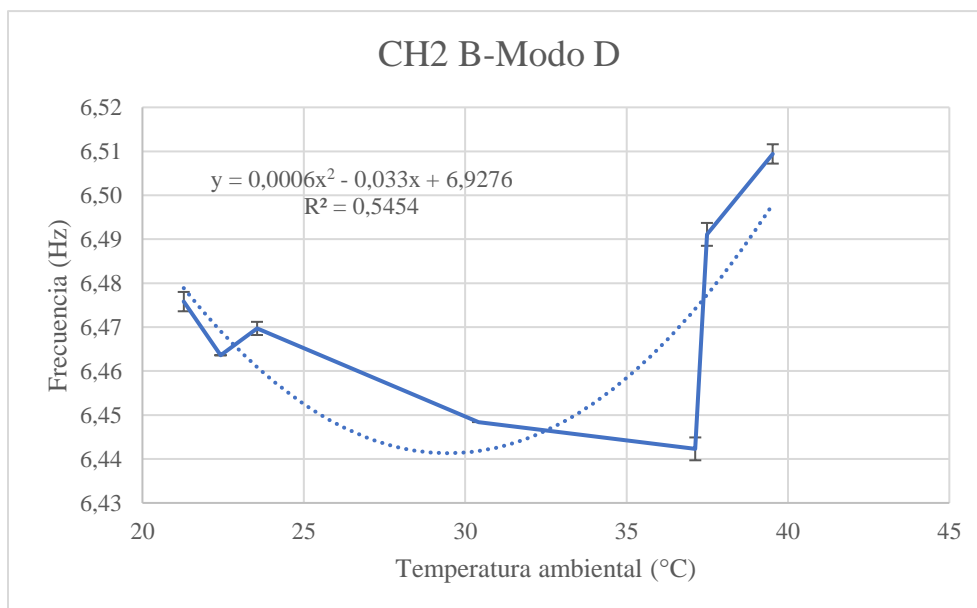
El comportamiento de la frecuencia en estos modos se debe a que la frecuencia disminuye en las horas del día donde los elementos se expanden al aumentar la temperatura ambiental, hasta que la restricción generada sus nodos lo permita, posterior a eso, la estructura comienza a rigidizarse.

Figura 38. Relación entre frecuencias y temperatura ambiental, CH2 A, modo D



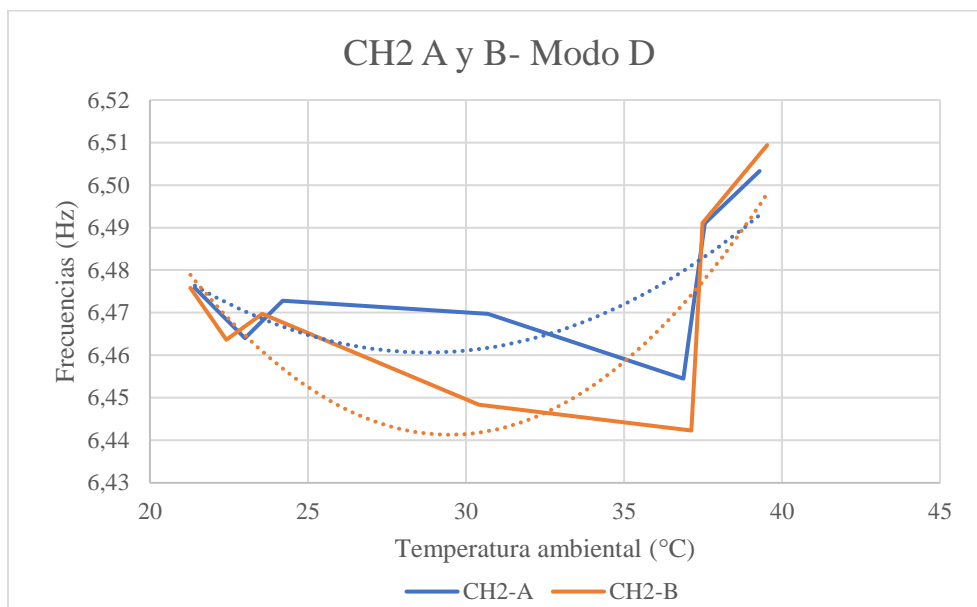
Fuente: Propia

Figura 39. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH2 B, modo D



Fuente: Propia

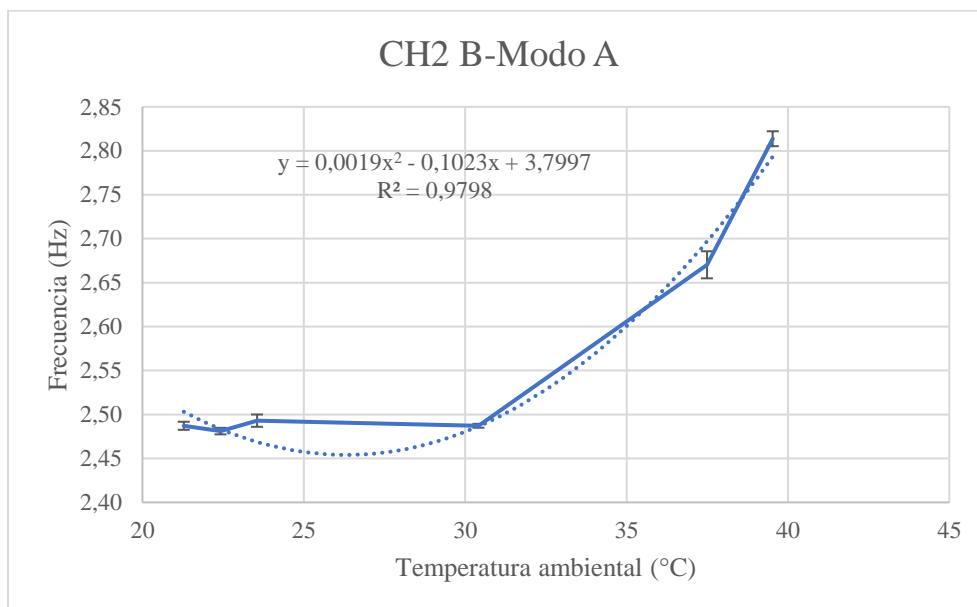
Figura 40. Relación entre frecuencias y temperaturas ambientales de CH2 A y B, modo D



Fuente: Propia

Como se puede observar en la Figura 41, el comportamiento de la frecuencia de vibrar del modo A de la CH2 B van aumentando de manera parabólica conforme aumenta la temperatura de ambiente. Además, se encuentra que la diferencia entre la frecuencia máxima (2.725 Hz) y la mínima (2.423 Hz) es del 11.08%.

Figura 41. Relación entre frecuencias y temperatura ambiental, CH2 B, modo A

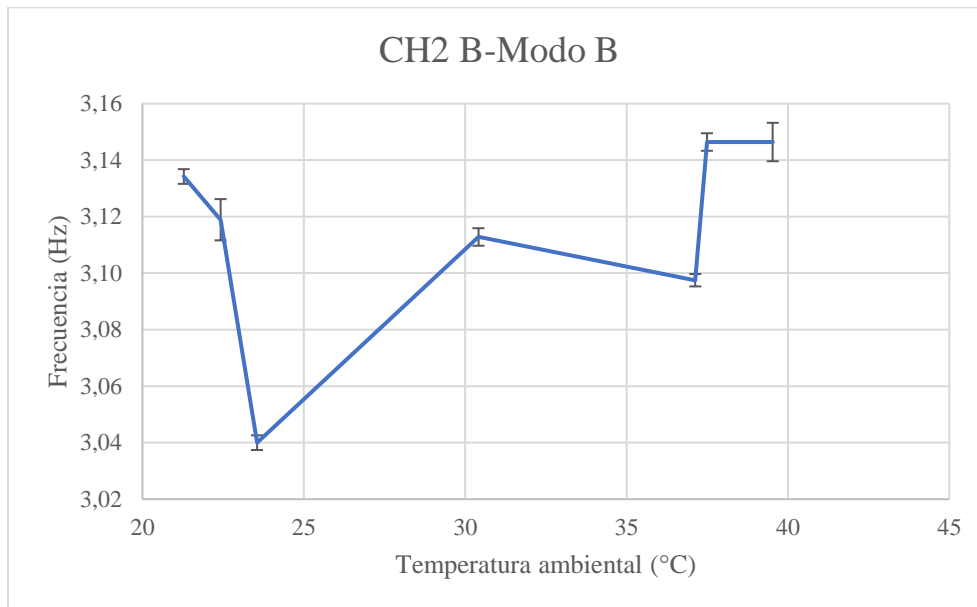


Fuente: Propia

En la Figura 42 se muestra el comportamiento del modo B en la CH2 B, la frecuencia de vibrar disminuye inicialmente, pero luego aumenta conforme la temperatura en la estructura aumenta. La diferencia entre la frecuencia máxima (3.150 Hz) y la mínima (3.087 Hz) es del 2.00%.

En cuanto el modo E en la CH2 B, se observa en la Figura 43 que la frecuencia de vibrar disminuye y luego aumenta, y se repite el comportamiento. Este comportamiento se debe a que cuando la temperatura ambiental aumenta, los elementos que conforman la estructura se expanden y deforman, lo que provoca una flexibilización de la estructura, y a su vez una disminución de las frecuencias. Sin embargo, una vez que se alcanza cierta temperatura en cada modo, la estructura comienza a rigidizarse debido a las restricciones que, impuestas por los nodos de la estructura, lo que hace que la frecuencia aumente.

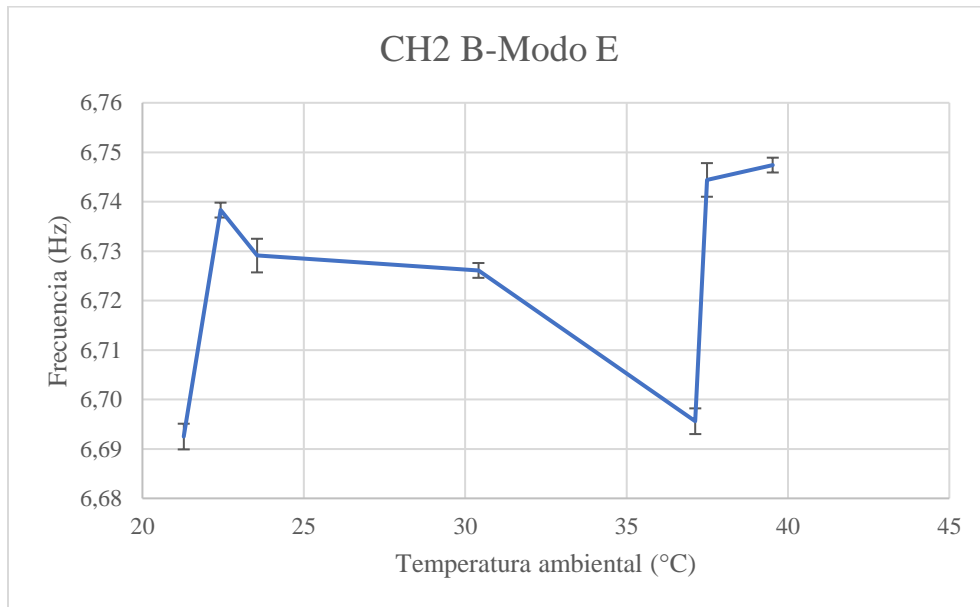
Figura 42. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH2 B, modo B



Fuente: Propia



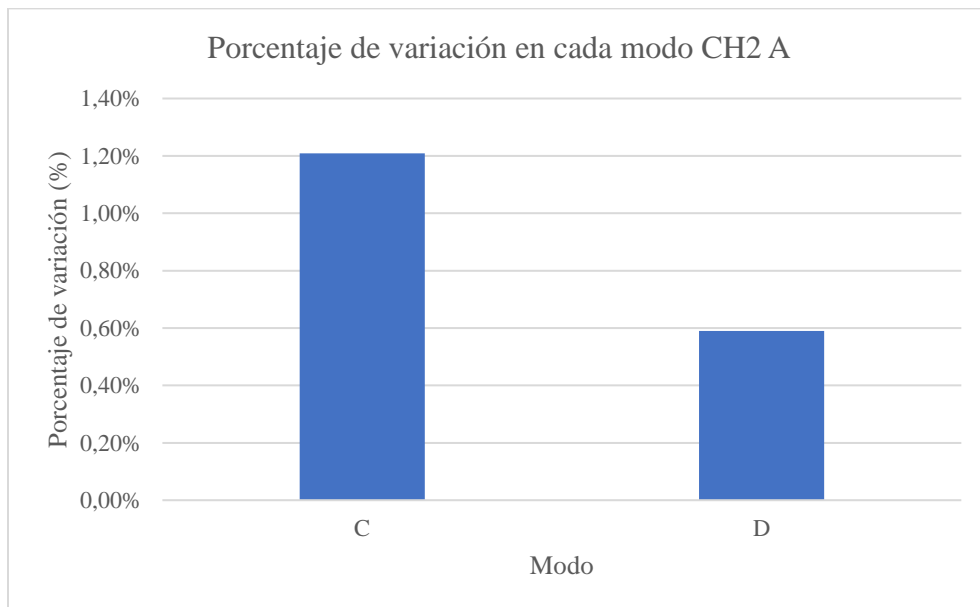
Figura 43. Relación entre frecuencia y temperatura ambiental, CH2 B, modo E



Fuente: Propia

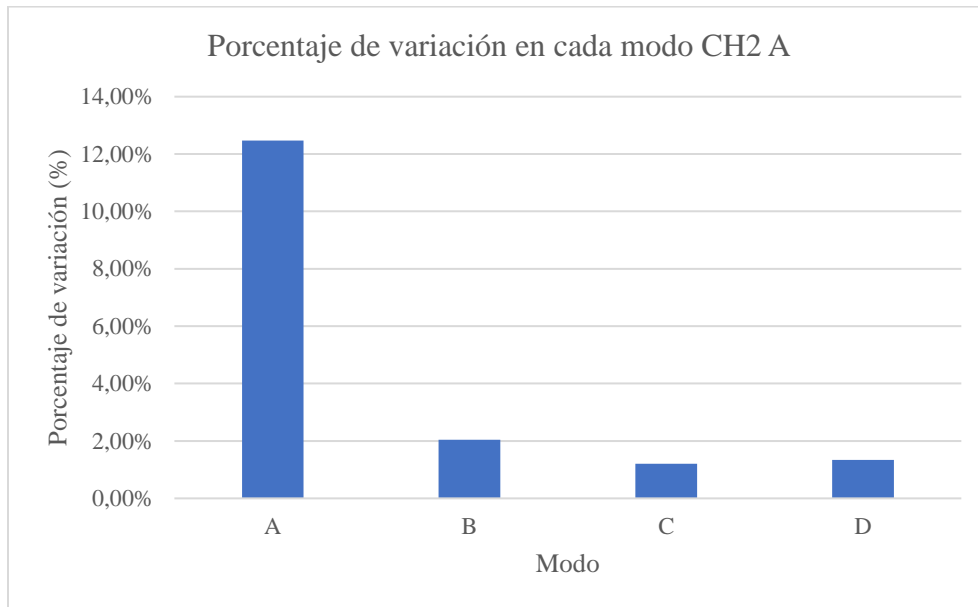
En la Figura 44 y Figura 45 se muestran los porcentajes de variación en cada modo de vibrar de la CH2 en el punto A y B

Figura 44. Porcentaje de variación en los modos de vibrar CH2 A



Fuente: Propia

Figura 45. Porcentaje de variación en los modos de vibrar CH2 B



Fuente: Propia

## 5. Conclusiones

Se logra instalar un sensor tipo acelerómetro a la estructura del puente Río Abangares, en dos puntos diferentes en cada una de las cerchas que conforman a este puente, para realizar el monitoreo dinámico de la estructura a distintas temperaturas ambientales.

Los datos de aceleraciones obtenidos se transforman del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia con la implementación del software Matlab y el programa ADDA

Se analizan los márgenes de variaciones dinámicas por cambios de la temperatura ambiental en la cercha 1 y 2. En donde a temperatura mínima de las mediciones que se registró fue de 21,28 °C y la temperatura máxima de 39,53 °C.

En la cercha 1, el modo A, mostro una variación del 2.55% entre la frecuencia máxima y mínima, además, se identificó que partir de una temperatura de 34.9 °C, la frecuencia de vibrar aumentó, mientras que en el modo D, presentó una variación del 1.71%. El caso del modo C en el punto de medición B, presenta una variación del 3.74%, mientras que el modo E y F tienen variaciones del 1.34% y 1.27%, respectivamente. En el modo B, se registran variaciones del 1.44% y 1.38% en los puntos A y B, respectivamente.

En la cercha 2, se observó una variación del 1.21% en la diferencia entre la frecuencia mínima y máxima en el modo C medido en el punto A, mientras que en las mediciones en el punto B, la variación fue del 2.04%.

Por otro lado, el modo de vibración D en la Cercha 2 presentó un comportamiento similar en los puntos A y B, con una diferencia del 1% entre la frecuencia máxima y mínima en ambos puntos de medición. Este comportamiento se debe a que la frecuencia disminuye durante las horas del día conforme va aumentando la temperatura ambiental. Esto se debe porque los elementos estructurales de esta cercha, se expanden hasta que la restricción en sus nodos no lo permite, y luego la estructura comienza a rigidizarse.

Las variaciones reflejadas en las frecuencias de vibrar de este puente, no representan un daño en la estructura como tal, sino que es un efecto normal que está ocurriendo en la estructura durante todos los días.

A pesar de que ambas cerchas tienen un comportamiento dinámico similar, la Cercha 2 alcanza el punto de cambio de tendencia a temperaturas más bajas, en comparación con la Cercha 1.

El poder conocer las variaciones a distintas temperaturas de ambiente, permite identificar en el futuro si algún cambio en las frecuencias de vibrar del puente fuera de los cambios identificados en este estudio, están asociados a algún tipo de daño, como por ejemplo un terremoto, asentamientos en la estructura, impactos de vehículos, entre otros.

Esta investigación es pionera para análisis dinámicos a distintas temperaturas en puentes de Costa Rica con esta tipología.

## **6.Recomendaciones**

Realizar análisis del comportamiento dinámicos transversal y longitudinal sobre este puente, con el propósito de realizar un análisis más completo y comprender cómo la estructura responde en dichas direcciones.

Realizar mediciones utilizando dispositivos más económicos, como teléfonos móviles, con el fin de analizar cómo varían los resultados en comparación con mediciones realizadas con instrumentos más costosos y profesionales.

Se recomienda realizar monitoreos dinámicos periódicos a esta estructura para darle seguimiento a la salud estructural.

Continuar implementando mecanismos económicos con la utilización de pocos sensores, para que la realización de pruebas dinámicas esté al alcance de las entidades administrativas de la infraestructura de puentes en Costa Rica, tales como: MOPT, CONAVI y Alcaldías.

Realizar un análisis similar al desarrollado, considerando las temperaturas oficiales a reportarse en el IMN, en las estaciones más cercanas al puente del día que se realizó el monitoreo.

## Referencias Bibliográficas

- Agencia de Cooperación Internacional del Japón.(febrero 2007).*Estudio de desarrollo de capacidad en la rehabilitación, planificación, mantenimiento y administración basado en los 29 puentes de la red vial nacional en Costa Rica*
- Bedolla, J., Cortés, C.,Gutiérrez, E.,Vélez, G.,Szwedowicz, D.(junio de 2013).*Identificación de modos cercanos de vibración de una estructura cuasi-axisimétrica: estudiocomplementario*.<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1405774313722376>
- Blanco, P.(10 de julio 2019).*Guanacaste en la encrucijada frente al clima*.<https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/07/10/guanacaste-en-la-encrucijada-frente-al-clima.html>
- Castillo,R. Murillo, J.(2014).*El sistema informático para la administración de estructuras de puentes de Costa Rica (SAEP): ¿Vamos en la dirección correcta?*.LanammeUCR
- Caicedo, J.(enero 2001).*Monitoreo de salud estructural de puentes metálicos*.  
[https://www.researchgate.net/publication/255982815\\_Monitoreo\\_de\\_salud\\_estructural\\_de\\_puentes\\_metalicos](https://www.researchgate.net/publication/255982815_Monitoreo_de_salud_estructural_de_puentes_metalicos)
- Céspedes,V.(2022).*Determinación experimental del efecto de la temperatura en las frecuencias de vibrar en un puente metálico*[Tesis de Licenciatura, Universidad Latina de Costa Rica].
- Electronic Components.(09 de octubre 2020).*¿Cómo funciona y qué hace el acelerómetro*.<https://www.tme.eu/es/news/library-articles/page/22568/Como-funciona-y-que-hace-el-acelerometro/>
- García, Ó.(s.f).*Espectros de respuesta*.  
[https://www.academia.edu/20845872/3\\_ESPECTROS\\_DE\\_RESPUESTA](https://www.academia.edu/20845872/3_ESPECTROS_DE_RESPUESTA)
- Garita, H. (febrero 2018).*Monitoreo de salud estructural del puente sobre el río Virilla, Ruta Nacional 27*.Informe No.LM-PIE-UP-M03-2018.
- GERARDAU CORSA.(01 de octubre 2020).*¿Qué son las estructuras de acero?*.<https://www.gerdaucorsa.com.mx/blog/que-son-las-estructuras-de-acero>

- Gómez, I., Maldodano E., Chio,G.(26 mayo 2010).*Prueba de Vibración Ambiental en puentes*.Universidad Industrial de Santander Colombia.
- Gonzalez, A. Schorr, M. Valdez, B. & Mungaray, A.(16 enero 2020). *Bridges:Structures and Materials, Ancient and Modern*. Universidad Autónoma de Baja California
- Hormazábal, M.(septiembre 2018).*Análisis de modos de vibración en estructuras mediante registro de vibraciones de ruido ambiente*.Universidad de Cádiz
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN).(6 de octubre 2022). *CLIMA DE COSTA RICA Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA*. <https://www.imn.ac.cr/clima-en-costa-rica>
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme UCR).(2011).*Inspección del Puente sobre el rio Abangares ruta nacional N°1*
- Lin, W.,Yoda, T.(2017).*Steel Bridges*. Innovative Bridge Design Handbook (Second Edition)
- Lobo, R.(junio 2022).*EFECTOS DE LA TEMPERATURA EN PUENTES*.<https://www.midasoft.com/latinoamerica/learning/hub/efectos/temperatura/puentes>
- Marín, D.(2022).*Medición de la influencia de temperatura en las frecuencias de vibración del Puente Virilla en la ruta nacional No.3, Costa Rica. [Tesis de Licenciatura, Universidad Latina de Costa Rica]*.
- Martinez, M.(12 mayo 2021).¿Qué es la transformada de Fourier y para qué sirve?.<https://www.nobbot.com/educacion/que-es-la-transformada-de-fourier-y-para-que-sirve/>
- Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica (MINAE).(18 de enero 2022).*NUEVO INVENTARIO NACIONAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PRESENTA POR PRIMERA VEZ UN ANÁLISIS DE LÍNEA TEMPORAL DESDE 1990 A 2017*.<https://minae.go.cr/noticias-minae/comunicados/266-inventario-de-emisiones>
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT).(Enero 2007).*Manual de inspecciones de puentes*.

- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). (Enero, 2007). *Vista General del Puente sobre el rio Abangares*. [Lámina 01 de 22]. Escala 1:250
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). (2007). *Manual de inspección de puentes-inspección visual de deterioro de puente*.
- Mohamad. (2 de noviembre 2016). *Transformada discreta de Fourier (DFT)*.  
<https://support.numxl.com/hc/es/articles/215107846-Transformada-Discreta-de-Fourier-DFT-#:~:text=En%20Matem%C3%A1ticas%2C%20la%20transformada%20discreta,mis%20valores%20de%20la%20muestra.>
- Molero, B. (22 de enero 2016). *TEORIA DE VIBRACIONES*.  
<https://iberisa.wordpress.com/2016/01/22/teoria-de-vibraciones/>
- Montalto, E. (2017). *Prueba de vibración ambiental de puente tipo viga cajón de concreto presforzado*. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/materiales/article/view/25421/30372>
- National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering [NIH]. (abril 2022). *sensores*.  
<https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/sensores#:~:text=Los%20sensores%20son%20herramientas%20que,cantidades%20y%20caracter%C3%ADsticas%20que%20detectan.>
- Navarro, F. (enero 2015). *Mediciones y análisis de vibraciones en el puente de Virilla*. UCR
- Nieto, A. (9 de abril 2021). *Transformada de Fourier*. <https://www.xataka.com/otros/alguien-ha-hecho-video-perfecto-para-todos-que-sufrimos-intentando-entender-transformada-fourier>
- Ortíz, G. (2012). eBridge: *Predicción remota de fallas en puentes*. *InvestigaTEC*, 10 - 11.  
[https://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga\\_tec/article/view/695/616](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga_tec/article/view/695/616)
- Planificación Estratégica Multimodal de Infraestructura y Servicios de Transporte, por MOPT. (2022). *Tránsito promedio diario anual de la estación 504*.  
<https://www.mopt.go.cr/>
- Procore. (13 de octubre del 2022). *¿Qué es un evento extraordinario?*



- Rodríguez, M.F. (2021). Efectividad del uso de un sensor para la obtención de frecuencias de vibrar en los puentes río Virilla ruta N°27 y N°3, Quebrada Salitral ruta N°27, Costa Rica. [Tesis de Licenciatura, Universidad Latina de Costa Rica].
- Rodríguez, M. (2005). *Análisis Modal: Teoría y práctica*. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/3828/direccion/Cap%C3%ADtulos%252F>
- Sancho, V. (2022). *Efecto del cambio de temperatura en el comportamiento dinámico del puentesobre el rio Virilla en la ruta nacional 27 de Costa Rica*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Latina de Costa Rica].
- SENSR. (7 de febrero 2010). User Guide GP2x USB Accelerometer. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://sensr.com/downloads/R001-421-V1.0%20GP2-X%20USB%20Accelerometer%20User%20Guide.pdf
- Smith, G. (09 de marzo 2020). *¿Qué es un Sensor y Qué Hace?*. <https://dewesoft.com/es/daq/que-es-un-sensor#what-do-sensors-do>
- SDI. (2022). Sensores. <https://sdindustrial.com.mx/blog/sensores/>
- Sonzogni, V. (s.f). *Efectos de la temperatura y los asentamientos diferenciales sobre las estructuras*. [https://www.academia.edu/11662568/Efectos\\_de\\_temperatura](https://www.academia.edu/11662568/Efectos_de_temperatura)
- Structuralia. (20 de enero 2016). *Construcción de cimentaciones en puentes*. <https://blog.structuralia.com/construccion-de-cimentaciones-en-puentes>
- Tecnológico de Costa Rica [TEC]. (03 de junio del 2019). *Inventario de puentes en rutas nacionales de Costa Rica*
- Tecnovial. (s.f). *Monitoreo de Puentes*. <https://tecnovial.cl/monitoreo-de-puentes/#:~:text=El%20desaf%C3%ADo%20t%C3%A9cnico%20para%20el,y%20con%20la%20m%C3%ADnima%20infraestructura.>
- Umaña, J. (19 de octubre 2018). *Estado de puentes del país genera preocupación a especialistas*. <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2018/10/19/estado-puentes-pais-genera-preocupacion-especialistas>

- Unidad de Puentes. (enero 2018).*Monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones de los puentes sobre el río Virilla, ruta nacional No.3*.Informe No.LM-PIE-UP-M03-2018
- Unidad de Puentes. (enero 2018).*Monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones del puente sobre la Quebrada Salitral río, ruta nacional No.27*.Informe No.LM-PIE-UP-M02-2018
- Unidad de Puentes. (febrero 2018).*Monitoreo de la condición estructural basado en vibraciones del puente sobre el río Virilla, ruta nacional No.27*.Informe No.LM-PIE-UP-M01-2018
- Unidad de Puentes.(04 de noviembre 2011).*INSPECCION DEL PUENTE SOBRE EL RIO ABANGARES RUTA NACIONAL No.1(p.8)*.Informe No.LM-PI-UP-PN05-2011
- Zamora, S.(2010).Diagnóstico del deterioro en puentes en la zona 6-1, San Carlos Este.
- Zigurat Global Institute of Technology.(30 julio 2019).*Inspección y Evaluación Periódica de Estructuras y Puentes de Carreteras*.<https://www.e-zigurat.com/blog/es/inspeccion-evaluacion-periodica-estructuras-puentes-carreteras>

## **6.Glosario**

**Acelerómetro:** Es un dispositivo que proporciona la capacidad de medir y analizar la aceleración lineal y angular (Electronic Components, 2020).

**ADDA:** Programa desarrollado por el profesor Luis Alejandro Carvajal que permite obtener los datos en el dominio de la frecuencia.

**AISC (American Institute of Steel Construction):** Instituto Americano del Acero.

**Cercha metálica:** Es un elemento estructural compuesto por barras de acero que se conectan entre sí formando estructuras triangulares, están sometidas a fuerzas de tracción y compresión.

**CH1A:** Cercha 1, punto de medición A

**CH1B:** Cercha 1, punto de medición B

**CH2A:** Cercha 2, punto de medición B

**CH2B:** Cercha 2, punto de medición B

**CONAVI:** Consejo Nacional de Vialidad

**Deterioro:** Empeoramiento del estado o calidad original de una estructura.

**Epoxi:** Es un producto de alta calidad se emplea para proporcionar protección, está compuesto en gran medida por un tipo de polímero denominado resina epoxi o poliepóxido.

**Extraordinario:** Es cualquier variación que afecta el alcance original de lo que se tenía planeado, cualquier evento que no se había tomado en cuenta o la causa un cambio en el programa del proyecto (Procore, 2022).

**Frecuencia:** Número de ciclos o repeticiones de un hecho o suceso.

**IMN:** Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica

**Infraestructura vial:** Conformada por un conjunto de estructuras, redes y servicios que permiten el normal funcionamiento del transporte, recolección de desechos, alcantarillado e iluminación.

JICA: Japan International Cooperation Agency (Agencia de Cooperación Internacional de Japón)

MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica.

Monitor: Es un aparato que ayuda a controlar y supervisar por medio de imágenes los datos que detectan los sensores.

MOPT: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.

Puente: Es una estructura que permite salvar un accidente geográfico o cualquier obstáculo físico como un río, línea férrea entre otros que sirve para conectar diferentes lugares a los que de otra manera no se podría acceder (Tecnológico de Costa Rica[TEC], 2019).

SAEP: Sistema informático para la administración de estructuras de puentes de Costa Rica.

Sensor: Los sensores son dispositivos que detectan y responden a algún tipo de información del entorno físico (National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering [NIH], 2022).

Temperatura: Es una magnitud que indica la energía interna de un cuerpo, objeto o medio ambiente.

UCR: Universidad de Costa Rica

Vibración: Es la oscilación de la masa alrededor de su punto de equilibrio. La naturaleza de la oscilación está determinada no sólo por la masa sino también por la rigidez y el amortiguamiento propio de la estructura (Molero, 2016).

6.Anexos

Anexo 1. Temperatura mínima diaria (°C)

| Temp.Minima diaria (°C) |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| año                     | mes | D1   | D2   | D3   | D4   | D5   | D6   | D7   | D8   | D9   | D10  | D11  | D12  | D13  | D14  | D15  | D16  | D17  | D18  | D19  | D20  | D21  | D22  | D23  | D24  | D25  | D26  | D27  | D28  | D29  | D30  | D31  |      |
| 2012                    | 1   | 25.6 | 25.8 | 24.9 | 22.5 | 21.3 | 22.4 | 23.4 | 23.9 | 19.2 | 20.3 | 16.6 | 18.9 | 19.6 | 25.2 | 24.8 | 23.3 | 25.1 | 24.6 | 24   | 24.4 | 17.4 | 18   | 19.9 | 22.8 | 19.5 | 18.3 | 21.3 | 24.1 | 24.5 | 24.9 | 24.5 |      |
| 2012                    | 2   | 24.3 | 24.9 | 24.4 | 24.9 | 22.7 | 23.5 | 25.6 | 24.5 | 25.6 | 24.7 | 24.8 | 25.5 | 25.1 | 24.8 | 19.8 | 23.5 | 24.1 | 17.4 | 19.1 | 23.4 | 24   | 24.6 | 19.8 | 22.5 | 25.1 | 25.1 | 25.3 | 23.4 | 24.8 |      |      |      |
| 2012                    | 3   | 25.5 | 24.8 | 21.6 | 23.5 | 27.2 | 25.8 | 25.4 | 24.9 | 25.5 | 26.2 | 25.5 | 25.8 | 25.4 | 26.5 | 25.9 | 25.9 | 25.7 | 25.9 | 24.8 | 18.6 | 22.5 | 23.4 | 22.8 | 24.9 | 22.9 | 18.5 | 21.4 | 25.9 | 25.7 | 24.4 | 26.3 |      |
| 2012                    | 4   | 25.4 | 24.5 | 23.6 | 24   | 24.9 | 23.8 | 22.4 | 25.6 | 25.2 | 22.9 | 25.4 | 21.3 | 21.5 | 24.3 | 25.9 | 22.3 | 24.1 | 23.3 | 22.8 | 23.1 | 23.2 | 23   | 25   | 24.2 | 25.2 | 25.6 | 25.9 | 22.7 | 22.7 | 24.5 |      |      |
| 2012                    | 5   | 24.7 | 24.1 | 22.7 | 23.3 | 24.6 | 22.8 | 23.3 | 22.7 | 23.3 | 22.9 | 23.1 | 23.2 | 24.8 | 24.7 | 23.3 | 23.5 | 24   | 23.7 | 23.3 | 23.2 | 23.6 | 24.5 | 23.4 | 23.8 | 22.4 | 22.7 | 23.1 | 24.3 | 23.2 | 24   | 24.1 |      |
| 2012                    | 6   | 23.8 | 23   | 23.9 | 23.5 | 22.9 | 24.2 | 23.8 | 24.3 | 23.9 | 22.5 | 24.3 | 22.9 | 22.3 | 22.2 | 24   | 23.2 | 23.2 | 22.2 | 22.5 | 24.5 | 24.1 | 22.2 | 22.2 | 22.3 | 23.7 | 22.6 | 23.3 | 22.6 | 22.2 | 21.7 |      |      |
| 2012                    | 7   | 22.2 | 22.6 | 26   | 23.8 | 22.3 | 22.1 | 24   | 22.3 | 23.2 | 23.7 | 22.7 | 23.2 | 23.7 | 23.6 | 24.8 | 22.1 | 26.2 | 25.4 | 23.2 | 24.7 | 23.1 | 23.6 | 25.2 | 24.6 | 24.8 | 22.7 | 27.1 | 26.8 | 26.3 | 23.7 | 23   |      |
| 2012                    | 8   | 21.9 | 24.1 | 22.9 | 22.5 | 23.8 | 22   | 23.1 | 23.2 | 23.1 | 23.4 | 23   | 22.9 | 23.6 | 22.3 | 22.6 | 22.4 | 24   | 22.6 | 22.2 | 22.3 | 22.3 | 22.9 | 22.7 | 22.5 | 23   | 22.6 | 23.2 | 23.6 | 22.7 | 22.1 | 22.5 |      |
| 2012                    | 9   | 22.3 | 23.7 | 23.1 | 23.4 | 22.5 | 22.9 | 22.7 | 23.1 | 22.5 | 22.1 | 23   | 25.2 | 22.9 | 23.8 | 22.7 | 23.5 | 23.6 | 22.5 | 22.4 | 22.5 | 23.3 | 22.4 | 22.5 | 22.9 | 21   | 22.5 | 22.2 | 22.2 | 22.2 | 22.3 |      |      |
| 2012                    | 10  | 23.5 | 22.6 | 23   | 22.2 | 21.6 | 20.7 | 21.7 | 23.5 | 23.2 | 22.9 | 22.6 | 21.6 | 22.2 | 22.1 | 23.5 | 22.5 | 22.4 | 23.4 | 22.8 | 22.5 | 23.6 | 23.7 | 23.4 | 23.7 | 22.9 | 22.6 | 23.1 | 21.7 | 24.2 | 20.4 | 24.9 |      |
| 2012                    | 11  | 22.3 | 24.9 | 21.9 | 22.8 | 22.3 | 23.8 | 24.1 | 25   | 24.2 | 23   | 25   | 22.8 | 23.7 | 25   | 24.8 | 23.9 | 21.8 | 25.1 | 24.1 | 24.3 | 23.5 | 24.6 | 24.6 | 22.6 | 22.8 | 24   | 24.9 | 23.9 | 23.9 | 23.1 |      |      |
| 2012                    | 12  | 23   | 24.8 | 25.2 | 24.3 | 24.6 | 24   | 23.9 | 24.7 | 19   | 21.9 | 22.5 | 24.5 | 25.3 | 24.8 | 23.5 | 23.6 | 21.4 | 21.9 | 21.7 | 25.1 | 25.4 | 24.9 | 25   | 22.8 | 24.1 | 21.6 | 23.4 | 22.1 | 23.5 | 25.7 | 24.5 |      |
| 2013                    | 1   | 20.9 | 22.5 | 21.8 | 25.6 | 25.7 | 20   | 23.9 | 20.5 | 20.2 | 26.1 | 26.4 | 26.4 | 18   | 21.1 | 22.6 | 22.4 | 25   | 24.5 | 24.9 | 24.8 | 25.1 | 25.4 | 24.9 | 25.4 | 24.5 | 25.4 | 25.6 | 25.5 | 25.8 | 21.1 | 23.5 |      |
| 2013                    | 2   | 25.7 | 24.9 | 24.7 | 25.4 | 20.6 | 21.7 | 23.8 | 19.6 | 24.8 | 25   | 16   | 17   | 19.7 | 22.3 | 17.8 | 19   | 25.6 | 22.8 | 24.3 | 25.1 | 26.1 | 21.9 | 20.7 | 25.5 | 24.8 | 22.6 | 24.7 | 23.1 |      |      |      |      |
| 2013                    | 3   | 25.8 | 24.9 | 24.4 | 21   | 22.1 | 24.8 | 24   | 23.4 | 24.1 | 24.9 | 24.6 | 26.4 | 26.1 | 25.6 | 25.4 | 24.8 | 24.5 | 21.5 | 21.5 | 21   | 23.2 | 21.7 | 21.9 | 23.8 | 23.8 | 25.8 | 26.7 | 25   | 24.3 | 25.1 | 26.4 |      |
| 2013                    | 4   | 27   | 26.7 | 26.3 | 24.1 | 24.3 | 26.2 | 25.4 | 21.1 | 25.4 | 24.7 | 25.5 | 24.9 | 22   | 25.5 | 23.8 | 26.8 | 27.2 | 25.9 | 23.7 | 22.8 | 24   | 21.9 | 21   | 20.1 | 24.7 | 26.8 | 26.1 | 21.9 | 22.4 | 22.6 |      |      |
| 2013                    | 5   | 23.1 | 23.5 | 24.8 | 22.9 | 20.7 | 22.3 | 23.7 | 19.6 | 21.2 | 23.6 | 23.6 | 24.5 | 26.5 | 26.2 | 26.2 | 21.2 | 21.5 | 23.4 | 23.5 | 24.3 | 24.3 | 23.2 | 22.8 | 23.8 | 23.5 | 23.9 | 23.7 | 23.8 | 22.9 | 23.5 | 22.6 |      |
| 2013                    | 6   | 22.6 | 23.8 | 24.3 | 24.7 | 23.4 | 22   | 22.6 | 23.4 | 23.1 | 23.5 | 22.4 | 23.6 | 22.4 | 23.2 | 23.6 | 24.2 | 23.9 | 24.1 | 23.4 | 23   | 23.9 | 23.7 | 24.6 | 21.5 | 23.4 | 22.8 | 22.6 | 22.5 |      |      |      |      |
| 2013                    | 7   | 23.3 | 22.8 | 23.2 | 23.1 | 22.7 | 23   | 24   | 23.4 | 24   | 24.7 | 21.7 | 22.7 | 23.3 | 22.4 | 22.8 | 25.1 | 23.5 | 22.7 | 23.7 | 23   | 22.7 | 22.4 | 22.6 | 23.9 | 24.9 | 24.7 | 24.3 | 23.9 | 22.1 | 24.9 | 23   |      |
| 2013                    | 8   | 22.9 | 21.9 | 23.1 | 23.3 | 22.2 | 24   | 26.3 | 23.1 | 22   | 24.1 | 21.1 | 22.8 | 23.4 | 23.4 | 23.8 | 24.2 | 22   | 23   | 22.4 | 22.2 | 23.5 | 23.4 | 22.4 | 22.5 | 22.1 | 23.4 | 22.6 | 22.6 | 22.9 | 23.6 |      |      |
| 2013                    | 9   | 22   | 22.9 | 22.3 | 22.2 | 22.3 | 22.9 | 23.4 | 22.2 | 24.2 | 23.4 | 23.1 | 22.6 | 22.9 | 22.5 | 23.6 | 24.2 | 23.4 | 22.4 | 22.9 | 23.4 | 23.8 | 23.4 | 22.4 | 23.3 | 23.6 | 22.8 | 22.7 | 22   | 22.3 | 22.7 |      |      |
| 2013                    | 10  | 22.7 | 22.2 | 22.3 | 22.9 | 23.5 | 23.4 | 22.7 | 23.4 | 23   | 23   | 23.6 | 23   | 22.9 | 21.8 | 23   | 23.2 | 22   | 22.8 | 22.6 | 22.1 | 23   | 23   | 22.8 | 23.2 | 23.5 | 22.9 | 22.6 | 22.9 | 22.7 | 23.6 | 22.6 |      |
| 2013                    | 11  | 21.9 | 21.8 | 20.5 | 20.4 | 22.1 | 22.8 | 23   | 22.6 | 23.4 | 22.7 | 22.2 | 24.3 | 23.1 | 22.4 | 23.6 | 23.6 | 23.5 | 23.1 | 21.5 | 21.1 | 22.5 | 21.9 | 21.8 | 22.3 | 21.9 | 22.3 | 21.5 | 23.6 | 23.2 | 22.8 |      |      |
| 2013                    | 12  | 23.2 | 20.9 | 21.8 | 21.5 | 19.4 | 23.2 | 21.6 | 22.1 | 20.1 | 19.5 | 21.6 | 24.7 | 26.3 | 22   | 21.6 | 22.4 | 23.5 | 25.1 | 24.8 | 19.1 | 19.6 | 19.3 | 20.8 | 21.8 | 22.8 | 23.5 | 20.8 | 18.6 | 20.2 | 22.7 | 25.8 |      |
| 2014                    | 1   | 23.6 | 25.1 | 25.3 | 22.3 | 24.5 | 26.2 | 23.9 | 23.8 | 21.5 | 23.9 | 19.7 | 22.6 | 25.3 | 23.2 | 21   | 25.5 | 23.1 | 23.5 | 23.7 | 24.5 | 25.2 | 25.5 | 24.1 | 24.9 | 23.9 | 24.7 | 24.7 | 18.8 | 18.4 | 20.5 | 24.8 |      |
| 2014                    | 2   | 14   | 17.4 | 20   | 20.7 | 24.8 | 20.2 | 22.4 | 24.5 | 24.8 | 20.2 | 22.4 | 25.5 | 24.8 | 21.8 | 25.7 | 25.8 | 25.3 | 24.9 | 24.6 | 24   | 24.5 | 21.4 | 23.5 | 24.3 | 24.7 | 24.3 | 19.9 | 21.1 |      |      |      |      |
| 2014                    | 3   | 23.5 | 24.7 | 24.8 | 21.8 | 21.6 | 22.1 | 21.3 | 19.7 | 20   | 25.4 | 20.2 | 21.1 | 20.1 | 24.7 | 24.9 | 20.2 | 21.4 | 23.1 | 25.7 | 25.9 | 26.2 | 25.2 | 25.8 | 26.7 | 25.3 | 25.2 | 26.9 | 25.7 | 25.5 | 26   | 25   |      |
| 2014                    | 4   | 25.2 | 21.7 | 25.7 | 22.2 | 22.4 | 24.5 | 22.2 | 24.5 | 26.9 | 24   | 25   | 26.2 | 25.6 | 23.3 | 24.8 | 25.9 | 26.8 | 25.8 | 26.1 | 26.4 | 26.7 | 26.9 | 25.3 | 26   | 26.4 | 25.3 | 23.5 | 24   | 24.9 | 22.7 |      |      |
| 2014                    | 5   | 24.2 | 24.7 | 22.4 | 24   | 25.5 | 23.5 | 23.8 | 23.5 | 23   | 24.5 | 23.1 | 23.3 | 22.9 | 23   | 24.5 | 26.8 | 26.2 | 25.4 | 26.5 | 24.8 | 23.8 | 22.8 | 24.2 | 24.8 | 22.9 | 24.1 | 26.1 | 24.8 | 24   | 23.4 | 23.3 |      |
| 2014                    | 6   | 23.5 | 24.9 | 23.3 | 24.3 | 24.3 | 24.5 | 23.9 | 24.1 | 23.8 | 24.8 | 24.8 | 26.3 | 24.5 | 23.8 | 24.6 | 24.4 | 23.3 | 22.9 | 25.1 | 27.1 | 26   | 25.3 | 23.3 | 23   | 22.7 | 23.2 | 22.8 | 23.3 | 25.1 | 25.8 |      |      |
| 2014                    | 7   | 26.1 | 22.2 | 23.3 | 26   | 25.3 | 24.7 | 26.5 | 22.4 | 25.9 | 26.6 | 26.9 | 26.9 | 26.5 | 26.5 | 25.1 | 24.5 | 24.6 | 23.7 | 25.9 | 26   | 24.9 | 26.7 | 26.8 | 26.9 | 27.5 | 24.3 | 23.2 | 26   | 23.8 | 27   | 26.9 |      |
| 2014                    | 8   | 25.8 | 26.2 | 23.8 | 23.2 | 23.9 | 24.8 | 22.7 | 22.9 | 20.3 | 22.1 | 22.4 | 23.2 | 22.9 | 24.2 | 24.7 | 23.2 | 22.8 | 25.4 | 23.7 | 23.4 | 22   | 23.1 | 23.4 | 22   | 23.2 | 23.2 | 23.2 | 23.3 | 23.5 | 22.8 | 22.6 |      |
| 2014                    | 9   | 24.8 | 24.7 | 22.8 | 21.9 | 23.8 | 22.6 | 22.9 | 23.1 | 22.4 | 22.1 | 22.7 | 22.9 | 22.7 | 23.6 | 24.1 | 23.5 | 23.3 | 22.5 | 22.5 | 22.1 | 22.6 | 22.6 | 23   | 22.6 | 23   | 22.6 | 22   | 23.1 | 23.2 |      |      |      |
| 2014                    | 10  | 23.3 | 23.4 | 21.6 | 22   | 22.7 | 23.5 | 22.2 | 23.1 | 23.2 | 22.7 | 23.6 | 23.2 | 22.7 | 23.4 | 23.2 | 23.1 | 23   | 22.6 | 23.4 | 23.1 | 23.2 | 23.3 | 23.2 | 23.5 | 22   | 23.7 | 22.5 | 22.3 | 23.4 | 23.2 | 22.7 |      |
| 2014                    | 11  | 22.9 | 23.4 | 24.2 | 23.9 | 23.1 | 23   | 23.2 | 23.3 | 22.6 | 21.6 | 20.9 | 21.6 | 21.6 | 24.7 | 24.5 | 22   | 22.7 | 22.3 | 23.1 | 22.2 | 22.3 | 20.9 | 20.9 | 23.3 | 23.4 | 23.6 | 23.7 | 24   | 24.7 | 24.9 |      |      |
| 2014                    | 12  | 26.4 | 25.5 | 25   | 24.8 | 25   | 24.9 | 24.1 | 24.7 | 24.3 | 24.3 | 24.3 | 23.9 | 24   | 22.1 | 23.6 | 24.4 | 23.7 | 23.5 | 21.1 | 19.3 | 22.8 | 20.1 | 20   | 22.4 | 23.1 | 25.3 | 25.4 | 23   | 20.5 | 25.3 | 24.5 |      |
| 2015                    | 1   | 26.6 | 26.3 | 26.3 | 26.3 | 26.3 | 26.4 | 25.3 | 25   | 24.9 | 25.6 | 26.1 | 26.9 | 25.9 | 24.8 | 20.3 | 22.3 | 25.5 | 25   | 24.8 | 22.8 | 19.7 | 24.2 | 19.7 | 23.9 | 24   | 24.2 | 24.5 | 23.5 | 23   | 23.3 | 23.9 |      |
| 2015                    | 2   | 24.7 | 20.1 | 23.4 | 25.4 | 25.6 | 26.3 | 25.4 | 24.9 | 22   | 20.2 | 19   | 22.5 | 24.8 | 24   | 23.7 | 23.6 | 19.1 | 18.8 | 22.4 | 24.6 | 22.6 | 23.9 | 26.1 | 24.8 | 17.6 | 20.2 | 23.4 | 25.6 |      |      |      |      |
| 2015                    | 3   | 25.8 | 25.8 | 25   | 25.6 | 25.2 | 26.1 | 25.3 | 25.7 | 25.1 | 25.4 | 26.5 | 27.2 | 26.2 | 25.7 | 25.5 | 26.5 | 25.3 | 25.3 | 22.2 | 21.4 | 21.8 | 19.4 | 21.7 | 19   | 21.9 | 21.4 | 19   | 24.4 | 25.8 | 26.1 | 25.5 |      |
| 2015                    | 4   | 25.3 | 24.1 | 25.7 | 26   | 26.1 | 26.1 | 25.7 | 25.8 | 25.9 | 26.5 | 26.4 | 26.4 | 26.7 | 27.1 | 27   | 26.9 | 26.6 | 26   | 26.3 | 25.9 | 24.4 | 27.1 | 26.7 | 25.7 | 26   | 24.3 | 24.4 | 26.4 | 26.4 | 25.5 |      |      |
| 2015                    | 5   | 23.4 | 23.2 | 26.2 | 22.9 | 22.1 | 24.3 | 24.3 | 24.3 | 27.2 | 27.3 | 25.9 | 27.4 | 27.9 | 27.8 | 27.3 | 27.2 | 25.2 | 23.6 | 25.2 | 26.6 | 26.4 | 26.5 | 25.2 | 27.2 | 24.5 | 26.4 | 23.8 | 24.2 | 20   | 20.9 | 22.8 | 23.2 |
| 2015                    |     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

|      |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2017 | 11 | 21.7 | 23.5 | 24   | 23.2 | 22   | 21.7 | 22.3 | 23.2 | 22.5 | 21.3 | 21.6 | 24.1 | 23.6 | 23.9 | 23.6 | 22.8 | 22.6 | 19.1 | 19.2 | 21.7 | 22.5 | 23   | 23.3 | 24.6 | 23.8 | 23.8 | 23.8 | 24.3 | 23.1 | 25.1 |      |
| 2017 | 12 | 23.2 | 25.3 | 24.5 | 22.3 | 25.5 | 23.7 | 21.7 | 22.6 | 22.2 | 23.4 | 22.6 | 23.4 | 23.2 | 23.8 | 23.4 | 20.1 | 21.2 | 20.4 | 21.3 | 23.7 | 25   | 19.5 | 22   | 25.1 | 24.2 | 25.5 | 24.2 | 24.8 | 24.6 | 24.8 | 24.4 |
| 2018 | 1  | 22.5 | 25   | 25   | 24.6 | 23.9 | 23.4 | 23.2 | 24.2 | 24.5 | 23.1 | 20.7 | 23   | 23.9 | 23.2 | 22.7 | 22.2 | 22.6 | 24   | 23.2 | 24.9 | 25.1 | 22.4 | 21.9 | 24.8 | 25.9 | 25.8 | 22.6 | 24.5 | 25.9 | 26   | 25.7 |
| 2018 | 2  | 25.9 | 25.5 | 25.3 | 20.8 | 24.2 | 25.5 | 23.9 | 25.6 | 25.7 | 25.7 | 25.1 | 25.8 | 27   | 25.7 | 25.1 | 25   | 24.9 | 25   | 24.6 | 24.8 | 25.5 | 25.6 | 25.4 | 24.9 | 24.7 | 22.9 | 24.7 | 24.3 |      |      |      |
| 2018 | 3  | 17.6 | 20.9 | 24.6 | 24.6 | 24.7 | 24.2 | 23.9 | 24.3 | 25.8 | 26.3 | 26.2 | 25.9 | 25   | 26.6 | 26   | 25.8 | 25.1 | 25   | 22.4 | 24.1 | 24.7 | 25.8 | 25.3 | 25.9 | 25.5 | 25.7 | 25.8 | 25.4 | 25.3 | 25.9 | 25.6 |
| 2018 | 4  | 21   | 22.7 | 22.6 | 22.4 | 22.6 | 22.6 | 23.3 | 22.2 | 22.3 | 21.6 | 25.5 | 20.5 | 24.2 | 22.2 | 23.4 | 25.2 | 26.1 | 25.5 | 25.8 | 26.7 | 27.1 | 26.4 | 26.3 | 27.1 | 27.3 | 26.4 | 23.1 | 26   |      |      |      |
| 2018 | 5  | 25.9 | 25.7 | 25.9 | 23.5 | 23   | 22.8 | 22.8 | 24   | 22.2 | 23.2 | 22.9 | 24.6 | 26.1 | 23.4 | 22.8 | 23.1 | 24.1 | 22.9 | 23.8 | 23.8 | 23.5 | 23.4 | 23.5 | 23.7 | 23.9 | 23.8 | 23   | 23.6 | 24.6 | 23.9 | 23.1 |
| 2018 | 6  | 24.7 | 26   | 22.7 | 24.1 | 24.5 | 24.4 | 24.4 | 22.8 | 25.6 | 24.5 | 23.4 | 23.6 | 22.6 | 23   | 23.7 | 23.4 | 23.9 | 25   | 23.9 | 22.7 | 22.2 | 23.1 | 23.9 | 23.9 | 24.7 | 22.8 | 22.7 | 23.1 | 23.4 | 22.8 |      |
| 2018 | 7  | 22.9 | 24.2 | 22.2 | 23.7 | 24.9 | 23.5 | 23.9 | 26.3 | 23.4 | 26.9 | 26.1 | 21.7 | 24.5 | 23.4 | 23.1 | 23.8 | 22.7 | 25.7 | 23.3 | 26.4 | 24.5 | 23.5 | 23.7 | 23.6 | 25.5 | 23.1 | 22.9 | 23.7 | 22.8 | 23   | 23.9 |
| 2018 | 8  | 22   | 23.2 | 22.8 | 23   | 22.9 | 23.2 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 2018 | 9  | 23.4 | 22.9 | 22.1 | 22.6 | 23.4 | 22.2 | 22.1 | 23.6 | 23.2 | 23.1 | 22   | 23   | 22.8 | 23.4 | 23.4 | 23.1 | 22.3 | 24.3 | 23.6 | 23.3 | 23.7 | 23   | 22.4 | 23.3 | 23.4 | 23.5 | 22.2 | 22.3 | 23.2 | 23.2 |      |
| 2018 | 10 | 23.3 | 23.2 | 23.7 | 23.1 | 22.3 | 22.4 | 21.8 | 22.6 | 23.9 | 24.5 | 23.7 | 24.1 | 21.4 | 22.7 | 23   | 23.2 | 22.8 | 22.8 | 22.7 | 23.1 | 23   | 23.4 | 21.5 | 21.9 | 22.7 | 23.4 | 22.3 | 24   | 23.9 | 22.8 | 21.2 |
| 2018 | 11 | 21.4 | 22.4 | 21.8 | 22.5 | 22.1 | 20.9 | 21.8 | 22   | 21.9 | 22.1 | 26   | 24.8 | 22.2 | 23.6 | 23.6 | 25.5 | 25.6 | 26.1 | 26.9 | 24.2 | 25.1 | 22.4 | 24.1 | 22.5 | 21   | 20.6 | 20.3 | 22.5 | 23.6 | 21   |      |
| 2018 | 12 | 22.3 | 21.4 | 22.2 | 21.7 | 21   | 25.2 | 23.6 | 20.7 | 22.5 | 25.6 | 25   | 21.1 | 18.7 | 20.1 | 23.6 | 25.7 | 25.9 | 24.9 | 18   | 20.7 | 21.4 | 21.9 | 22.3 | 25.1 | 25.6 | 25.5 | 20.6 | 19.8 | 23.1 | 26.3 | 25.6 |
| 2019 | 1  | 25.5 | 26.7 | 25.7 | 23.1 | 25   | 25.9 | 25.1 | 24   | 22.8 | 24.5 | 24.7 | 24.3 | 24.5 | 24.5 | 25.3 | 25.2 | 25.5 | 25.2 | 24.3 | 25.7 | 25.3 | 25.9 | 24.2 | 25.6 | 26.4 | 26.2 | 20.8 | 21.8 | 24   | 25.5 | 25.6 |
| 2019 | 2  | 18   | 24.5 | 25.3 | 22.3 | 23.3 | 25.6 | 25.8 | 25.4 | 25.3 | 25.8 | 25.7 | 20.3 | 24.6 | 26   | 25.5 | 20.6 | 22.6 | 23   | 25.9 | 25.3 | 21.4 | 21.6 | 24.7 | 26.5 | 25.6 | 25.4 | 25   | 24.4 |      |      |      |
| 2019 | 3  | 23.8 | 21.7 | 23.9 | 23.9 | 25.6 | 25.6 | 25.9 | 26.1 | 25.3 | 25.9 | 26.8 | 26.6 | 25.7 | 21.5 | 25.4 | 26.1 | 25.9 | 25.7 | 25.7 | 26.2 | 26.2 | 25.7 | 25.8 | 25.3 | 25.5 | 25.8 | 26.1 | 26   | 25.4 | 25.4 | 20.1 |
| 2019 | 4  | 27.6 | 25.2 | 26.2 | 26.5 | 26.1 | 22.2 | 23.8 | 21.5 | 22.6 | 24.8 | 22.8 | 23.9 | 24.2 | 25.6 | 26.9 | 26.8 | 25.6 | 25.7 | 22.7 | 23.8 | 26.3 | 26.8 | 25.8 | 20.8 | 21.7 | 21.9 | 22.3 | 23.3 | 27.6 | 27.7 |      |
| 2019 | 5  | 27.6 | 27.5 | 27.7 | 26.8 | 24.4 | 26.7 | 27   | 27.6 | 24.6 | 23.6 | 23.7 | 24.2 | 23.9 | 24.3 | 26.1 | 23.6 | 24.7 | 24.4 | 23.6 | 24.5 | 23.2 | 23.8 | 24.2 | 24.4 | 23.9 | 23.9 | 23.6 | 23.3 | 23.1 | 23.4 | 23.4 |
| 2019 | 6  | 23.4 | 23.5 | 23.8 | 24.1 | 24.8 | 24.4 | 24.3 | 23   | 23.7 | 23.8 | 24.2 | 22.8 | 23.8 | 23.2 | 24   | 23.9 | 26.6 | 24.1 | 27.8 | 24.6 | 24   | 24.4 | 25.4 | 22.5 | 23.6 | 23   | 25   | 25.2 | 25.4 | 24.4 |      |
| 2019 | 7  | 27.1 | 25.3 | 23.7 | 26.8 | 21.6 | 20.8 | 24.6 | 24.3 | 21.9 | 25.1 | 23.4 | 23.1 | 23.2 | 24.2 | 22.7 | 25.2 | 23.9 | 24.8 | 24.6 | 24.9 | 27.5 | 23.7 | 23.2 | 23.6 | 23.9 | 22.1 | 23.1 | 22.8 | 23.2 | 24.6 | 20.7 |
| 2019 | 8  | 24.7 | 23   | 22.4 | 24.1 | 22.2 | 22.8 | 22.6 | 23.1 | 23.6 | 24.9 | 23.3 | 24.8 | 24.8 | 25   | 21.4 | 22.4 | 22.8 | 23.4 | 23.1 | 22.6 | 23   | 22.4 | 22.4 | 24.3 | 25.1 | 22.2 | 25.4 | 23.9 | 25.5 | 23   | 23   |
| 2019 | 9  | 23.6 | 23.5 | 23.4 | 24.7 | 22.7 | 22.5 | 24.4 | 21.2 | 22   | 22.3 | 23.8 | 24.8 | 22.4 | 23.9 | 24.2 | 22.6 | 24.4 | 22.9 | 22.6 | 22.5 | 23.4 | 23.3 | 23.1 | 23.7 | 23.3 | 23.1 | 23.3 | 23.4 | 23.3 | 22.2 |      |
| 2019 | 10 | 22.8 | 23.3 | 23.1 | 21.9 | 22.6 | 22.5 | 22.8 |      |      |      | 22.8 | 21.6 | 23.4 | 22.6 | 23.1 | 23   | 23.1 | 22.8 | 22.5 | 22.8 | 22.9 | 21.5 | 23   | 23.1 | 23   | 23.4 | 22.2 | 23.1 | 22.9 | 22.8 | 22.4 |
| 2019 | 11 | 22.4 | 22.3 | 23.4 | 22   | 24.7 | 25.3 | 22.5 | 24.7 | 26.2 | 24.7 | 22   | 22.2 | 21.3 | 22.1 | 23.4 | 22.3 | 22.4 | 24.2 | 22.5 | 23.4 | 21   | 21.7 | 21.7 | 21   | 23.4 | 25.7 | 25.9 | 24.7 | 23.7 | 25.1 |      |
| 2019 | 12 | 23.9 | 22.3 | 25.1 | 24.2 | 23.9 | 22.9 | 22   | 24.5 | 25   | 25.4 | 21.9 | 24.9 | 23.5 | 21.3 | 21.2 | 20.1 | 21.3 | 22   | 23.1 | 25.1 | 24.5 | 24.1 | 24.8 | 25.9 | 24.1 | 24.7 | 25.6 | 24   | 26.1 | 22.1 | 21.9 |
| 2020 | 1  | 22.3 | 22.2 | 20.6 | 23.1 | 26.1 | 24.8 | 25.6 | 24.9 | 24.6 | 25.7 | 23.9 | 23.9 | 26.7 | 27   | 26.2 | 25.9 | 26.6 | 27.4 | 27.1 | 26.2 | 24.3 | 24.8 | 24.2 | 22.3 | 25.2 | 24.9 | 20.3 | 21.5 | 24.3 | 21.5 | 20.2 |
| 2020 | 2  | 21.5 | 23   | 26.4 | 21.4 | 21.5 | 20.6 | 20.7 | 23.1 | 25.6 | 16.5 | 23.6 |      |      |      | 26.1 | 26.2 | 26.2 | 25.7 | 26.5 | 26.4 | 27.2 | 27   | 25.8 | 25.7 | 25.1 | 24.7 | 20.9 | 21.6 | 23.4 | 25.7 | 26   |
| 2020 | 3  | 25.7 | 25.8 | 25.8 | 23   | 26.3 | 26.3 | 26.1 | 26.4 | 26.8 | 26.2 | 26.2 | 25.9 | 25.8 | 25.9 | 26   | 25.5 | 25.5 | 26   | 25.6 | 25.7 | 25.7 | 25.4 | 25.8 | 25.9 | 26.2 | 25.7 | 25.5 | 21.1 | 24.5 | 24.6 | 26.1 |
| 2020 | 4  | 23.7 | 22.3 | 24.8 | 25.8 | 23.2 | 26.4 | 28.2 | 27.9 | 27.1 | 26.5 | 27.4 | 23.7 | 23.9 | 24.7 | 25   | 23.7 | 26.1 | 25.6 | 21.8 | 23.4 | 25.1 | 23.6 | 21.1 | 24.3 | 23.4 | 25.2 | 26.8 | 27   | 25   | 24.1 |      |
| 2020 | 5  | 25.9 | 27.3 | 26.9 | 26.7 | 24.8 | 26.6 | 27.3 | 28   | 24.7 | 25.3 | 24.9 | 25.7 | 25.6 | 24.2 | 23.2 | 23.9 | 23.5 | 24.5 | 24.5 | 23.7 | 24.1 | 24.2 | 25.1 | 24.5 | 25.3 | 24.8 | 24.5 | 24.1 | 23.5 | 24.1 | 23.5 |
| 2020 | 6  | 24.4 | 22.9 | 24.6 | 23.7 | 24   | 23.9 | 25.1 | 22.8 | 24.7 | 22.7 | 23.7 | 23.2 | 23.2 | 23.7 | 24   | 25   | 23   | 23.9 | 24.5 | 24.3 | 23.5 | 24   | 25.3 | 23.5 | 24   | 25.3 | 24.2 | 23.2 | 24.7 | 23.5 |      |
| 2020 | 7  | 23   | 21.3 | 23.9 | 23.6 | 22.5 | 23.9 | 23.6 | 23.7 | 22.2 | 23.1 | 23.4 | 24.3 | 23.2 | 24   | 22.9 | 22.3 | 25.6 | 22.7 | 26.2 | 23.6 | 23.6 | 22.8 | 22.3 | 22.6 | 23.3 | 22.9 | 23.5 | 22.6 | 22.5 | 23.2 | 22.7 |
| 2020 | 8  | 23.1 | 24.8 | 24   | 23.2 | 23.1 | 22   | 23.7 | 23.1 | 24.3 | 23   | 23.5 | 21.5 | 24.3 | 23.9 | 23.1 | 23.7 | 23.7 | 22.1 | 23.4 | 22.4 | 23.4 | 21.8 | 22.9 | 23.7 | 23.9 | 22.9 | 22.9 | 23.5 | 22.7 | 23.1 | 21.5 |
| 2020 | 9  | 22.8 | 22.1 | 23.7 | 23.4 | 23.6 | 22.4 | 23.5 | 22.5 | 23.5 | 23.4 | 23.3 | 24   | 23.1 | 23.5 | 22.9 | 22.6 | 23.4 | 22.9 | 22.6 | 23.7 | 22.8 | 22.9 | 23.1 | 22.8 | 23.4 | 23.8 | 22.8 | 22.2 | 22.7 | 23.3 |      |
| 2020 | 10 | 22.7 | 22.6 | 22.6 | 23.2 | 23.4 | 23.2 | 23.4 | 22.9 | 22.5 | 22.5 | 22.2 | 24   | 23.2 | 22.6 | 22.5 | 22.6 | 23.4 | 23.7 | 22.8 | 23.7 | 23.7 | 22.3 | 23.2 | 22.5 | 23.5 | 23.6 | 22.8 | 23.7 | 23.7 | 23.2 | 22.9 |
| 2020 | 11 | 23.7 | 23.4 | 23.6 | 23.2 | 22.9 | 23.5 | 21.9 | 23.1 | 23.7 | 23.8 | 23.5 | 22.6 | 23.5 | 22.8 | 21.9 | 22.9 | 23.7 | 23.3 | 23.2 | 22.5 | 22.6 | 22   | 21.9 | 23.7 | 24.2 | 23   | 22.7 | 22.7 | 21.8 | 23.2 |      |
| 2020 | 12 | 25.4 | 21.8 | 22.9 | 22.9 | 23.4 | 20.4 | 24.2 | 23.7 | 23.6 | 22.3 | 23.1 | 22.8 | 18.5 | 19.5 | 18.7 | 20.4 | 21.8 | 24.7 | 24.1 | 22.2 | 24.7 | 21.2 | 23.8 | 24.5 | 23   | 24.7 | 23.4 | 23.9 | 23.2 | 20.6 | 22.4 |
| 2021 | 1  | 21.8 | 23.8 | 20.6 | 21.3 | 24.5 | 19.2 | 19.8 | 20.9 | 23   | 24.5 | 21.4 | 23.7 | 25.6 | 24.9 | 25.1 | 18.6 | 20   | 23.6 | 26.4 | 26.5 | 25.1 | 25.5 | 21.4 | 22.8 | 22.3 | 22.9 | 26.3 | 25.6 | 25.4 | 26.1 | 24.9 |
| 2021 | 2  | 25.7 | 26   | 22.9 | 23.2 | 24.1 | 22.8 | 24.8 | 25.6 | 25.2 | 25.2 | 20   | 19.8 | 21.1 | 22.4 | 18.9 | 21.1 | 21.4 | 20.5 | 20.7 | 24.7 | 25   | 25.1 | 25.1 | 25.2 | 26   | 25.4 | 26   | 25.4 |      |      |      |
| 2021 | 3  | 24.7 | 25.6 | 24.6 | 23.6 | 24.2 | 24.4 | 23.8 | 25   | 25.7 | 25.7 | 25.6 | 25.6 | 25.4 | 25.3 | 25.1 | 18.6 | 20   | 23.6 | 26.4 | 26.5 | 25.1 | 25.5 | 21.4 | 22.8 | 22.3 | 22.9 | 26.3 | 25.6 | 25.4 | 26.1 | 27   |
| 2021 | 4  | 27.2 | 25.8 | 25.8 | 25.4 | 25.5 | 26   | 26.3 | 23.4 | 22.2 | 24.1 | 22.3 | 23.4 | 24.5 | 26.8 | 24.8 | 25   | 23.7 | 23.6 | 23.1 | 23.5 | 23.9 | 23.9 | 25.6 | 21.5 | 24.9 | 24.5 | 25.2 | 21.4 | 23.1 | 21.9 |      |
| 2021 | 5  | 22.9 | 23.7 | 21.2 | 23.7 | 22.7 | 22.2 | 22.4 | 22.1 | 21.4 | 24.1 | 24.1 | 24.5 | 26.5 | 25.8 | 26.9 | 26.1 | 21.6 | 21.9 | 22   | 23.4 | 24   | 25   | 25.4 | 24.6 | 24.6 | 27.1 | 24.1 | 26   | 23   |      |      |

|    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 8  | 2013 | 26.0 | 26.2 | 26.2 | 26.5 | 27.6 | 28.2 | 28.8 | 27.2 | 27.0 | 27.1 | 26.4 | 25.6 | 26.4 | 27.0 | 26.9 | 26.3 | 25.3 | 26.8 | 26.7 | 25.6 | 27.6 | 25.9 | 26.0 | 25.5 | 25.7 | 26.6 | 25.4 | 26.2 | 27.3 | 27.0 | 25.4 |      |
| 9  | 2013 | 26.0 | 26.0 | 25.9 | 25.9 | 26.1 | 25.5 | 25.8 | 26.5 | 26.5 | 25.7 | 25.1 | 25.5 | 26.2 | 26.0 | 27.3 | 26.7 | 25.7 | 25.6 | 25.5 | 27.1 | 27.2 | 24.2 | 26.6 | 28.2 | 27.3 | 25.7 | 26.7 | 26.5 | 25.4 | 25.4 |      |      |
| 10 | 2013 | 25.3 | 25.8 | 25.7 | 25.5 | 27.4 | 26.8 | 26.3 | 26.6 | 27.4 | 26.4 | 26.9 | 27.1 | 26.9 | 26.7 | 25.7 | 24.6 | 25.4 | 25.9 | 25.6 | 26.1 | 26.1 | 25.5 | 26.0 | 26.2 | 26.6 | 25.1 | 25.9 | 26.2 | 26.9 | 26.9 | 26.8 |      |
| 11 | 2013 | 26.3 | 25.5 | 24.4 | 24.2 | 26.0 | 26.6 | 26.7 | 25.6 | 26.2 | 26.6 | 26.2 | 26.7 | 27.2 | 26.5 | 26.2 | 27.5 | 27.7 | 27.5 | 27.0 | 26.3 | 26.5 | 25.8 | 26.0 | 26.4 | 26.6 | 26.3 | 25.7 | 26.0 | 26.5 |      |      |      |
| 12 | 2013 | 26.1 | 26.6 | 25.2 | 26.5 | 26.5 | 28.0 | 27.2 | 26.6 | 25.6 | 26.7 | 27.6 | 27.9 | 28.3 | 26.5 | 25.9 | 26.7 | 27.5 | 26.9 | 27.4 | 26.3 | 26.8 | 26.1 | 27.9 | 27.7 | 27.6 | 27.5 | 27.5 | 27.7 | 26.8 | 28.8 | 28.6 |      |
| 1  | 2014 | 28.4 | 27.9 | 28.3 | 28.6 | 28.7 | 28.6 | 26.2 | 27.7 | 27.8 | 28.1 | 27.2 | 28.0 | 28.3 | 27.3 | 27.9 | 26.8 | 28.4 | 26.8 | 26.8 | 26.8 | 27.8 | 26.9 | 27.4 | 27.5 | 27.6 | 27.5 | 27.9 | 27.2 | 26.7 | 27.6 | 27.7 |      |
| 2  | 2014 | 25.7 | 27.6 | 27.6 | 28.3 | 28.1 | 27.7 | 28.1 | 26.9 | 28.5 | 28.3 | 28.3 | 29.0 | 28.0 | 28.6 | 28.9 | 28.7 | 28.5 | 27.6 | 28.1 | 28.5 | 28.6 | 28.5 | 28.3 | 28.3 | 28.3 | 28.2 | 28.2 | 28.2 | 28.2 | 28.2 |      |      |
| 3  | 2014 | 28.9 | 28.4 | 28.6 | 28.2 | 28.4 | 28.4 | 28.6 | 28.0 | 27.7 | 28.9 | 28.3 | 28.7 | 28.0 | 28.6 | 29.1 | 28.6 | 28.8 | 29.2 | 28.8 | 28.8 | 28.7 | 29.0 | 28.9 | 29.3 | 29.6 | 28.8 | 29.6 | 29.2 | 29.0 | 29.4 | 29.1 |      |
| 4  | 2014 | 29.5 | 29.4 | 29.6 | 29.4 | 29.6 | 29.1 | 29.8 | 30.6 | 29.6 | 27.3 | 29.0 | 29.0 | 29.1 | 29.4 | 29.4 | 28.9 | 29.7 | 28.9 | 29.5 | 29.6 | 29.6 | 29.2 | 29.5 | 29.8 | 30.4 | 28.0 | 28.2 | 28.1 | 27.8 | 28.1 |      |      |
| 5  | 2014 | 28.5 | 27.8 | 28.6 | 29.9 | 30.2 | 29.6 | 27.3 | 27.4 | 27.2 | 26.5 | 27.7 | 28.3 | 28.7 | 28.5 | 29.0 | 29.4 | 29.4 | 29.6 | 29.7 | 29.7 | 29.0 | 28.1 | 28.2 | 28.4 | 27.3 | 28.6 | 29.1 | 29.3 | 28.7 | 26.0 | 26.3 |      |
| 6  | 2014 | 27.8 | 27.0 | 27.4 | 27.5 | 27.0 | 28.5 | 28.0 | 29.2 | 27.7 | 28.4 | 28.1 | 29.4 | 27.4 | 28.2 | 29.2 | 29.2 | 29.3 | 29.5 | 29.8 | 28.6 | 26.4 | 26.7 | 26.5 | 25.9 | 27.0 | 28.7 | 29.3 | 28.4 | 28.4 | 28.4 |      |      |
| 7  | 2014 | 27.1 | 26.3 | 27.9 | 29.6 | 29.5 | 28.7 | 28.2 | 29.0 | 29.1 | 29.1 | 29.1 | 28.8 | 28.5 | 28.8 | 28.8 | 27.6 | 28.1 | 29.2 | 28.6 | 28.4 | 29.2 | 29.0 | 29.3 | 29.6 | 29.2 | 25.7 | 28.6 | 27.5 | 28.7 | 29.0 | 29.2 |      |
| 8  | 2014 | 28.3 | 28.2 | 26.6 | 27.0 | 29.0 | 28.4 | 28.5 | 24.5 | 25.2 | 26.4 | 26.7 | 26.4 | 28.1 | 28.9 | 28.7 | 26.7 | 27.6 | 27.9 | 25.7 | 26.0 | 26.6 | 27.3 | 27.2 | 26.6 | 28.0 | 26.6 | 26.5 | 26.3 | 26.3 | 26.9 | 27.8 |      |
| 9  | 2014 | 29.0 | 27.1 | 25.5 | 26.6 | 26.9 | 26.8 | 26.7 | 26.8 | 26.8 | 26.2 | 26.1 | 25.7 | 25.5 | 25.6 | 26.9 | 27.1 | 27.2 | 26.7 | 26.1 | 25.6 | 25.0 | 25.6 | 26.0 | 25.0 | 26.3 | 25.8 | 26.6 | 26.1 | 26.4 | 27.5 |      |      |
| 10 | 2014 | 27.2 | 26.5 | 26.7 | 27.8 | 26.9 | 27.0 | 25.7 | 25.4 | 24.7 | 25.9 | 26.1 | 25.9 | 25.9 | 25.3 | 26.0 | 27.2 | 26.7 | 25.9 | 26.0 | 25.8 | 25.9 | 25.4 | 26.3 | 25.9 | 26.2 | 25.9 | 26.3 | 26.8 | 26.3 | 26.6 | 25.4 |      |
| 11 | 2014 | 26.2 | 26.9 | 25.9 | 26.7 | 26.2 | 27.0 | 27.7 | 27.4 | 24.2 | 26.1 | 26.9 | 27.1 | 27.3 | 27.1 | 26.3 | 26.2 | 26.7 | 27.0 | 27.4 | 25.9 | 26.6 | 26.4 | 26.4 | 27.1 | 27.2 | 26.6 | 26.7 | 26.9 | 27.3 | 28.5 |      |      |
| 12 | 2014 | 28.2 | 27.5 | 27.3 | 26.6 | 27.7 | 27.2 | 27.0 | 26.5 | 26.7 | 26.9 | 26.7 | 26.0 | 25.0 | 26.6 | 27.0 | 26.0 | 26.1 | 26.3 | 27.1 | 26.7 | 27.2 | 27.1 | 27.2 | 27.9 | 28.5 | 28.1 | 28.6 | 28.7 | 27.5 | 27.9 | 28.0 |      |
| 1  | 2015 | 28.8 | 28.8 | 29.6 | 28.4 | 28.8 | 28.6 | 27.9 | 28.2 | 28.1 | 28.2 | 28.7 | 29.5 | 28.1 | 28.6 | 28.0 | 27.8 | 27.4 | 27.4 | 26.8 | 27.6 | 28.0 | 27.3 | 27.4 | 27.7 | 27.6 | 27.2 | 26.5 | 24.9 | 25.4 | 26.5 | 26.9 |      |
| 2  | 2015 | 28.7 | 28.0 | 28.7 | 28.3 | 28.6 | 28.2 | 27.9 | 27.4 | 27.2 | 27.2 | 26.4 | 27.3 | 26.7 | 26.3 | 25.9 | 26.8 | 27.9 | 27.7 | 28.4 | 26.2 | 26.2 | 28.6 | 29.1 | 27.5 | 27.9 | 28.4 | 28.5 |      |      |      |      |      |
| 3  | 2015 | 27.9 | 28.5 | 28.4 | 28.9 | 29.4 | 29.6 | 28.0 | 28.1 | 28.2 | 28.7 | 29.2 | 29.6 | 29.2 | 28.8 | 28.8 | 27.8 | 28.3 | 28.2 | 28.5 | 28.6 | 28.3 | 28.2 | 28.9 | 28.1 | 29.2 | 28.7 | 28.1 | 29.7 | 28.1 | 28.5 |      |      |
| 4  | 2015 | 29.3 | 29.1 | 29.2 | 29.4 | 29.6 | 29.2 | 29.0 | 28.8 | 29.5 | 29.1 | 29.4 | 29.9 | 29.2 | 29.9 | 29.5 | 29.8 | 29.3 | 29.2 | 29.4 | 29.8 | 29.6 | 29.6 | 29.3 | 29.3 | 29.8 | 30.0 | 30.2 | 31.8 | 29.6 | 28.8 |      |      |
| 5  | 2015 | 27.8 | 29.5 | 29.8 | 28.2 | 29.3 | 29.6 | 30.2 | 30.6 | 29.6 | 30.1 | 30.1 | 30.4 | 29.7 | 30.1 | 28.7 | 27.3 | 29.2 | 29.4 | 28.7 | 28.7 | 29.0 | 29.2 | 29.4 | 28.0 | 27.1 | 27.7 | 28.6 | 28.5 | 27.7 | 28.7 | 28.7 |      |
| 6  | 2015 | 29.8 | 29.5 | 27.2 | 27.7 | 27.5 | 26.9 | 27.6 | 26.0 | 26.2 | 26.5 | 26.7 | 28.0 | 28.2 | 28.8 | 29.7 | 29.6 | 29.5 | 29.7 | 30.0 | 29.6 | 27.7 | 28.7 | 29.2 | 30.5 | 30.3 | 30.1 | 29.4 | 29.3 | 28.3 | 27.9 |      |      |
| 7  | 2015 | 29.5 | 30.0 | 29.7 | 29.8 | 30.0 | 29.5 | 27.0 | 27.1 | 27.3 | 26.9 | 27.8 | 28.0 | 28.0 | 28.2 | 29.7 | 28.9 | 27.2 | 27.7 | 27.4 | 28.1 | 27.7 | 27.3 | 26.9 | 29.2 | 29.9 | 29.7 | 29.5 | 29.4 | 27.9 | 27.5 | 28.9 |      |
| 8  | 2015 | 28.9 | 29.5 | 29.5 | 29.6 | 29.8 | 29.3 | 29.4 | 28.6 | 28.5 | 26.7 | 27.2 | 28.8 | 30.0 | 28.7 | 27.5 | 27.6 | 29.2 | 29.2 | 29.5 | 28.6 | 26.8 | 28.3 | 28.8 | 28.8 | 26.9 | 28.2 | 28.5 | 29.4 | 29.7 | 27.5 | 26.0 |      |
| 9  | 2015 | 27.2 | 26.5 | 27.0 | 28.0 | 29.4 | 28.4 | 28.2 | 28.4 | 28.1 | 26.2 | 27.5 | 26.6 | 27.2 | 28.0 | 28.8 | 29.7 | 28.2 | 27.5 | 27.4 | 28.8 | 27.5 | 27.3 | 26.2 | 26.6 | 27.0 | 28.0 | 26.9 | 27.4 | 28.5 | 26.6 |      |      |
| 10 | 2015 | 26.2 | 26.4 | 26.7 | 27.7 | 28.5 | 29.7 | 28.2 | 27.8 | 27.6 | 28.4 | 27.1 | 26.3 | 27.3 | 27.1 | 26.3 | 26.8 | 26.2 | 27.4 | 27.7 | 26.9 | 26.5 | 28.0 | 27.4 | 27.1 | 26.8 | 27.0 | 27.2 | 26.8 | 27.5 | 27.0 | 27.5 |      |
| 11 | 2015 | 27.4 | 27.6 | 27.3 | 27.0 | 26.4 | 27.3 | 27.7 | 27.1 | 27.8 | 26.0 | 27.3 | 27.5 | 27.2 | 28.3 | 28.5 | 27.2 | 26.0 | 26.2 | 27.0 | 26.4 | 26.5 | 25.3 | 26.6 | 27.0 | 27.7 | 28.8 | 28.5 | 27.4 | 27.8 | 28.5 | 27.5 |      |
| 12 | 2015 | 28.3 | 27.7 | 27.9 | 29.6 | 28.6 | 28.7 | 29.3 | 28.6 | 28.6 | 28.3 | 29.1 | 29.4 | 29.0 | 28.8 | 28.1 | 27.9 | 28.2 | 29.3 | 29.2 | 29.3 | 29.6 | 28.4 | 29.0 | 29.2 | 29.2 | 29.1 | 29.5 | 29.6 | 29.8 | 30.0 |      |      |
| 1  | 2016 | 29.5 | 29.3 | 28.8 | 28.3 | 28.3 | 28.5 | 28.1 | 28.9 | 28.8 | 28.8 | 28.3 | 28.1 | 28.1 | 27.6 | 28.5 | 27.5 | 28.4 | 28.6 | 27.1 | 28.1 | 28.3 | 27.8 | 27.2 | 25.4 | 26.7 | 28.1 | 28.7 | 28.6 | 28.7 | 28.0 | 29.0 |      |
| 2  | 2016 | 28.3 | 28.1 | 28.5 | 28.7 | 28.2 | 28.4 | 27.9 | 27.1 | 26.0 | 25.1 | 25.2 | 27.2 | 28.6 | 28.6 | 29.1 | 29.0 | 29.5 | 29.2 | 28.8 | 29.1 | 29.1 | 29.6 | 29.9 | 29.0 | 29.5 | 28.2 | 28.7 | 27.5 | 27.9 |      |      |      |
| 3  | 2016 | 28.9 | 28.9 | 29.3 | 29.3 | 29.5 | 29.7 | 29.2 | 29.6 | 29.7 | 29.9 | 29.7 | 29.4 | 29.0 | 29.0 | 29.3 | 29.6 | 29.9 | 30.5 | 30.5 | 30.1 | 30.5 | 29.5 | 29.7 | 29.9 | 30.0 | 30.2 | 30.3 | 30.4 | 30.1 | 30.2 | 30.6 |      |
| 4  | 2016 | 30.2 | 29.9 | 30.4 | 30.0 | 29.9 | 30.1 | 30.1 | 30.2 | 30.3 | 30.1 | 30.0 | 29.2 | 29.7 | 30.1 | 29.3 | 30.4 | 30.4 | 30.5 | 30.6 | 30.5 | 30.4 | 31.1 | 30.1 | 29.9 | 30.5 | 29.7 | 28.6 | 28.7 | 29.0 | 28.7 |      |      |
| 5  | 2016 | 28.8 | 28.7 | 27.5 | 28.2 | 25.4 | 27.6 | 29.5 | 28.9 | 28.7 | 29.3 | 29.6 | 29.5 | 30.5 | 30.3 | 29.6 | 28.9 | 28.8 | 27.9 | 29.0 | 28.8 | 29.2 | 30.6 | 30.3 | 30.0 | 30.1 | 29.4 | 27.3 | 27.1 | 28.1 | 26.7 | 26.4 |      |
| 6  | 2016 | 26.4 | 27.0 | 26.8 | 26.7 | 25.5 | 27.2 | 27.3 | 27.5 | 26.9 | 26.2 | 25.7 | 27.1 | 27.5 | 26.8 | 26.6 | 28.0 | 27.6 | 28.0 | 28.9 | 27.8 | 25.9 | 27.3 | 28.1 | 28.6 | 26.7 | 27.8 | 27.7 | 28.5 | 29.5 | 28.8 |      |      |
| 7  | 2016 | 26.9 | 26.3 | 27.4 | 28.5 | 29.4 | 29.1 | 27.5 | 28.5 | 27.3 | 28.4 | 26.8 | 26.8 | 27.0 | 28.6 | 27.8 | 27.4 | 27.0 | 25.5 | 26.6 | 27.4 | 29.2 | 26.9 | 26.2 | 28.1 | 28.0 | 27.8 | 27.6 | 28.4 | 26.8 | 28.7 | 28.7 |      |
| 8  | 2016 | 29.2 | 29.5 | 26.8 | 26.9 | 27.2 | 28.1 | 28.4 | 27.4 | 27.7 | 28.2 | 26.6 | 27.0 | 27.1 | 26.3 | 26.4 | 28.2 | 28.5 | 27.8 | 28.8 | 29.7 | 27.4 | 27.7 | 28.2 | 28.5 | 28.7 | 28.3 | 27.2 | 26.9 | 27.0 | 26.4 | 25.8 | 26.5 |
| 9  | 2016 | 25.8 | 25.9 | 27.6 | 26.8 | 26.0 | 26.0 | 26.6 | 27.4 | 26.5 | 26.3 | 26.4 | 26.1 | 26.2 | 27.3 | 26.5 | 26.6 | 27.2 | 28.4 | 29.4 | 26.2 | 26.5 | 27.5 | 25.4 | 26.7 | 27.0 | 26.6 | 27.0 | 26.6 | 27.9 | 28.5 | 28.1 |      |
| 10 | 2016 | 27.4 | 26.8 | 26.5 | 25.9 | 25.6 | 26.1 | 26.3 | 26.8 | 26.9 | 26.1 | 26.8 | 26.4 | 27.1 | 26.7 | 26.2 | 25.2 | 25.0 | 26.1 | 27.3 | 26.9 | 26.6 | 28.0 | 27.1 | 26.6 | 27.1 | 26.6 | 27.1 | 25.8 | 26.0 | 26.4 | 26.6 |      |
| 11 | 2016 | 25.8 | 26.0 | 27.1 | 26.9 | 27.0 | 28.0 | 27.1 | 25.8 | 26.5 | 27.3 | 26.4 | 26.9 | 26.3 | 26.2 | 27.1 | 26.9 | 27.8 | 24.7 | 25.5 | 26.5 | 26.5 | 26.7 | 24.9 | 24.2 | 26.2 | 26.8 | 26.5 | 26.7 | 27.2 | 26.3 |      |      |
| 12 | 2016 | 26.2 | 26.8 | 26.7 | 26.4 | 26.4 | 27.0 | 26.4 | 26.2 | 27.1 | 26.4 | 25.1 | 24.7 | 26.2 | 26.8 | 28.4 | 28.1 | 27.6 | 27.7 | 28.4 | 26.7 | 25.8 | 27.5 | 26.8 | 27.3 | 26.7 | 27.8 | 27.9 | 28.1 | 28.3 | 26.8 | 26.9 |      |
| 1  | 2017 | 27.4 | 28.4 | 28.1 | 28.5 | 28.3 | 27.8 | 27.4 | 26.9 | 26.0 | 26.2 | 26.7 | 28.0 | 27.7 | 27.3 | 27.1 | 28.1 | 26.8 | 28.3 | 27.3 | 27.4 | 27.0 | 25.8 | 2    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

|    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 8  | 2020 | 28.7 | 28.8 | 27.5 | 27.2 | 26.1 | 26.0 | 27.8 | 28.1 | 28.3 | 26.2 | 27.4 | 28.4 | 26.3 | 26.1 | 25.9 | 26.1 | 27.5 | 27.1 | 26.3 | 25.7 | 24.7 | 25.8 | 25.5 | 25.5 | 26.0 | 24.0 | 26.0 | 26.4 | 27.0 | 26.0 | 26.8 |      |
| 9  | 2020 | 26.5 | 26.9 | 26.6 | 26.7 | 26.4 | 26.1 | 26.8 | 26.8 | 26.7 | 27.0 | 27.4 | 26.5 | 26.0 | 25.7 | 25.8 | 27.1 | 25.2 | 25.6 | 26.2 | 26.6 | 26.8 | 26.3 | 26.1 | 25.4 | 26.5 | 26.5 | 26.1 | 26.4 | 26.4 | 26.2 |      |      |
| 10 | 2020 | 25.9 | 25.6 | 24.8 | 24.8 | 24.8 | 25.6 | 24.9 | 25.5 | 25.7 | 25.9 | 27.0 | 27.2 | 27.6 | 25.9 | 26.2 | 26.4 | 26.8 | 27.8 | 27.6 | 26.4 | 25.7 | 25.5 | 26.6 | 25.9 | 25.4 | 25.1 | 26.0 | 26.6 | 26.2 | 27.8 | 26.3 | 26.7 |
| 11 | 2020 | 26.6 | 25.2 | 24.4 | 24.2 | 24.8 | 25.2 | 25.5 | 25.4 | 26.2 | 24.7 | 26.1 | 26.6 | 27.0 | 26.5 | 26.1 | 26.9 | 26.8 | 25.6 | 26.1 | 26.9 | 26.8 | 25.6 | 24.7 | 26.1 | 26.9 | 26.8 | 27.5 | 27.1 | 26.9 |      |      |      |
| 12 | 2020 | 27.1 | 25.9 | 25.4 | 26.6 | 28.2 | 26.9 | 27.5 | 28.0 | 26.1 | 25.3 | 26.2 | 27.6 | 26.0 | 25.9 | 25.3 | 26.2 | 26.7 | 27.7 | 27.3 | 28.2 | 28.2 | 27.9 | 27.0 | 28.7 | 27.3 | 26.4 | 26.1 | 26.6 | 25.8 | 25.2 | 26.2 |      |
| 1  | 2021 | 27.3 | 27.6 | 26.8 | 27.0 | 26.4 | 26.3 | 26.4 | 27.3 | 26.9 | 26.9 | 26.4 | 28.4 | 28.1 | 27.2 | 27.6 | 26.8 | 27.8 | 28.1 | 27.7 | 27.8 | 27.0 | 27.4 | 27.9 | 28.3 | 27.4 | 27.3 | 26.8 | 28.1 | 28.4 | 27.7 | 28.0 |      |
| 2  | 2021 | 28.8 | 28.0 | 25.4 | 26.3 | 28.6 | 28.5 | 28.8 | 28.6 | 28.3 | 28.1 | 27.6 | 27.9 | 28.2 | 27.7 | 27.1 | 27.4 | 28.2 | 27.8 | 27.6 | 28.2 | 28.5 | 28.0 | 28.3 | 28.6 | 28.8 | 28.4 | 28.5 | 28.5 |      |      |      |      |
| 3  | 2021 | 28.0 | 28.7 | 28.4 | 27.3 | 28.2 | 28.0 | 27.8 | 27.9 | 28.9 | 28.9 | 28.4 | 28.9 | 28.9 | 29.0 | 28.8 | 27.4 | 28.4 | 29.4 | 28.8 | 28.4 | 27.3 | 28.2 | 27.9 | 28.8 | 28.6 | 29.1 | 28.8 | 28.7 | 28.2 | 28.3 | 29.5 |      |
| 4  | 2021 | 29.4 | 27.6 | 28.7 | 28.9 | 28.8 | 28.9 | 29.3 | 27.2 | 27.3 | 27.1 | 27.5 | 28.7 | 29.1 | 28.4 | 27.4 | 27.8 | 27.4 | 26.7 | 27.9 | 27.3 | 28.6 | 28.6 | 28.5 | 28.3 | 29.4 | 29.3 | 29.0 | 27.7 | 27.0 | 27.8 |      |      |
| 5  | 2021 | 28.3 | 25.8 | 27.4 | 25.8 | 25.6 | 26.5 | 26.8 | 27.6 | 27.8 | 28.0 | 28.0 | 27.4 | 28.9 | 29.4 | 29.4 | 28.2 | 28.1 | 28.5 | 28.8 | 28.5 | 29.0 | 29.4 | 28.9 | 27.5 | 29.6 | 27.5 | 28.3 | 27.1 | 27.4 | 28.3 | 28.3 |      |
| 6  | 2021 | 29.2 | 29.0 | 27.7 | 29.0 | 28.6 | 28.5 | 26.5 | 26.5 | 27.0 | 26.4 | 26.9 | 27.8 | 27.3 | 26.2 | 27.5 | 26.4 | 27.0 | 27.2 | 27.5 | 27.1 | 26.9 | 26.3 | 28.5 | 28.6 | 27.2 | 24.7 | 25.9 | 26.5 | 27.4 | 26.4 |      |      |
| 7  | 2021 | 26.1 | 26.8 | 27.2 | 26.1 | 26.6 | 26.5 | 29.4 | 29.1 | 27.7 | 25.8 | 26.8 | 26.9 | 28.0 | 26.9 | 28.9 | 29.6 | 27.8 | 27.3 | 29.6 | 29.7 | 29.7 | 27.3 | 26.1 | 25.2 | 26.5 | 26.2 | 25.8 | 27.3 | 28.1 | 29.1 | 29.1 |      |
| 8  | 2021 | 27.9 | 26.9 | 25.8 | 28.0 | 27.0 | 26.9 | 25.7 | 25.7 | 28.0 | 28.5 | 24.9 | 25.4 | 26.8 | 25.8 | 25.9 | 26.2 | 26.5 | 26.6 | 26.2 | 26.4 | 26.1 | 26.5 | 25.9 | 26.6 | 25.3 | 25.7 | 25.7 | 27.3 | 26.9 | 25.7 | 24.7 |      |
| 9  | 2021 | 26.1 | 27.1 | 27.7 | 27.0 | 26.9 | 26.1 | 25.9 | 25.7 | 25.7 | 26.1 | 27.0 | 25.5 | 26.1 | 26.6 | 26.3 | 26.5 | 27.6 | 26.9 | 26.6 | 27.9 | 26.2 | 27.6 | 26.2 | 26.3 | 27.5 | 26.7 | 26.7 | 27.1 | 26.0 | 25.9 |      |      |
| 10 | 2021 | 26.5 | 27.6 | 27.5 | 27.2 | 27.4 | 26.9 | 25.9 | 26.9 | 27.1 | 26.6 | 26.3 | 27.0 | 26.5 | 26.8 | 26.2 | 26.7 | 26.8 | 26.5 | 26.4 | 26.2 | 26.8 | 26.9 | 26.5 | 26.7 | 27.0 | 27.3 | 27.1 | 27.4 | 26.7 | 26.1 | 26.4 |      |
| 11 | 2021 | 27.4 | 26.1 | 25.1 | 25.4 | 26.2 | 26.8 | 27.3 | 27.7 | 26.5 | 26.8 | 26.8 | 27.4 | 27.5 | 27.4 | 27.9 | 27.7 | 26.8 | 26.2 | 26.4 | 26.1 | 26.4 | 26.7 | 26.6 | 26.0 | 27.4 | 27.2 | 27.7 | 26.9 | 25.7 | 26.5 |      |      |
| 12 | 2021 | 26.0 | 27.7 | 27.6 | 28.7 | 27.9 | 28.0 | 28.4 | 27.7 | 27.0 | 28.1 | 27.8 | 27.6 | 27.1 | 26.8 | 27.7 | 27.4 | 27.7 | 27.6 | 27.3 | 28.0 | 26.0 | 27.2 | 26.9 | 26.8 | 26.9 | 27.6 | 27.9 | 27.5 | 26.8 | 27.2 | 28.2 |      |
| 1  | 2022 | 28.6 | 26.8 | 28.3 | 28.4 | 27.6 | 25.2 | 27.8 | 27.7 | 28.4 | 28.3 | 27.4 | 27.5 | 27.4 | 27.5 | 27.6 | 26.5 | 28.3 | 26.3 | 27.7 | 28.3 | 28.9 | 28.9 | 28.1 | 27.8 | 26.2 | 26.5 | 28.1 | 27.4 | 28.0 | 26.9 | 25.4 |      |
| 2  | 2022 | 27.5 | 26.6 | 27.2 | 28.2 | 27.8 | 28.0 | 27.9 | 28.3 | 28.3 | 28.0 | 27.8 | 28.7 | 27.8 | 27.9 | 28.3 | 28.4 | 28.4 | 28.4 | 28.2 | 28.8 | 28.6 | 28.9 | 28.8 | 28.8 | 28.8 | 28.2 | 27.7 | 28.4 |      |      |      |      |
| 3  | 2022 | 28.5 | 28.5 | 27.7 | 28.1 | 28.1 | 29.0 | 29.2 | 28.8 | 28.7 | 28.3 | 27.9 | 28.7 | 28.2 | 29.3 | 29.8 | 29.3 | 29.9 | 29.8 | 29.0 | 28.8 | 29.0 | 29.5 | 29.5 | 29.3 | 29.3 | 29.1 | 29.1 | 29.5 | 30.1 | 30.1 | 29.5 |      |
| 4  | 2022 | 29.2 | 29.8 | 29.5 | 28.8 | 28.4 | 27.7 | 29.6 | 29.4 | 28.5 | 29.1 | 29.3 | 29.3 | 29.5 | 29.2 | 29.9 | 28.9 | 28.2 | 27.6 | 26.3 | 27.3 | 27.3 | 28.2 | 28.1 | 27.6 | 28.0 | 28.1 | 27.6 | 28.0 | 27.1 |      |      |      |
| 5  | 2022 | 28.2 | 28.8 | 28.3 | 26.9 | 27.0 | 28.2 | 27.6 | 26.9 | 28.1 | 29.0 | 28.7 | 26.8 | 28.1 | 28.3 | 28.2 | 28.9 | 27.0 | 28.2 | 27.1 | 25.9 | 26.3 | 24.9 | 27.8 | 27.4 | 25.1 | 25.9 | 26.8 | 27.0 | 27.2 | 26.6 |      |      |
| 6  | 2022 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 7  | 2022 | 26.2 | 25.6 | 26.5 | 26.6 | 25.6 | 26   | 28.3 | 27.9 | 26.3 | 27.1 | 25.8 | 26.3 | 26.2 | 26.1 | 26.7 | 27.8 | 27.8 | 27   | 27.4 | 26.3 | 27.5 | 25.7 | 27.1 | 26.6 | 26.6 | 25.1 | 25.5 | 25.9 | 27.1 | 27.9 | 28.6 |      |
| 8  | 2022 | 27.6 | 25.9 | 25.6 | 26.1 | 27.3 | 26.3 | 26.3 | 27   | 28.5 | 28.1 | 25.4 | 26.2 | 27.1 | 26.7 | 26   | 25.8 | 27.2 | 29.5 | 28.4 | 27.2 | 27.3 | 27   | 25.2 | 25.6 | 27.2 | 26.7 | 26.5 | 26.1 | 26   | 26.3 | 26.1 |      |
| 9  | 2022 | 26.2 | 26.7 | 25.4 | 27.5 | 26.1 | 26.7 | 26.6 | 25.8 | 25.4 | 25.8 | 25.9 | 25.6 | 24.8 | 25.7 | 25.4 | 25.6 | 26.2 | 25.8 | 25.5 | 26   | 25.5 | 25.5 | 26.7 | 26.7 | 25.7 | 25.3 | 26.1 | 26.1 | 26.2 | 26.1 |      |      |
| 10 | 2022 | 24.9 | 25.5 | 27.2 | 28.2 | 26.4 | 26.2 | 26.8 | 26.9 | 23.8 | 26.2 | 27   | 27.1 | 26.9 | 25.7 | 26.4 | 25.6 | 26   | 26.1 | 27.4 | 26.7 | 26.2 | 26.8 | 26.4 | 25.8 | 26.7 | 27.8 | 27.2 | 27   | 26.7 | 26.1 | 26.3 |      |
| 11 | 2022 | 26.8 | 26.2 | 25.6 | 25.1 | 24.8 | 24   | 24   | 26   | 25.3 | 26   | 25.5 | 27.4 | 26.3 | 25.7 | 27.2 | 28.7 | 27.5 | 27.2 | 26.3 | 26.8 | 26.8 | 25.8 | 26.3 | 26.5 | 25.9 | 25.4 | 25.7 | 26.1 | 26.2 | 25.8 |      |      |
| 12 | 2022 | 27.1 | 27.5 | 26.5 | 27.2 | 26.7 | 26.7 | 26.5 | 27.4 | 26.7 | 26.6 | 27.1 | 27   | 26.8 | 26.9 | 25.7 | 27.1 | 28.2 | 27.9 | 27.4 | 28   | 26.6 | 27.6 | 26.3 | 28.2 | 28.5 | 28   | 27.3 | 26.8 | 27.4 | 28.1 | 28.1 | 27.8 |

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional IMN

### Anexo 3. Temperatura máxima diaria (°C)

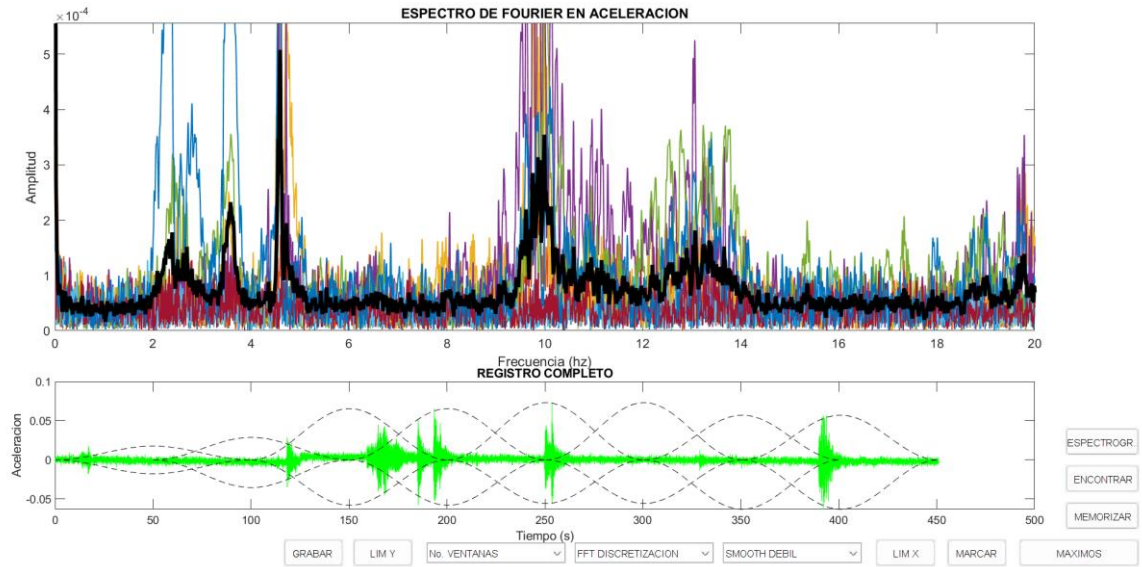
| Temp.Máxima diaria (°C) | mes | D1   | D2   | D3   | D4   | D5   | D6   | D7   | D8   | D9   | D10  | D11  | D12  | D13  | D14  | D15  | D16  | D17  | D18  | D19  | D20  | D21  | D22  | D23  | D24  | D25  | D26  | D27  | D28  | D29  | D30  | D31  |      |
|-------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2012                    | 1   | 32.8 | 33.1 | 33   | 29.5 | 27   | 27.6 | 28.7 | 30.9 | 32.9 | 33.5 | 32.8 | 33.1 | 33.7 | 32   | 31   | 32.4 | 32.4 | 32.2 | 33.3 | 31.5 | 31.8 | 33.3 | 33.7 | 34.2 | 32.7 | 32.7 | 33.6 | 32.2 | 32.6 | 31.4 | 31.9 |      |
| 2012                    | 2   | 32.8 | 32.1 | 31.7 | 34.7 | 32.2 | 33.5 | 33   | 33.5 | 32.1 | 31.7 | 33.6 | 33.5 | 32.7 | 33.4 | 34.2 | 34   | 33.2 | 33.1 | 34.3 | 34.1 | 32.8 | 32.8 | 33.1 | 34.3 | 34.1 | 32.8 | 33.8 | 33.1 | 33.2 | 31.9 |      |      |
| 2012                    | 3   | 32.9 | 33.6 | 34.7 | 35.2 | 33.4 | 34   | 32.1 | 33.5 | 33.3 | 32.6 | 32.8 | 32.7 | 33.6 | 33   | 33.4 | 33.3 | 32.8 | 32.8 | 32.2 | 33.9 | 34.4 | 34.5 | 33   | 32.8 | 33.9 | 34.4 | 33.6 | 34.8 | 31.7 | 33.9 | 34.8 |      |
| 2012                    | 4   | 34.5 | 35.2 | 35.7 | 36.1 | 35.3 | 35.7 | 36   | 35.5 | 34.5 | 34.1 | 34.8 | 34.8 | 35.5 | 35.4 | 36   | 31   | 31.9 | 33.1 | 36.2 | 35.9 | 32.1 | 30.8 | 32.3 | 33.1 | 28.9 | 35.9 | 35.2 |      |      |      |      |      |
| 2012                    | 5   | 34.9 | 35.1 | 34.5 | 35.1 | 34.9 | 35.4 | 36   | 34.8 | 32.8 | 35.6 | 36   | 34.5 | 34.4 | 32.5 | 26.8 | 32.2 | 33.9 | 33.9 | 32   | 32.4 | 31.6 | 29.8 | 32.4 | 32.4 | 30.8 | 34.9 | 34   | 34.2 | 34.6 | 34.4 | 34.3 |      |
| 2012                    | 6   | 29.8 | 33.9 | 31.7 | 34.5 | 32.8 | 33.8 | 32.9 | 33.8 | 34.5 | 32.8 | 34.4 | 31.2 | 29.1 | 27.7 | 32.7 | 32.1 | 32.5 | 32.8 | 34.1 | 33.8 | 34.1 | 34.7 | 32.6 | 32.9 | 35.6 | 35.3 | 32.9 | 33   | 34.2 | 33.3 |      |      |
| 2012                    | 7   | 32.9 | 32.4 | 33.1 | 33.2 | 34   | 30   | 31.2 | 33.1 | 32.1 | 31.5 | 33.6 | 32.6 | 34.4 | 34.5 | 34.1 | 31.2 | 32.2 | 32.9 | 35   | 34.3 | 31.2 | 31.4 | 32.7 | 31.6 | 33.7 | 32.6 | 32.5 | 34.6 | 32.5 | 33.8 | 32.6 | 32.1 |
| 2012                    | 8   | 32.7 | 35.2 | 31.8 | 34.9 | 34   | 35.1 | 35   | 33.3 | 34.6 | 33.9 | 33.5 | 33.5 | 32   | 33.7 | 31.6 | 31.9 | 33.9 | 34.6 | 33.1 | 32.3 | 32.5 | 35.1 | 33.6 | 30.4 | 33.7 | 30.6 | 33.4 | 33.7 | 30.6 | 33.4 | 32.5 |      |
| 2012                    | 9   | 33   | 33.9 | 32.2 | 30.8 | 31.3 | 32.8 | 33.3 | 34   | 33.2 | 31   | 33.4 | 32.7 | 33.7 | 32.1 | 32.8 | 32.6 | 33.2 | 32.5 | 33.2 | 34.2 | 33.9 | 34.6 | 32.2 | 32.2 | 31   | 33.8 | 33.6 | 33   | 32.9 | 33.3 | 32.3 |      |
| 2012                    | 10  | 30.4 | 31.6 | 35.2 | 33.5 | 33.3 | 31.5 | 34.1 | 31   | 30   | 29.8 | 31.4 | 33.9 | 33.8 | 32.9 | 30.7 | 33.2 | 30.2 | 30.4 | 30.6 | 29.1 | 32.4 | 31.4 | 31.6 | 31.5 | 30   | 25.5 | 31.9 | 33   | 32.6 | 32   | 32.6 |      |
| 2012                    | 11  | 30.5 | 31   | 30.8 | 31.2 | 33.6 | 34.1 | 32.1 | 31.9 | 29.4 | 27.3 | 30   | 33   | 32.5 | 31   | 30.7 | 31   | 31.7 | 31.3 | 31.1 | 29.9 | 30.1 | 29.5 | 29.4 | 29.1 | 29.5 | 29.8 | 31.5 | 33.7 | 32.4 | 30.7 |      |      |
| 2012                    | 12  | 29.7 | 29.8 | 30.6 | 32   | 32.1 | 31.3 | 31   | 29.8 | 31   | 33.8 | 33.8 | 35.2 | 33.1 | 31.1 | 31   | 31   | 29.9 | 33.3 | 33.9 | 34.2 | 33.2 | 31.9 | 31.4 | 30.8 | 29.8 | 30   | 30.3 | 34   | 32.5 | 31.6 | 32   | 32   |
| 2013                    | 1   | 33.1 | 32.4 | 34.3 | 33.7 | 33.2 | 32.8 | 33.2 | 34.1 | 33.7 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |



|      |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2015 | 11 | 35.3 | 34.2 | 34.2 | 34.7 | 34.4 | 32.9 | 33.7 | 34.4 | 34   | 34.9 | 33.1 | 34.4 | 33.7 | 35.2 | 32.5 | 33.6 | 33.6 | 34.1 | 33.7 | 33.6 | 34.1 | 32.7 | 32.9 | 32.9 | 33.9 | 31.9 | 33.1 | 33.1 | 32.7 | 30.5 |      |      |
| 2015 | 12 | 31.6 | 32.8 | 35   | 33.3 | 33.8 | 32.5 | 32.6 | 30.1 | 32.8 | 32.6 | 31.8 | 33.5 | 34.8 | 35   | 35.9 | 35.1 | 35.5 | 34.6 | 33.3 | 33.5 | 33.3 | 33.1 | 33.9 | 33.8 | 34.2 | 32.1 | 33   | 33.3 | 34.5 | 34.9 | 34.4 |      |
| 2016 | 1  | 34.6 | 33.5 | 33.9 | 33   | 32.5 | 31.9 | 32.5 | 33   | 34.4 | 35   | 34.1 | 35   | 32.9 | 32.5 | 34.3 | 33.9 | 34.8 | 33.1 | 32.4 | 31.2 | 32.8 | 32.7 | 34.2 | 32.1 | 28.7 | 31.2 | 32.8 | 34.2 | 34.2 | 33   | 33   |      |
| 2016 | 2  | 33.8 | 33.7 | 33.6 | 34.4 | 33.7 | 32.4 | 33   | 31.9 | 31.4 | 29.3 | 28.1 | 28.3 | 31.2 | 32.9 | 32.8 | 33.8 | 33.4 | 34.2 | 33.1 | 33   | 33.4 | 34.5 | 34.4 | 35.9 | 35.2 | 34.3 | 31.9 | 33.2 | 30.5 |      |      |      |
| 2016 | 3  | 32.9 | 34.1 | 33.8 | 34.1 | 34.6 | 34.2 | 35.4 | 36.1 | 39.1 | 35.9 | 36.6 | 36   | 33.9 | 33.3 | 34.8 | 34.2 | 35.3 | 35.9 | 36.4 | 35.8 | 36   | 35.3 | 33.7 | 33.9 | 35   | 34.9 | 34.7 | 35   | 35.1 | 35   | 36.2 |      |
| 2016 | 4  | 37.2 | 37.6 | 38.8 | 36.9 | 34.1 | 34.3 | 35   | 35.2 | 35.3 | 35.2 | 35   | 34.9 | 36   | 37   | 36.8 | 36.3 | 36.8 | 36.8 | 35.5 | 35.9 | 36.2 | 36.9 | 38   | 35.6 | 36   | 36.8 | 36.6 | 36.4 | 36.1 | 37.1 |      |      |
| 2016 | 5  | 37.1 | 35.4 | 36   | 33.7 | 35.5 | 28.3 | 33.4 | 34.3 | 33.8 | 35.4 | 36.3 | 36.1 | 35.4 | 35.7 | 34.8 | 33.9 | 34.9 | 36.5 | 33.9 | 35.3 | 33.9 | 33.7 | 36.2 | 36.4 | 36   | 35.7 | 35.8 | 36.1 | 34   | 35.1 | 34.2 |      |
| 2016 | 6  | 32.7 | 31   | 35   | 32.5 | 32.5 | 28.6 | 35.3 | 33.2 | 33.4 | 34.8 | 33.8 | 33.6 | 32.8 | 31.9 | 33.8 | 34.9 | 35.1 | 31.4 | 35.5 | 34.8 | 32.9 | 31.9 | 34.6 | 33.2 | 34.8 | 30.4 | 34.4 | 34.7 | 34.5 | 34.5 |      |      |
| 2016 | 7  | 34.9 | 32.3 | 29   | 33.6 | 32.6 | 35.2 | 34.6 | 32   | 34   | 30.3 | 35   | 32.8 | 35.2 | 33   | 34.2 | 33.2 | 34.6 | 31.4 | 32.1 | 31.6 | 34   | 34.7 | 33.2 | 33.2 | 34.2 | 35.4 | 33.3 | 32.5 | 33.5 | 36   | 30.4 |      |
| 2016 | 8  | 34.4 | 33.8 | 35.6 | 32.6 | 34.1 | 35.4 | 35.4 | 34.2 | 33.7 | 33.4 | 34.7 | 31.6 | 34.9 | 35   | 34.3 | 32.3 | 34   | 34.5 | 33.5 | 34.7 | 34.4 | 33.9 | 34.4 | 32.9 | 35.3 | 34.1 | 35.5 | 33.3 | 34.7 | 34.8 | 33.1 |      |
| 2016 | 9  | 32.9 | 31.6 | 32.8 | 34.5 | 34.5 | 32.4 | 32.9 | 31.2 | 32.4 | 32.8 | 31.8 | 33.5 | 31.4 | 33.7 | 34.1 | 33.7 | 33.5 | 35.7 | 34.7 | 34.8 | 31.2 | 34.3 | 34.7 | 30.8 | 33.8 | 34   | 34   | 32.9 | 34.9 | 33.9 |      |      |
| 2016 | 10 | 34.1 | 34.9 | 33.7 | 33.1 | 31.9 | 33.7 | 33.4 | 32.5 | 32.4 | 33   | 32   | 32.2 | 30.9 | 33.5 | 32.7 | 33.1 | 33.6 | 33.3 | 29.3 | 28.6 | 32   | 32.4 | 30.6 | 29.3 | 33.3 | 34.7 | 31.9 | 34.6 | 29.4 | 32.5 | 32.3 |      |
| 2016 | 11 | 34.6 | 31.5 | 31.3 | 34   | 33   | 31.4 | 32.8 | 32.3 | 32.8 | 33.9 | 32.8 | 33   | 32.1 | 30.4 | 30.2 | 32.5 | 32.8 | 32.9 | 30.8 | 29.5 | 30.6 | 30   | 31.1 | 28.2 | 26.5 | 33.4 | 32.9 | 30.1 | 30.2 | 32.7 |      |      |
| 2016 | 12 | 31.2 | 33.3 | 34.3 | 32.9 | 26   | 33.1 | 33.9 | 33.8 | 30.5 | 32.4 | 30.4 | 27.7 | 28.4 | 32.3 | 32.7 | 32.7 | 33.5 | 33.9 | 34.3 | 32.7 | 31.3 | 29.6 | 31.7 | 30.9 | 33.3 | 32.8 | 33.2 | 32.1 | 32.6 | 30.9 |      |      |
| 2017 | 1  | 30.8 | 32   | 33.1 | 32.9 | 34.7 | 33.2 | 33.4 | 32   | 30.8 | 28.6 | 28.9 | 30.4 | 32.5 | 32.7 | 31.3 | 33.1 | 32.8 | 33.2 | 34.3 | 34.8 | 34.8 | 33.8 | 33.8 | 33.4 | 32.6 | 34   | 33.9 | 33.9 | 33.3 | 81.9 |      |      |
| 2017 | 2  | 32   | 32.9 | 33.2 | 32.7 | 33.4 | 33   | 36.6 | 33.7 | 34.2 | 33.5 | 33   | 33.2 | 34.2 | 33.8 | 34.1 | 35.1 | 34.2 | 33.9 | 33.8 | 34.3 | 34.5 | 36.8 | 37.3 | 35.6 | 35.7 | 36.5 | 35.9 | 34.2 |      |      |      |      |
| 2017 | 3  | 34.9 | 34.2 | 33.3 | 33.5 | 32.6 | 33.3 | 32.3 | 34.8 | 34.7 | 34.5 | 33.8 | 35.6 | 35.3 | 34.8 | 35.3 | 33.4 | 33.7 | 34.2 | 33   | 34.4 | 33.4 | 30.5 | 32.6 | 32.2 | 32.6 | 33.6 | 35.2 | 35.4 | 37   | 36.2 | 36.7 |      |
| 2017 | 4  | 36.7 | 35.9 | 32.8 | 34.9 | 36.6 | 36   | 35.4 | 35   | 34.3 | 34.2 | 34.7 | 35.4 | 35.5 | 33.8 | 33.1 | 33.8 | 34   | 34.3 | 36.7 | 36.3 | 34.1 | 38.9 | 36.8 | 38   | 35.6 | 36.8 | 37.2 | 35.6 | 35.9 | 36.1 |      |      |
| 2017 | 5  | 36   | 36.8 | 31.9 | 35.5 | 35.2 | 31.2 | 33.7 | 33.8 | 26.7 | 33   | 32.6 | 32.9 | 30.7 | 28.2 | 34.8 | 33.2 | 34.6 | 31.7 | 34.2 | 36   | 33.8 | 35   | 34.4 | 35.8 | 34.9 | 35.2 | 32.7 | 34.1 | 32.4 | 33.6 | 34.2 |      |
| 2017 | 6  | 35.6 | 33.8 | 33.5 | 31.1 | 34.9 | 33.4 | 35.3 | 32.4 | 33.1 | 34   | 30.3 | 30.7 | 33.8 | 33.8 | 30.8 | 31.5 | 29.6 | 30.6 | 31.2 | 32.8 | 33.4 | 33   | 29.5 | 32.8 | 34.2 | 34.5 | 30.8 | 33.3 | 34   | 34.3 |      |      |
| 2017 | 7  | 32.3 | 29.7 | 29.5 | 32.2 | 32.6 | 32.4 | 34.4 | 33.4 | 34.1 | 30.4 | 32.5 | 32.7 | 33.2 | 33.5 | 32.4 | 31.3 | 30.6 | 31.8 | 34.1 | 33.8 | 34.5 | 33.2 | 30.3 | 30.5 | 33.4 | 32.5 | 32.3 | 32.6 |      |      |      |      |
| 2017 | 8  | 31.2 | 35   | 33.9 | 34.8 | 32.3 | 33.1 | 32.6 | 33.4 | 33.5 | 32.9 | 32.8 | 31.2 | 34.4 | 30.2 | 33.8 | 34.8 | 32.7 | 32.4 | 33.5 | 34   | 31.8 | 33.1 | 35.3 | 34.5 | 32.5 | 33.1 | 34.7 | 34   | 32.9 | 33   |      |      |
| 2017 | 9  | 32.6 | 33.8 | 34.1 | 32.3 | 33.9 | 33.4 | 33.2 | 34   | 33.3 | 32.5 | 31.8 | 31.4 | 33.8 | 34.4 | 33.6 | 33   | 33.2 | 33.5 | 32.8 | 32.7 | 33.5 | 32.9 | 33.1 | 31.1 | 27.4 | 33.4 | 31.6 | 32.8 | 32.9 | 32.9 |      |      |
| 2017 | 10 | 32.8 | 31.1 | 30.5 | 29   | 27.1 | 24.2 | 29.4 | 33.3 | 31.2 | 33.1 | 33.1 | 33.4 | 34   | 32.9 | 32.8 | 33.5 | 34.1 | 32.9 | 34   | 32.3 | 32.7 | 33.4 | 31.9 | 33.2 | 31.5 | 27.7 | 28.4 | 24.9 | 32.1 | 32.5 | 31.3 |      |
| 2017 | 11 | 31.4 | 32.2 | 31.4 | 32   | 30.4 | 32.3 | 32.9 | 33.4 | 33.2 | 31.8 | 32.7 | 33.4 | 31.2 | 33.2 | 30.2 | 26.1 | 33.2 | 31.7 | 31.8 | 32.1 | 31.3 | 30.4 | 31.7 | 32.1 | 30.4 | 29.9 | 31.7 | 31.3 | 29.4 | 30.2 |      |      |
| 2017 | 12 | 31.9 | 32.9 | 32.6 | 31.7 | 32.8 | 32.2 | 32.6 | 33   | 31.8 | 33.4 | 28.7 | 28.1 | 28.1 | 27.9 | 29.8 | 32.3 | 33.7 | 33.5 | 33.6 | 33.8 | 32.8 | 32.3 | 33.3 | 33.1 | 33.5 | 33.1 | 32.6 | 32.1 | 31.5 | 32.1 | 30.6 |      |
| 2018 | 1  | 28.1 | 32.5 | 31   | 30.1 | 29.9 | 29.2 | 28.2 | 29.9 | 32.8 | 33.1 | 32   | 33.1 | 32.2 | 30.7 | 28.1 | 28.1 | 28.3 | 29.6 | 30.3 | 30.3 | 31.2 | 32.2 | 32.6 | 31.3 | 32.1 | 31.8 | 32.7 | 33.5 | 33.6 | 33.9 | 32.9 |      |
| 2018 | 2  | 32.4 | 31.7 | 33.2 | 31.8 | 33.6 | 33.8 | 33   | 34.1 | 33.1 | 33.6 | 32.8 | 34.4 | 33   | 34   | 33   | 32.2 | 32   | 31.3 | 31.6 | 33.6 | 33.1 | 33.2 | 32.9 | 33.5 | 33.5 | 33.2 | 32.8 | 32.7 |      |      |      |      |
| 2018 | 3  | 33.5 | 33.8 | 33.2 | 33.2 | 31.7 | 33.1 | 32.6 | 31.9 | 31.8 | 31.8 | 34   | 35.5 | 34.2 | 34.2 | 33.3 | 34   | 34.4 | 34   | 35.2 | 35   | 35   | 34.5 | 32.9 | 33.5 | 33.5 | 33.2 | 33.8 | 34.6 | 33.9 | 34.5 | 34.5 | 33.1 |
| 2018 | 4  | 33.8 | 34.5 | 34   | 34.4 | 34.3 | 35   | 34.4 | 33.8 | 34.9 | 34.4 | 35.1 | 32.8 | 34.6 | 34.5 | 35.7 | 35.2 | 34.7 | 32.6 | 34.1 | 33.8 | 33.2 | 34.5 | 34.2 | 34.7 | 34.2 | 34.5 | 35.2 | 35.9 | 36   | 35.3 |      |      |
| 2018 | 5  | 32.7 | 29.9 | 35.2 | 33.4 | 34.4 | 36.1 | 35.5 | 36.3 | 34.9 | 35   | 35.2 | 33   | 34.2 | 34.2 | 35   | 32.5 | 34.5 | 33.5 | 34.8 | 31.5 | 31.4 | 33.8 | 28.7 | 33.3 | 34   | 35   | 28.8 | 29.4 | 34.9 | 34.5 | 34.8 |      |
| 2018 | 6  | 34   | 33.8 | 31.6 | 34.9 | 32.6 | 31.6 | 31.6 | 31.8 | 33.5 | 32.8 | 32   | 32.1 | 32.2 | 34.2 | 33.5 | 33.9 | 31.8 | 33   | 34.1 | 28.3 | 33.2 | 32.7 | 33.8 | 33.5 | 31.6 | 32.4 | 32.7 | 29.9 | 30.2 | 33.6 |      |      |
| 2018 | 7  | 32.9 | 31.2 | 32.1 | 31.5 | 31.3 | 32   | 32.5 | 32.5 | 32.2 | 32.8 | 32.1 | 30.4 | 34.7 | 32   | 31.8 | 31.5 | 31   | 31.4 | 32.1 | 32.8 | 30.1 | 33.7 | 32.6 | 32.5 | 34.1 | 33   | 29.4 | 31.9 | 31.5 | 34.4 | 32.8 |      |
| 2018 | 8  | 33.9 | 31.6 | 31.5 | 32   | 33.8 | 33.1 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 2018 | 9  | 30.9 | 33.2 | 32.4 | 34.2 | 34   | 32.8 | 34.1 | 34.3 | 31.9 | 34.5 | 34.8 | 35   | 35   | 33.9 | 35.1 | 35.1 | 34.6 | 34.6 | 33.4 | 33.8 | 30.4 | 33.2 | 34.1 | 32.4 | 32.8 | 32.7 | 34   | 33.6 | 34.2 | 32.9 |      |      |
| 2018 | 10 | 34.1 | 33.4 | 32.1 | 27.8 | 26.1 | 24.9 | 31.2 | 34   | 33   | 31.8 | 32.5 | 32   | 29.4 | 31.2 | 30   | 29.2 | 25.2 | 29.2 | 32   | 33.2 | 32   | 33.1 | 33.2 | 33.9 | 34.1 | 30.9 | 33.5 | 32.5 | 28.2 | 32.7 | 33.6 |      |
| 2018 | 11 | 32.1 | 33.7 | 33.6 | 33.6 | 32.9 | 32.2 | 33.3 | 33.6 | 34.1 | 33   | 32.4 | 31.6 | 34.1 | 33   | 32.2 | 31.1 | 30.7 | 32.3 | 33.3 | 32.5 | 31.2 | 31.4 | 33.8 | 34.1 | 34   | 34.1 | 34.4 | 31.6 | 32.9 | 32.2 |      |      |
| 2018 | 12 | 33.8 | 33.2 | 32.8 | 34.2 | 32.5 | 32.5 | 32.5 | 33.6 | 34.3 | 33.2 | 32.7 | 30.3 | 32.8 | 33.8 | 33.8 | 34   | 32.8 | 32.7 | 31.8 | 34.1 | 34.3 | 33.3 | 26.9 | 32.1 | 32.4 | 32.5 | 33.4 | 32.8 | 32.8 | 32.6 | 33.1 |      |
| 2019 | 1  | 33.2 | 33.3 | 31.8 | 32.6 | 33.3 | 32.9 | 32.8 | 32.7 | 32.2 | 32.5 | 31.6 | 32.5 | 30.8 | 32.1 | 31.7 | 32.3 | 32.4 | 33.1 | 33.4 | 32.7 | 32.1 | 31.8 | 32.6 | 32.6 | 33.2 | 33.2 | 33.4 | 35.2 | 33.4 | 33   | 33.5 |      |
| 2019 | 2  | 33.3 | 33   | 33.5 | 33.9 | 33.5 | 33.1 | 33.1 | 33.3 | 33.1 | 33   | 33.4 | 37.1 | 34.7 | 33.7 | 33.8 | 34.2 | 36.1 | 36.5 | 35.1 | 34.6 | 34.8 | 35.3 | 34.3 | 33.4 | 34.7 | 31.1 | 32.1 | 33.5 |      |      |      |      |
| 2019 | 3  | 33.9 | 33.9 | 34.2 | 33.5 | 33   | 34   | 33.4 | 33.9 | 33.5 | 34.1 | 33   | 33.6 | 33.2 | 34.2 | 34   | 32.9 | 32.8 | 31.6 | 33   | 32.7 | 32.7 | 33.2 | 32.9 | 32.6 | 32.8 | 32.5 | 33.5 | 32.7 | 34.4 | 32.1 | 33.2 |      |
| 2019 | 4  | 35   | 35.1 | 34.7 | 34.7 | 33.5 | 32.9 | 34.6 | 33.6 | 36   | 37.5 | 36.8 | 35.6 | 36   | 36.3 | 35.7 | 35.1 | 34.1 | 34.8 | 35   | 34.9 | 35.1 | 35   | 34.2 | 34.4 | 35   | 35.8 | 36.8 | 34.9 | 34.2 | 34.3 |      |      |
| 2019 | 5  | 34.8 | 34.8 | 34.4 | 34.3 | 34.5 | 35.9 | 35   | 32.7 | 34.2 | 34.5 | 35.1 | 33.9 | 35.5 | 35.9 | 35.3 | 36.6 | 35.9 | 34.6 | 34.3 | 34.5 | 30.9 | 31.8 | 29.5 | 32   | 29.5 | 32.3 | 28.5 | 24.9 | 28.3 |      |      |      |

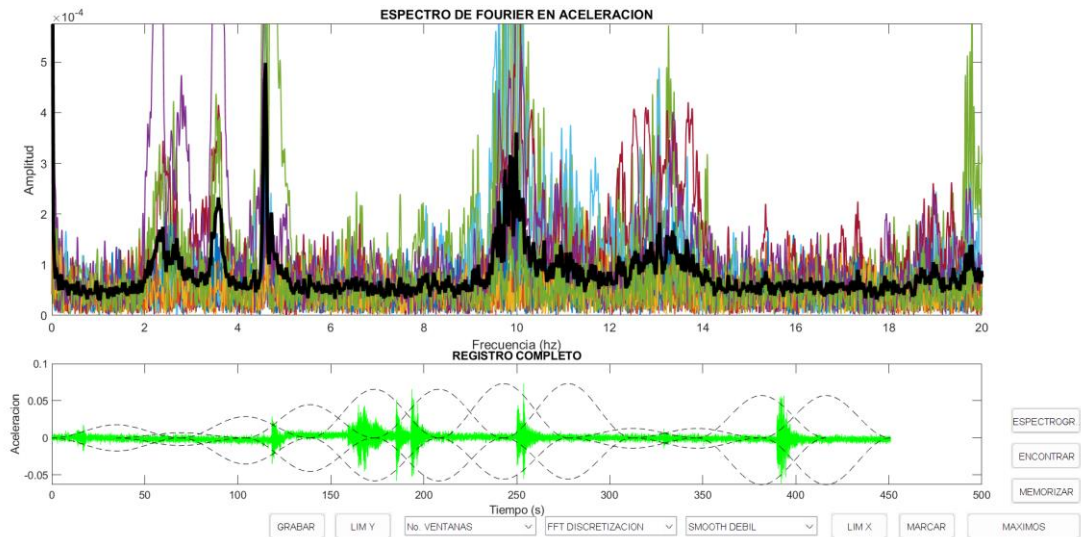
**CERCHA 1**  
**SITIO A**  
**CH1A-01-43**

Anexo 4.CH1A-01-43-R90-120



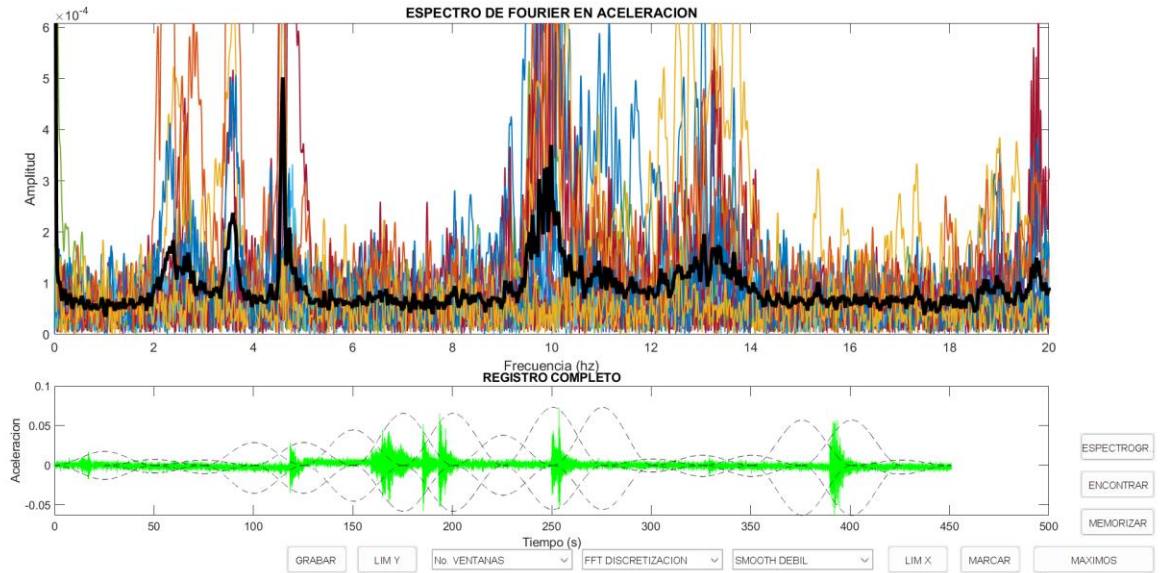
Fuente: Propia

Anexo 5.CH1A-01-43-R60-90



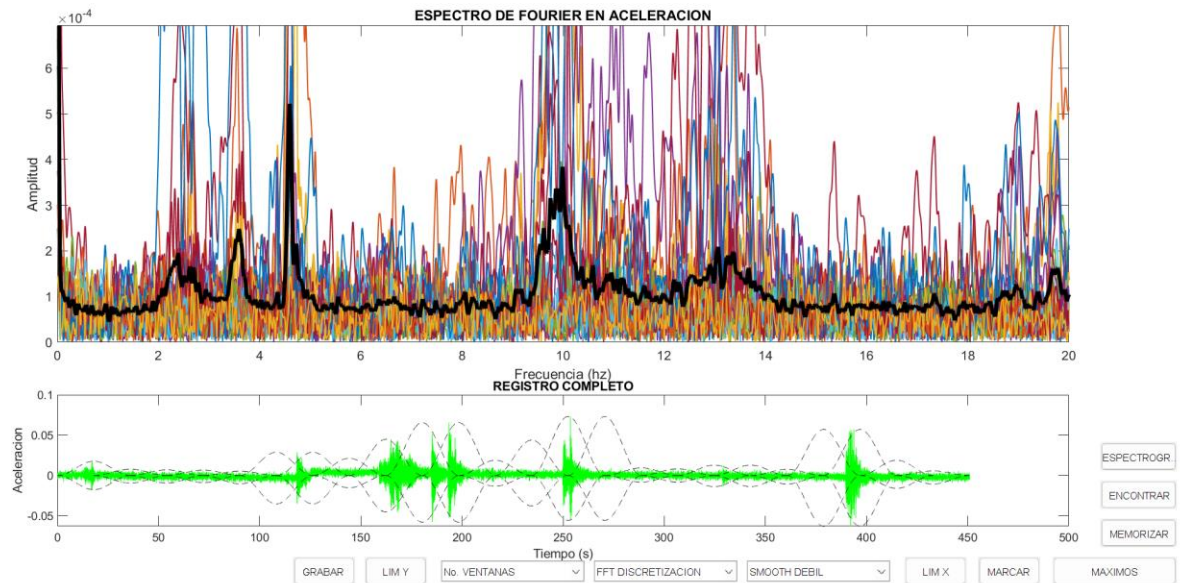
Fuente: Propia

Anexo 6.CH1A-01-43-R45-60



Fuente: Propia

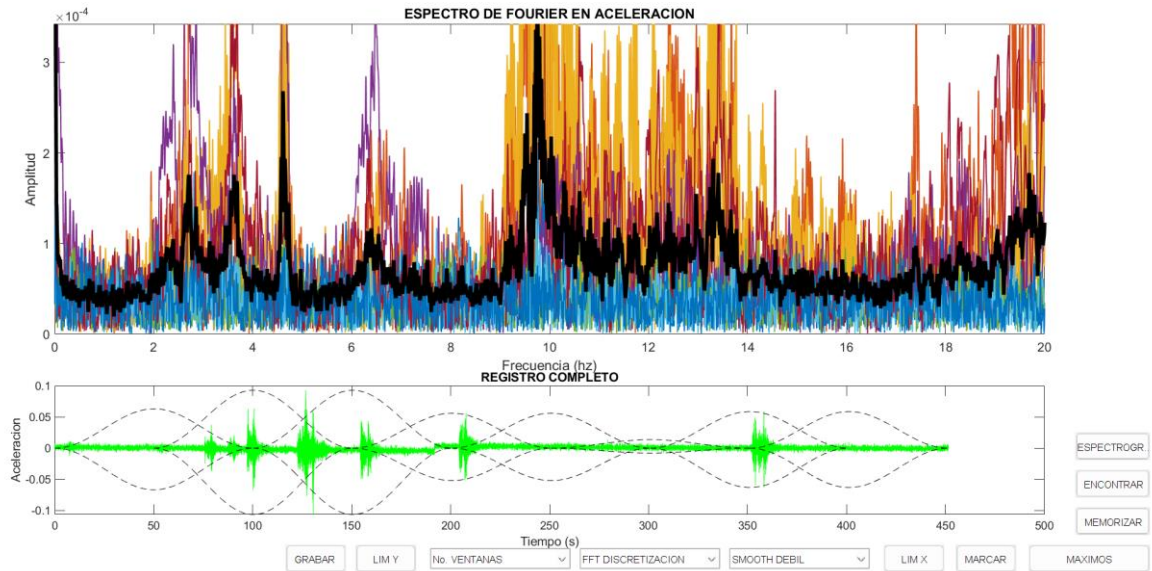
Anexo 7.CH1A-01-43-R30-45



Fuente: Propia

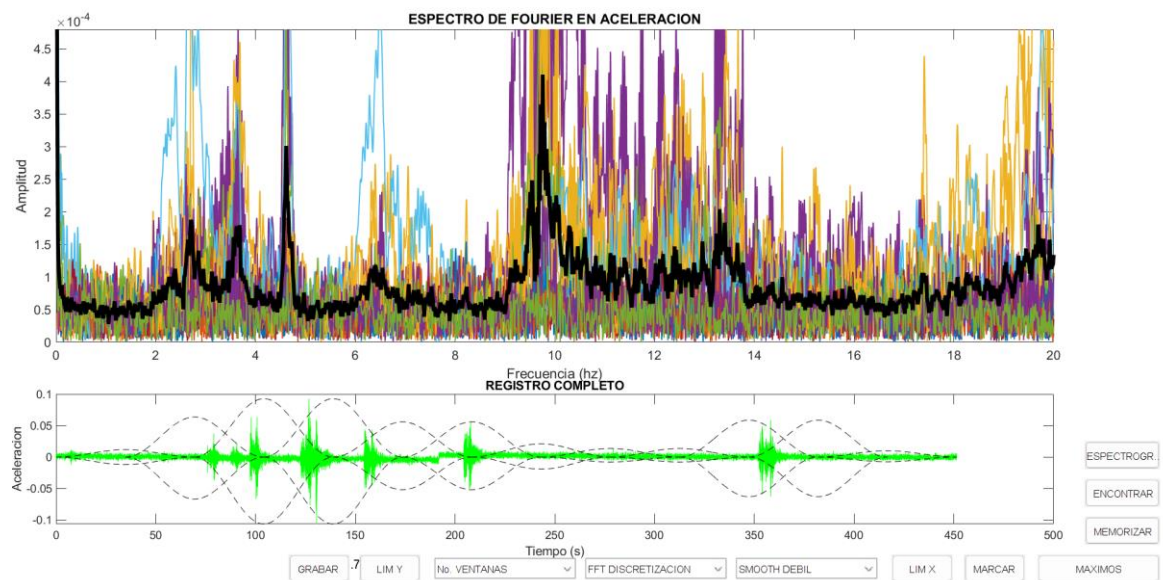
**CERCHA 1**  
**SITIO A**  
**CH1A-03-27**

**Anexo 8CH1A-03-27-R90-120**



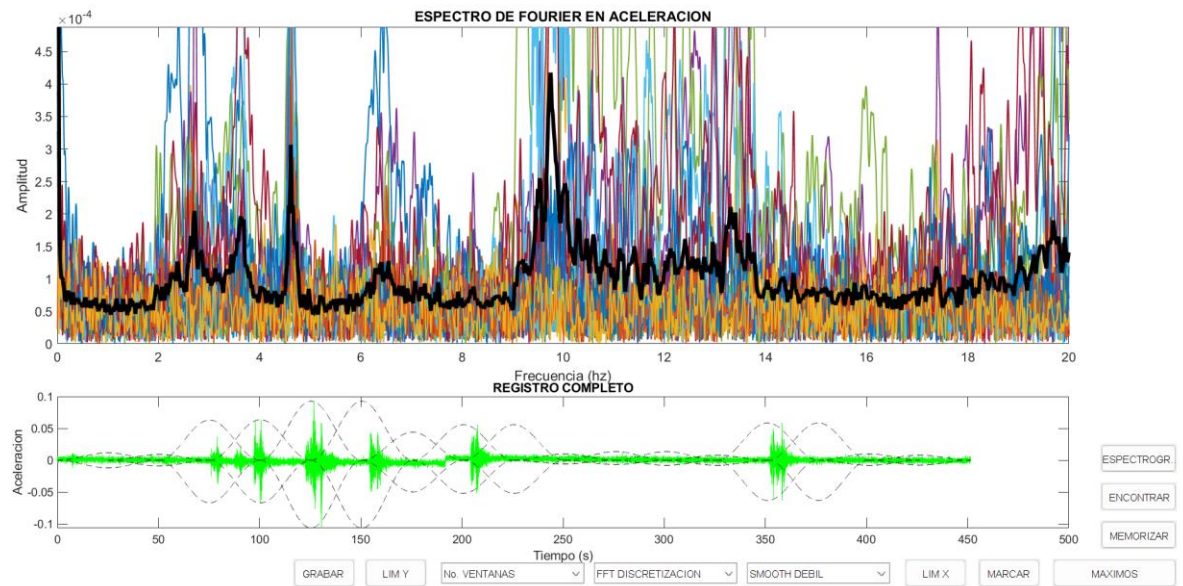
Fuente: Propia

**Anexo 9.CH1A-03-27-R60-90**



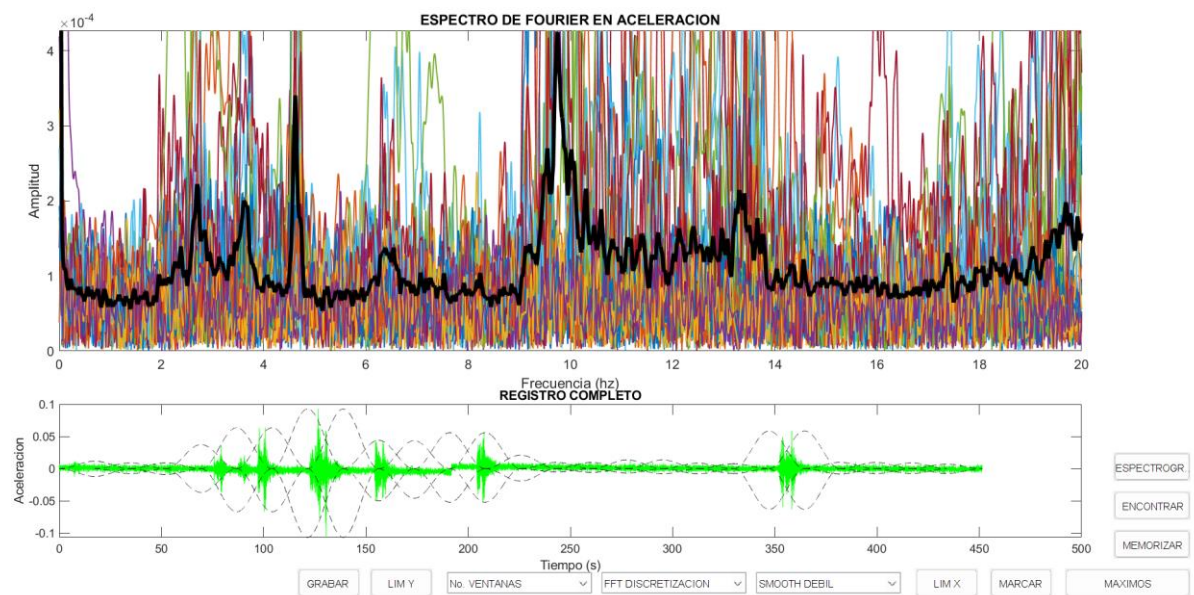
Fuente: Propia

## Anexo 10.CH1A-03-27-R45-60



Fuente: Propia

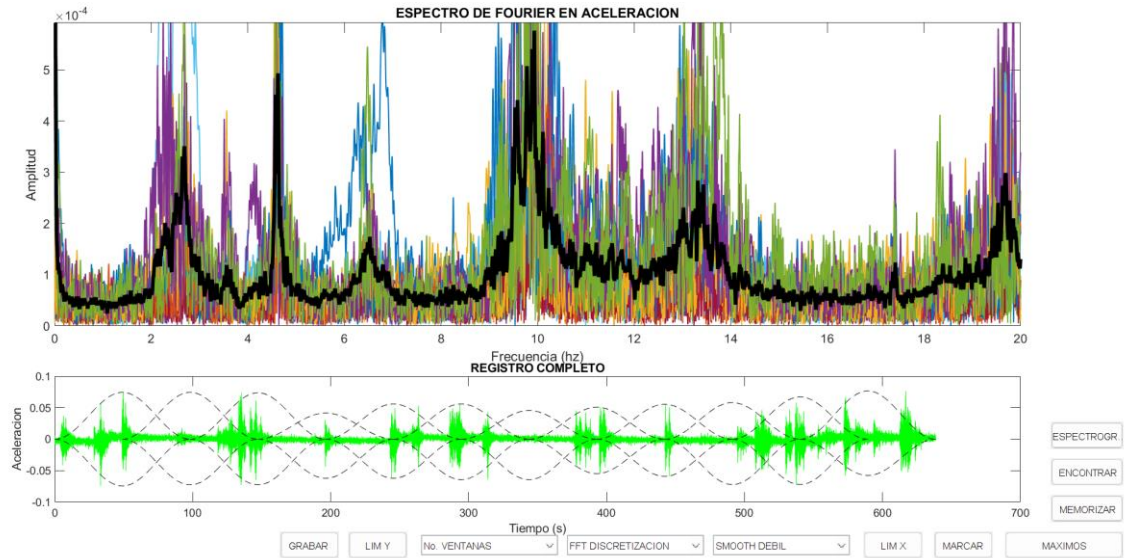
## Anexo 11CH1A-03-27-R30-45



Fuente: Propia

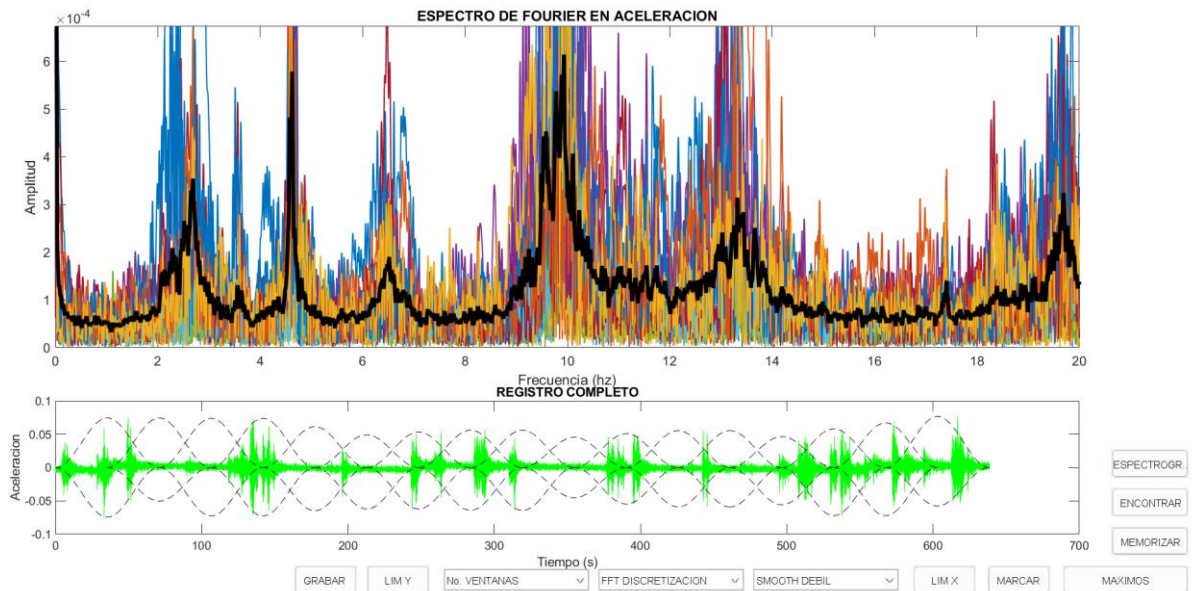
**CERCHA 1**  
**SITIO A**  
**CH1A-05-27**

Anexo 12CH1A-05-27-R90-120



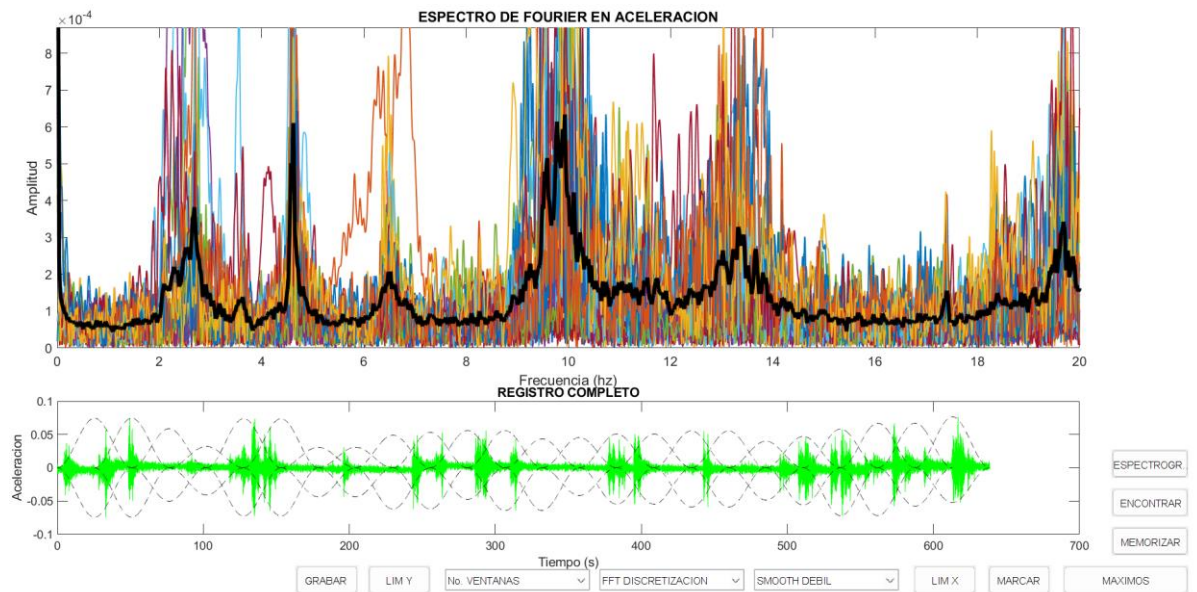
Fuente: Propia

Anexo 13.CH1A-05-27-R60-90



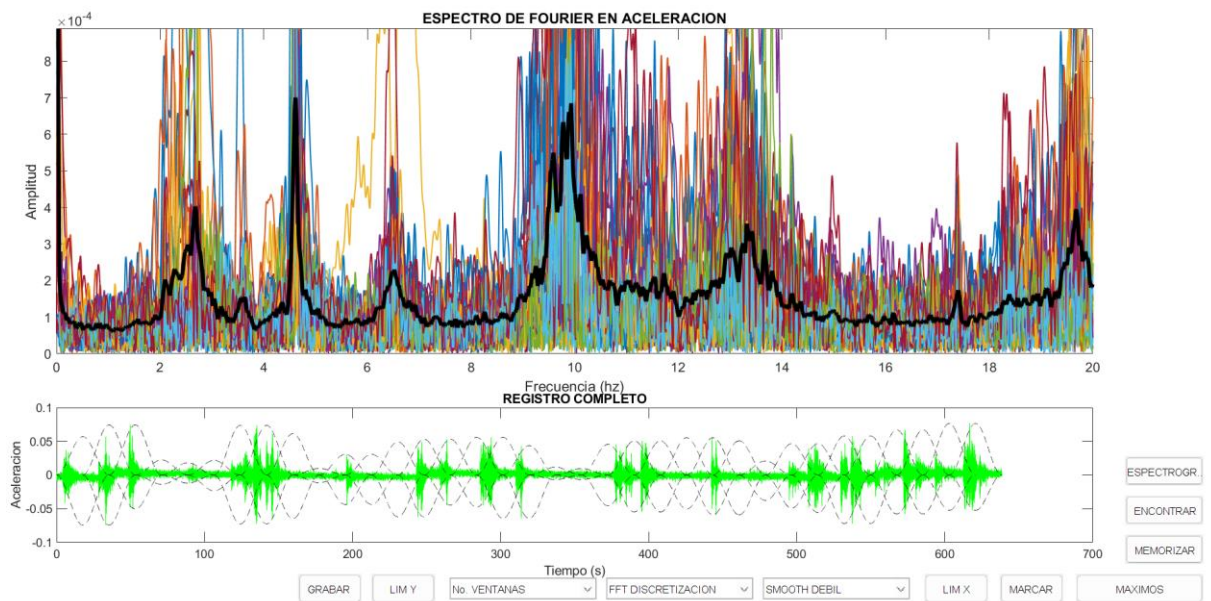
Fuente: Propia

## Anexo 14.CH1A-05-27-R45-60



Fuente: Propia

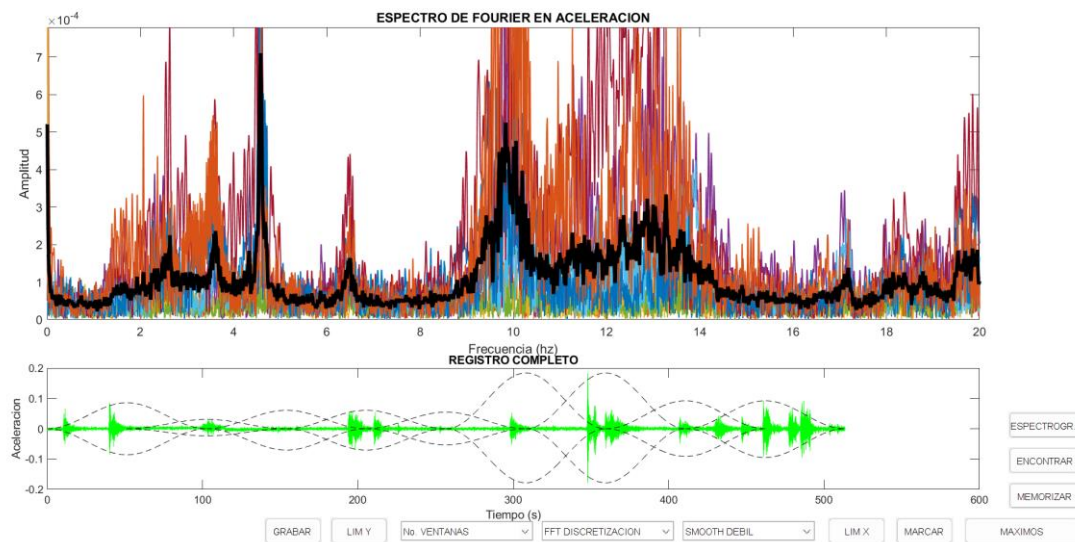
## Anexo 15.CH1A-05-27-R30-45



Fuente: Propia

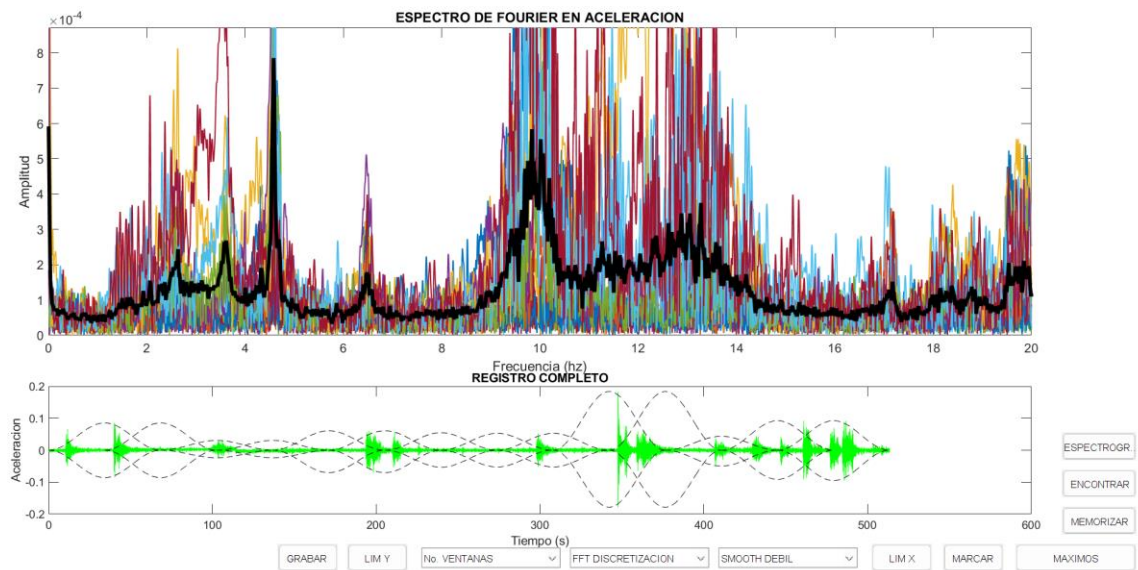
**CERCHA 1**  
**SITIO A**  
**CH1A-07-30**

Anexo 16.CH1A-07-30-R90-120



Fuente: Propia

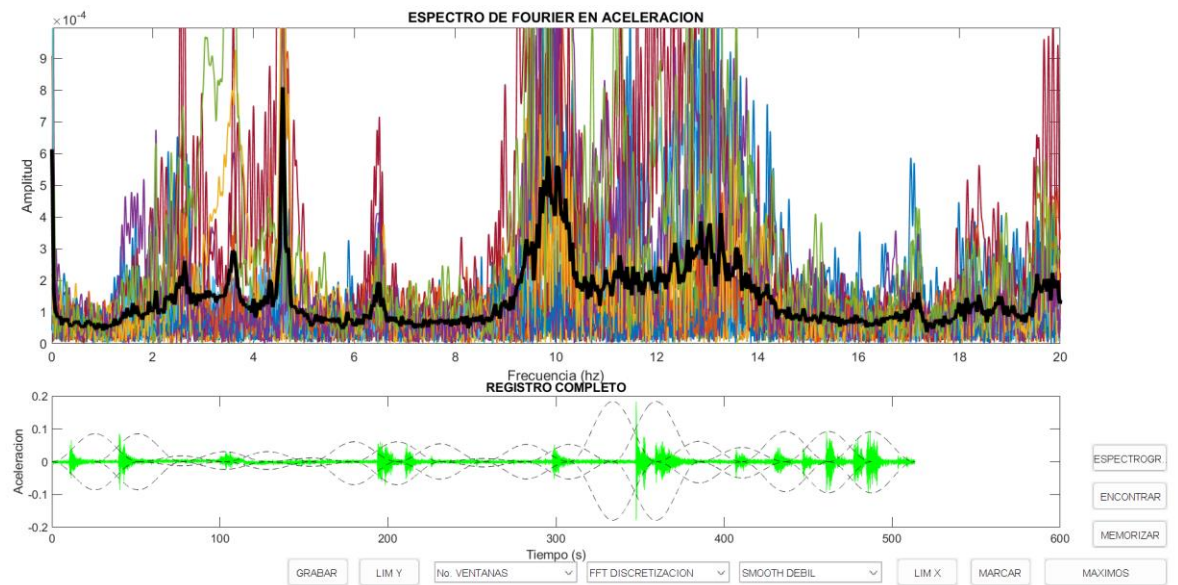
Anexo 17.CH1A-07-30-R60-90



Fuente: Propia

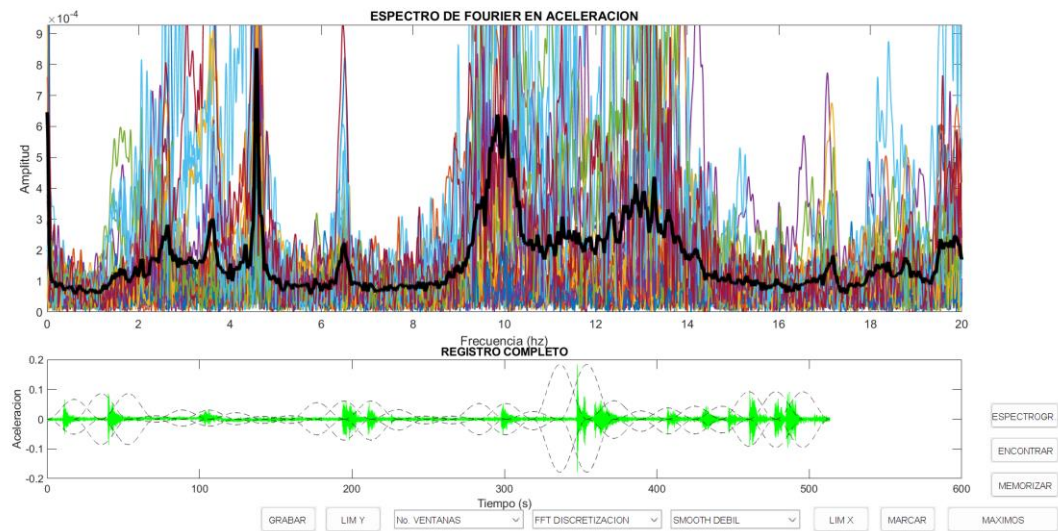


## Anexo 18.CH1A-07-30-R45-60



Fuente: Propia

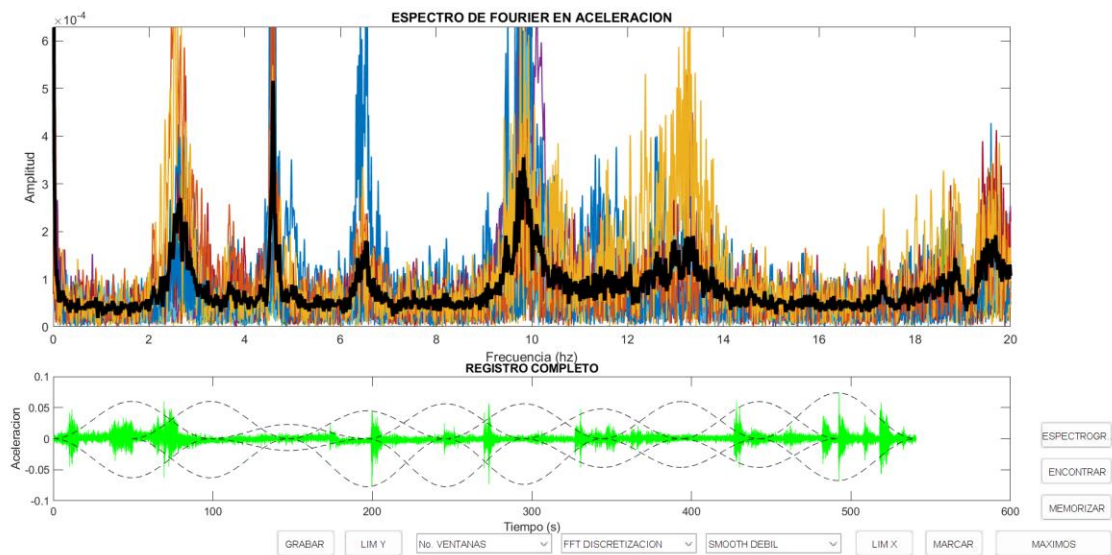
## Anexo 19.CH1A-07-30-R30-45



Fuente: Propia

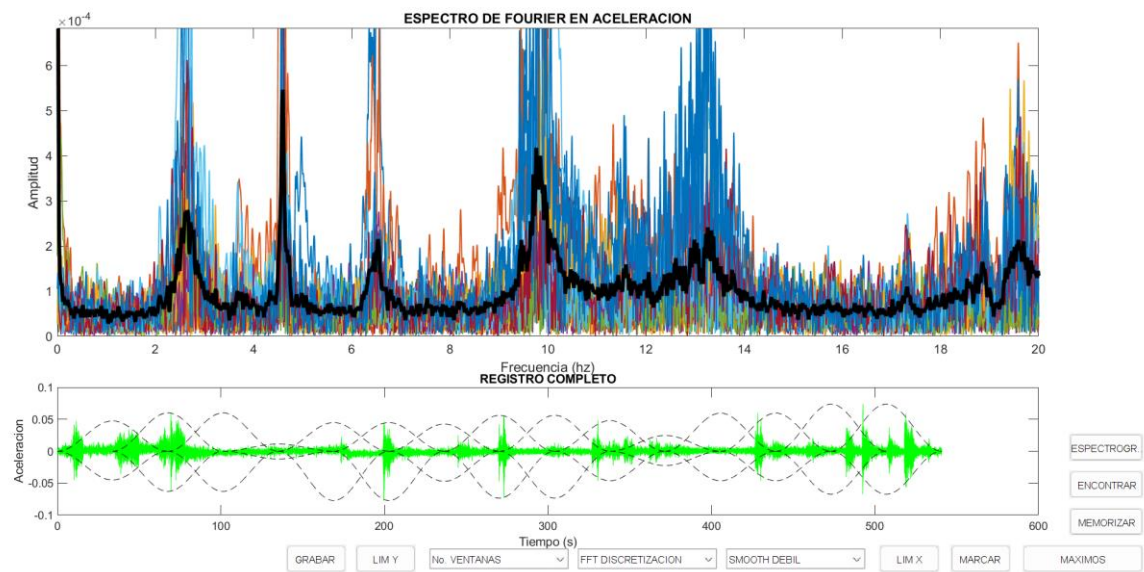
**CERCHA 1**  
**SITIO A**  
**CH1A-09-53**

Anexo 20.CH1A-09-53-R90-120



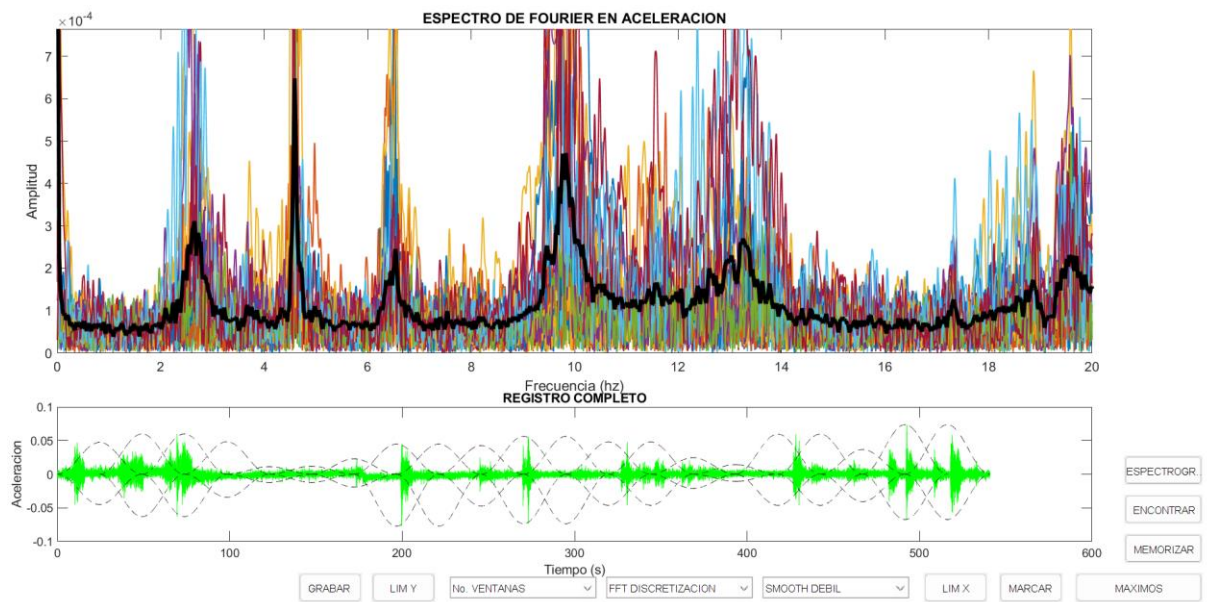
Fuente: Propia

Anexo 21.CH1A-09-53-R60-90



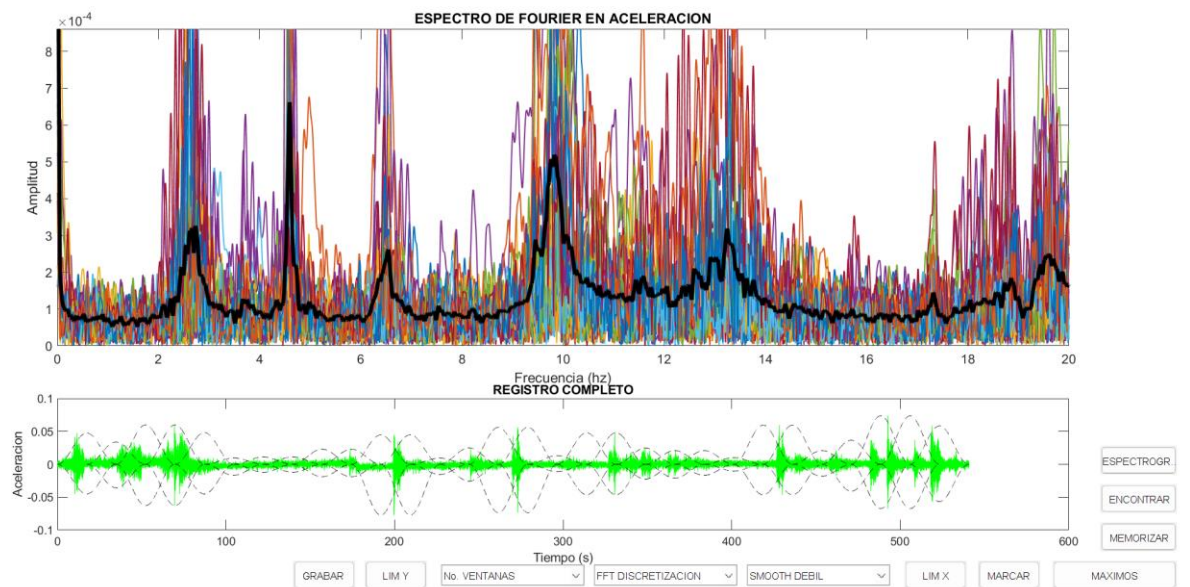
Fuente: Propia

## Anexo 22.CH1A-09-53-R45-60



Fuente: Propia

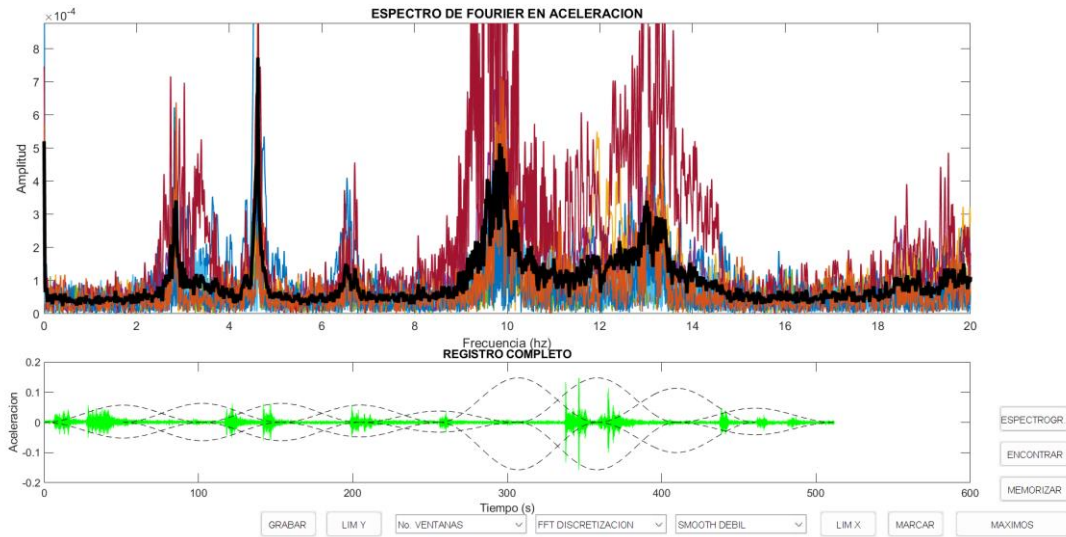
## Anexo 23.CH1A-09-53-R30-45



Fuente: Propia

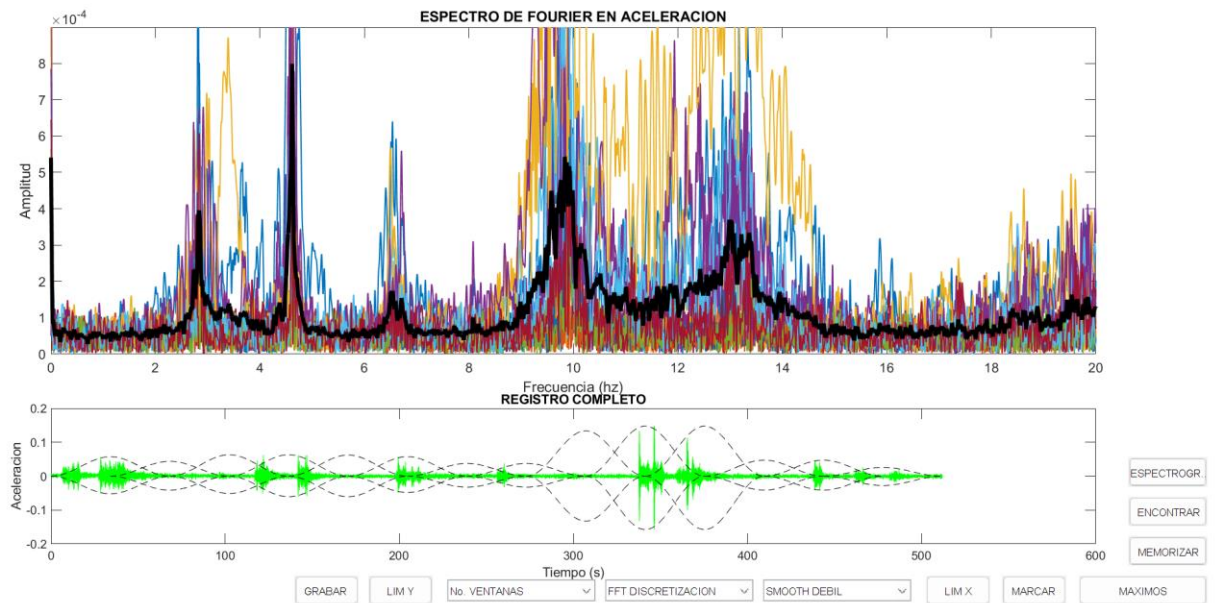
**CERCHA 1**  
**SITIO A**  
**CH1A-11-53**

Anexo 24.CH1A-11-53-R90-120



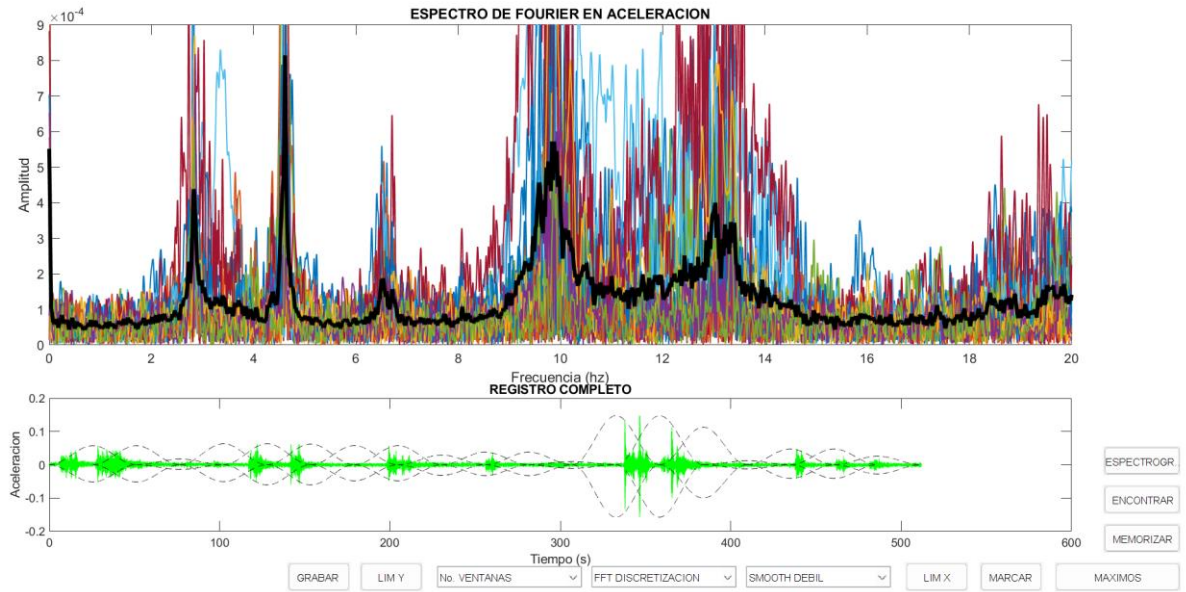
Fuente: Propia

Anexo 25.CH1A-11-53-R60-90



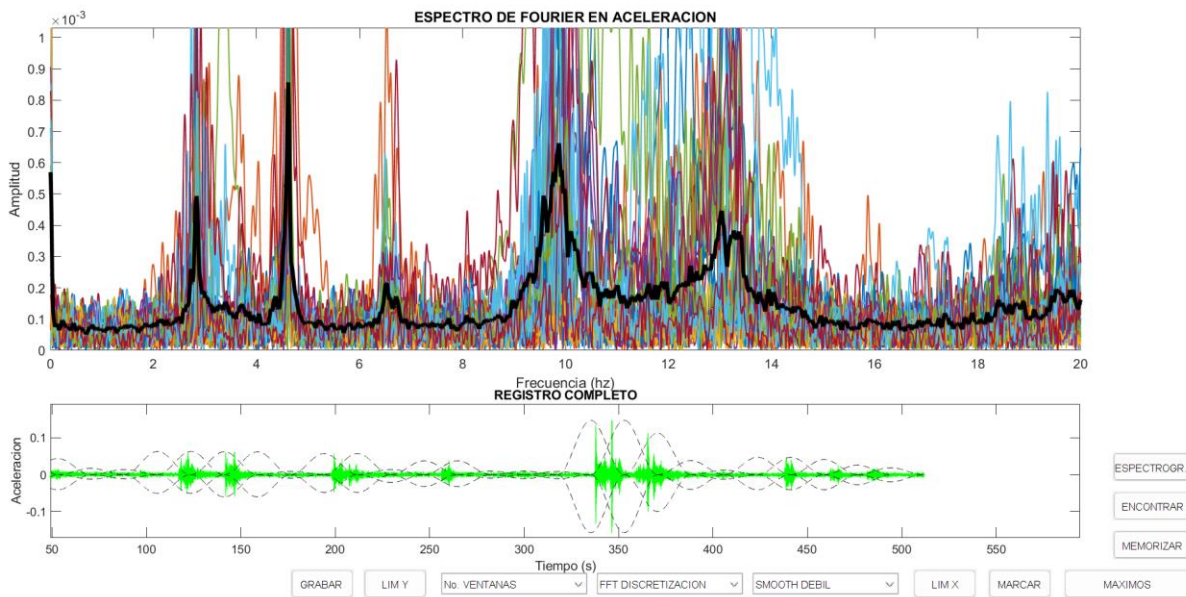
Fuente: Propia

Anexo 26.CH1A-11-53-R45-60



Fuente: Propia

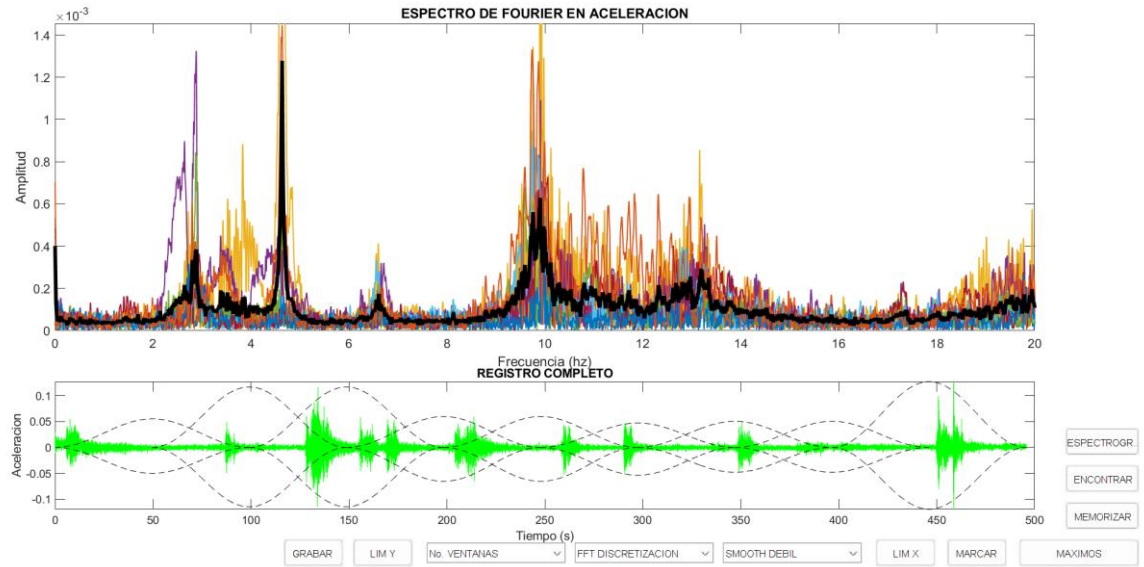
Anexo 27.CH1A-11-53-R30-45



Fuente: Propia

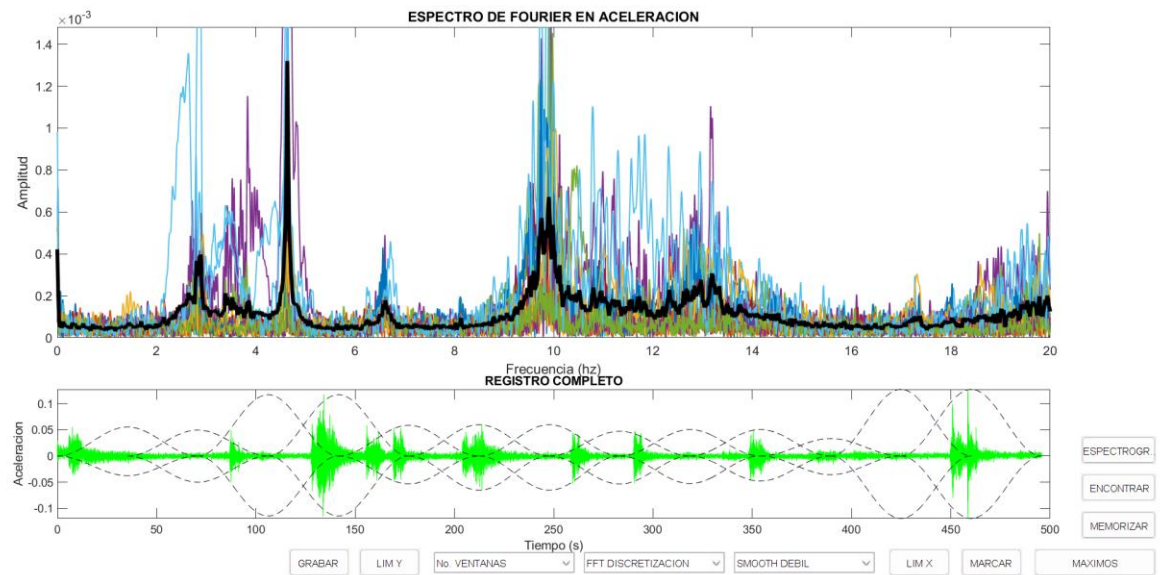
**CERCHA 1**  
**SITIO A**  
**CH1A-13-53**

Anexo 28.CH1A-13-53-R90-120



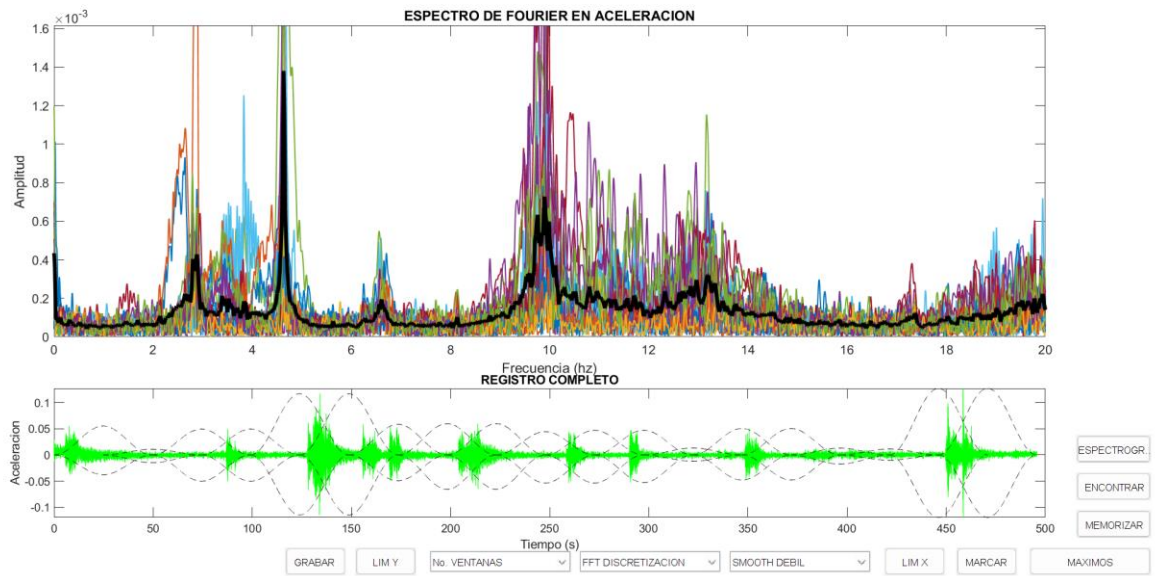
Fuente: Propia

Anexo 29.CH1A-13-53-R60-90



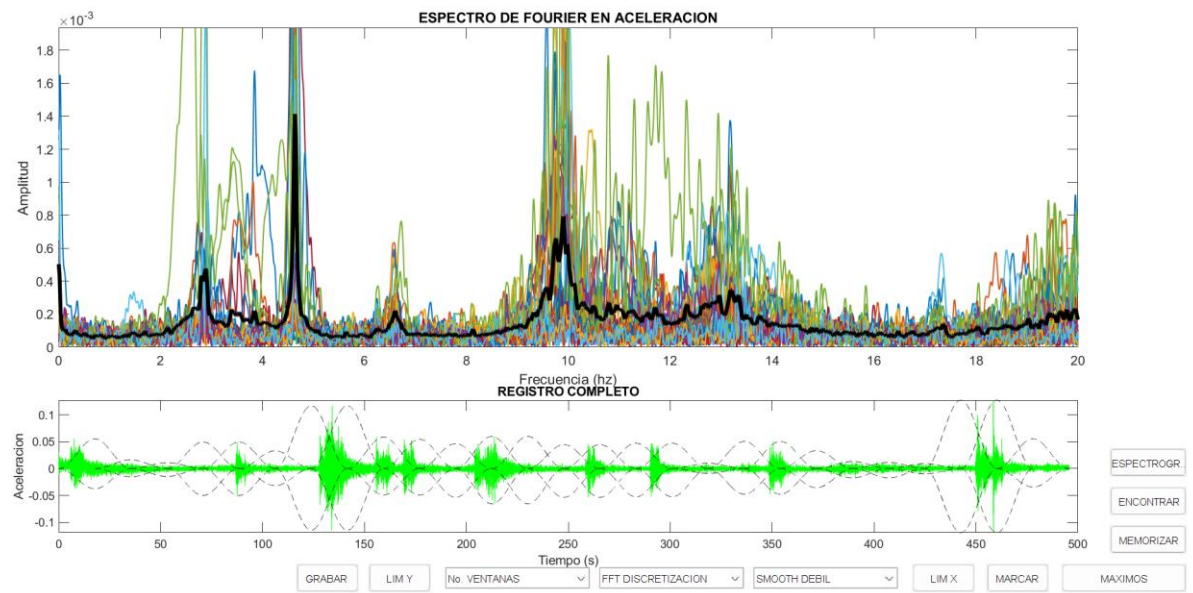
Fuente: Propia

Anexo 30.CH1A-13-53-R45-60



Fuente: Propia

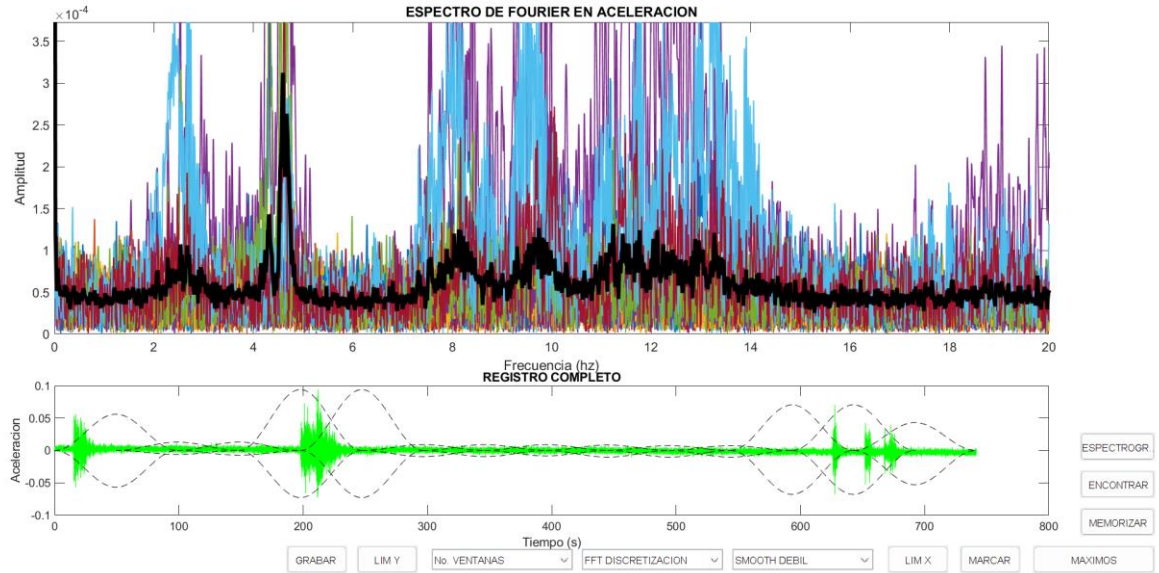
Anexo 31.CH1A-13-53-R30-45



Fuente: Propia

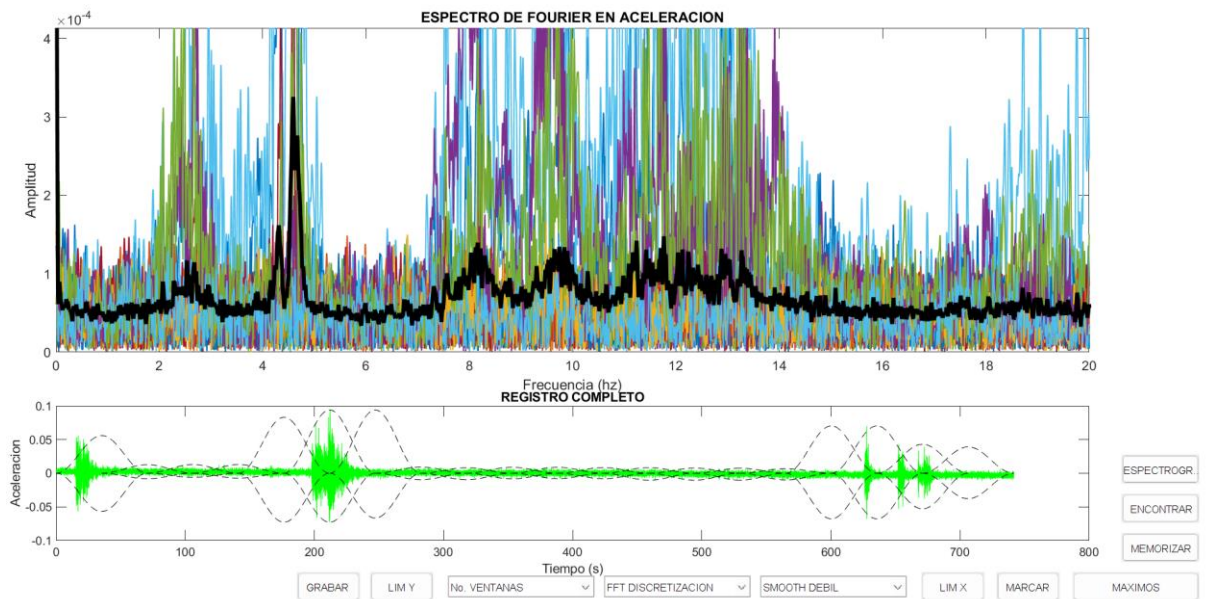
**CERCHA 1**  
**SITIO B**  
**CH1B-01-54**

Anexo 32.CH1B-01-54-R90-120



Fuente: Propia

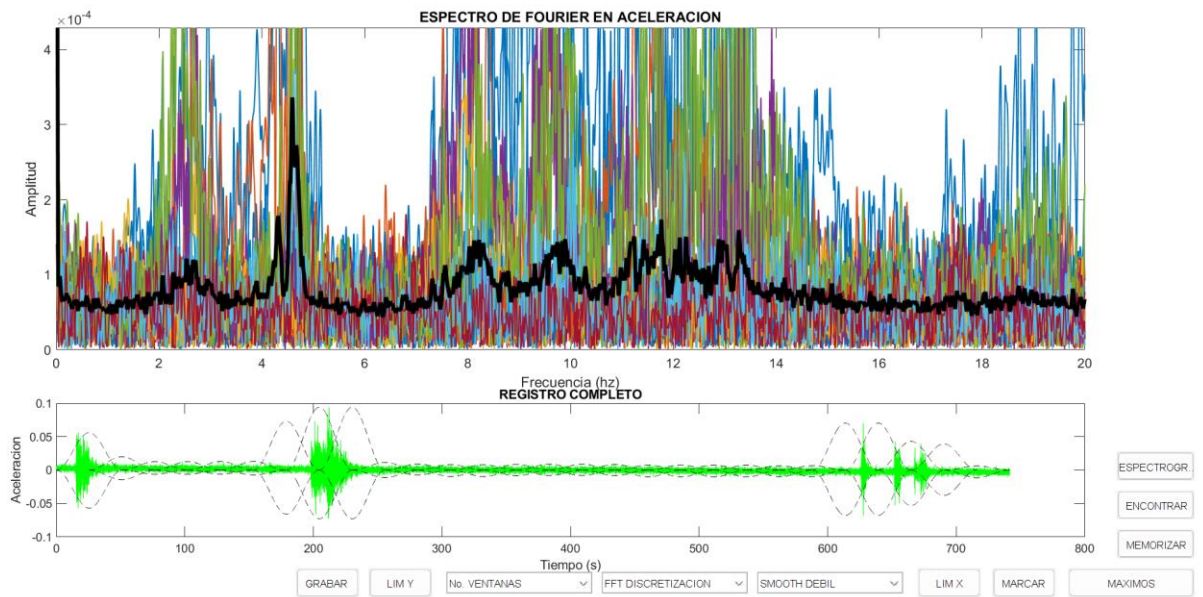
Anexo 33.CH1B-01-54-R60-90



Fuente: Propia

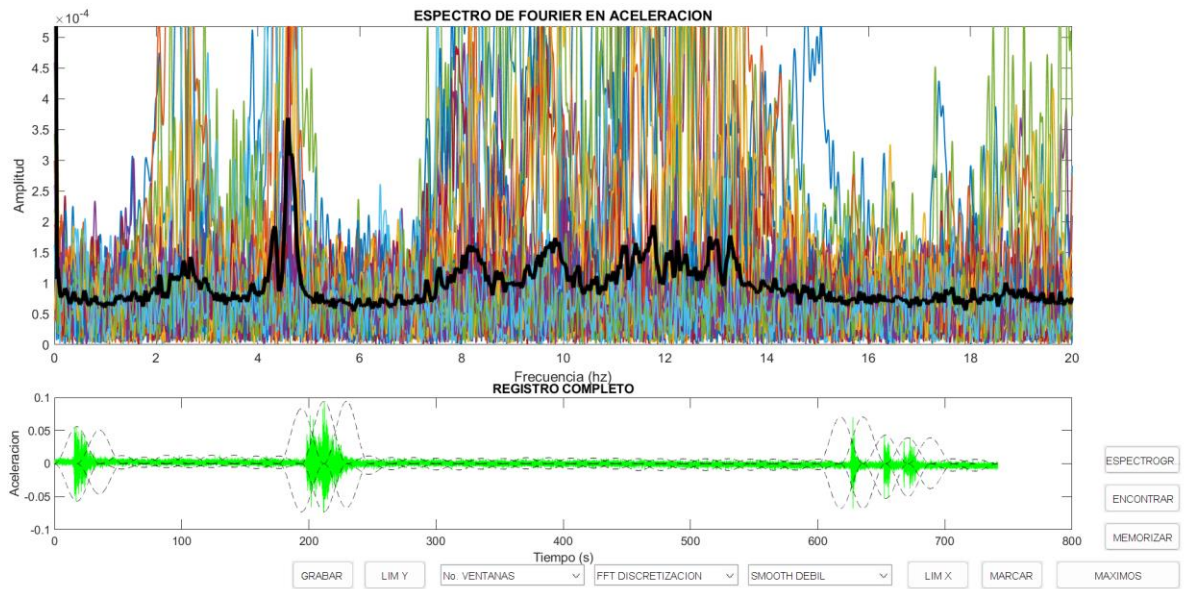


Anexo 34.CH1B-01-54-R45-60



Fuente: Propia

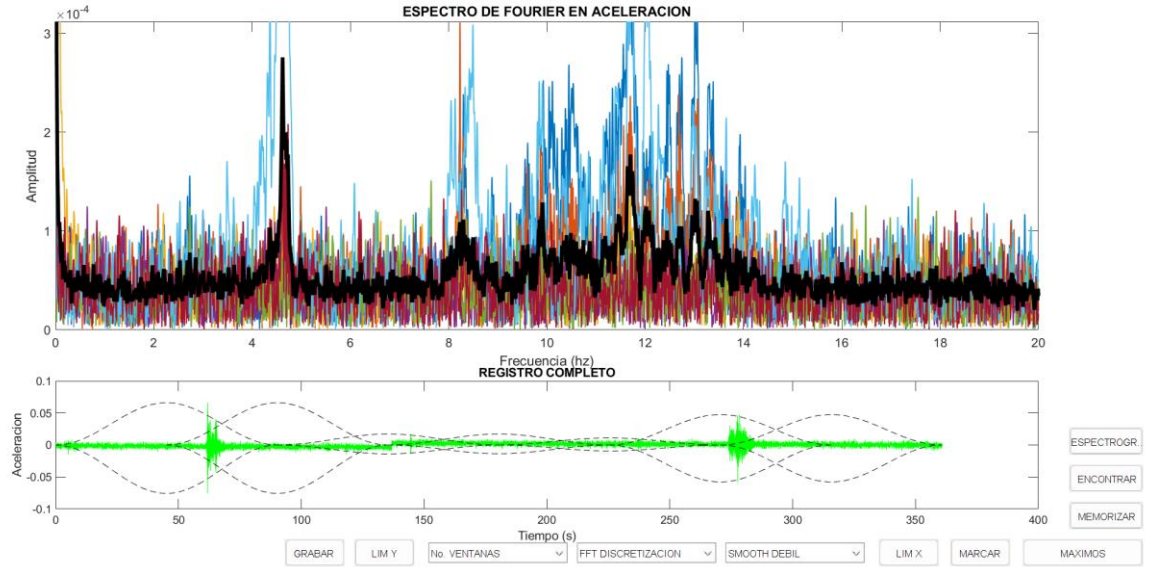
Anexo 35.CH1B-01-54-R30-45



Fuente: Propia

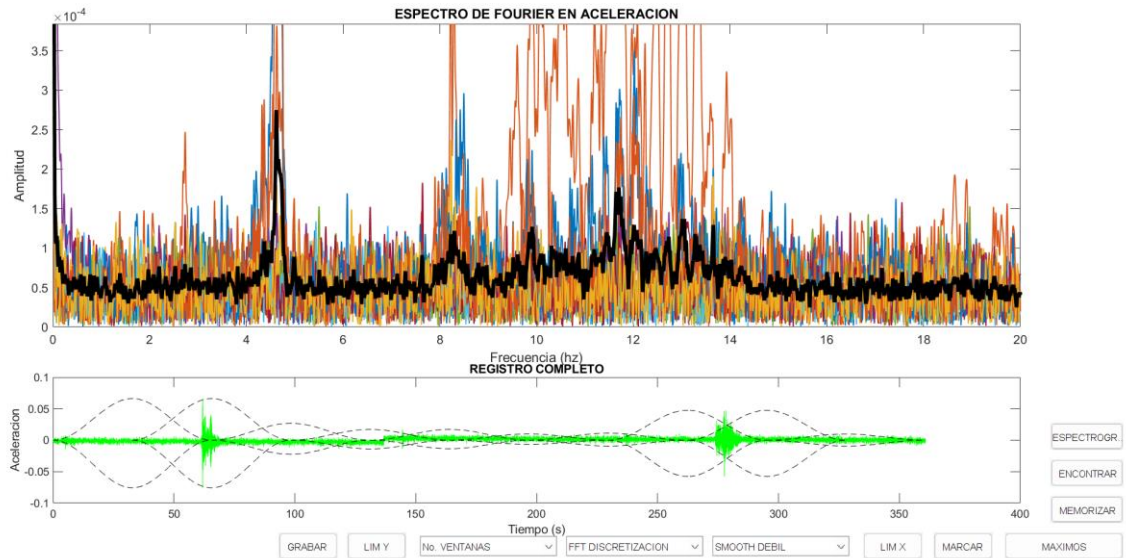
**CERCHA 1**  
**SITIO B**  
**CH1B-03-36**

Anexo 36.CH1B-03-36-R90-120



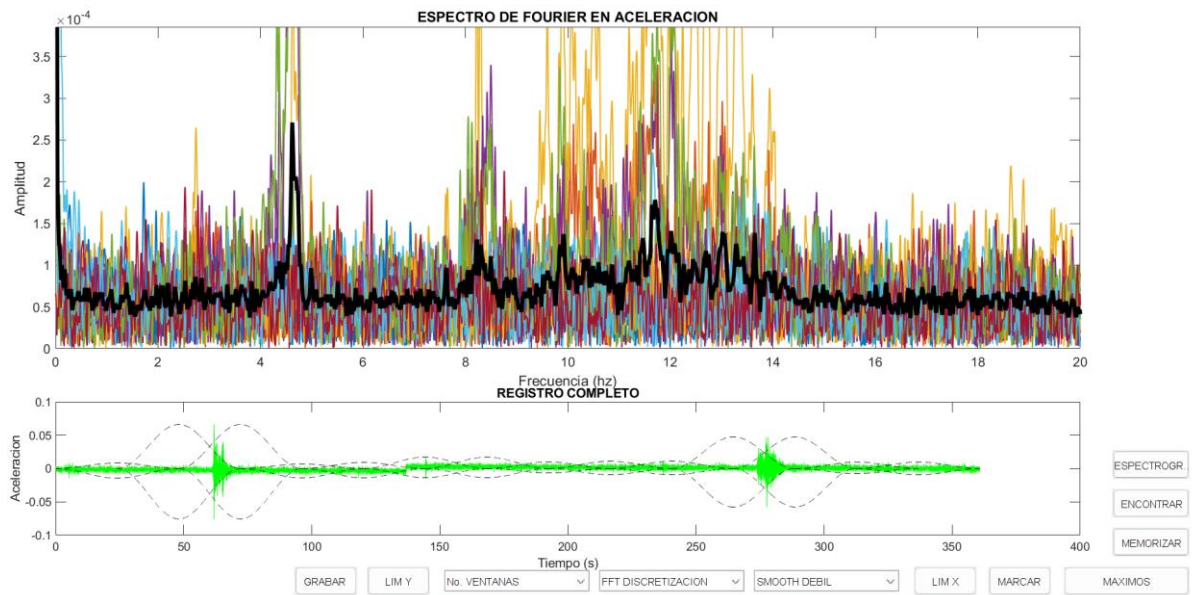
Fuente: Propia

Anexo 37.CH1B-03-36-R60-90



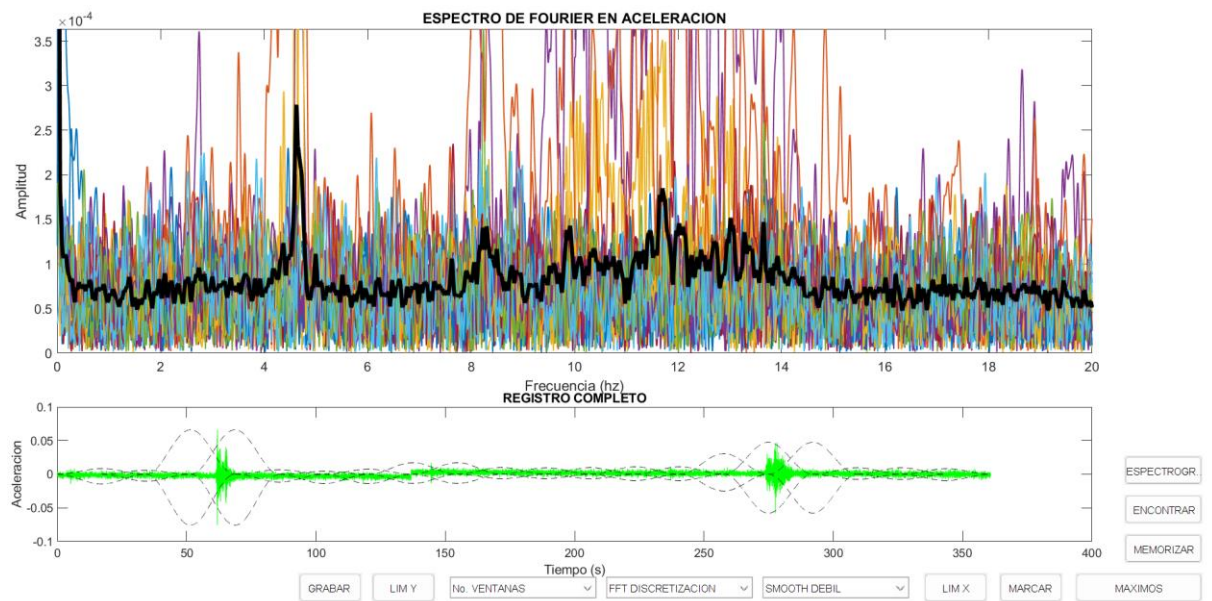
Fuente: Propia

## Anexo 38.CH1B-03-36-R45-60



Fuente: Propia

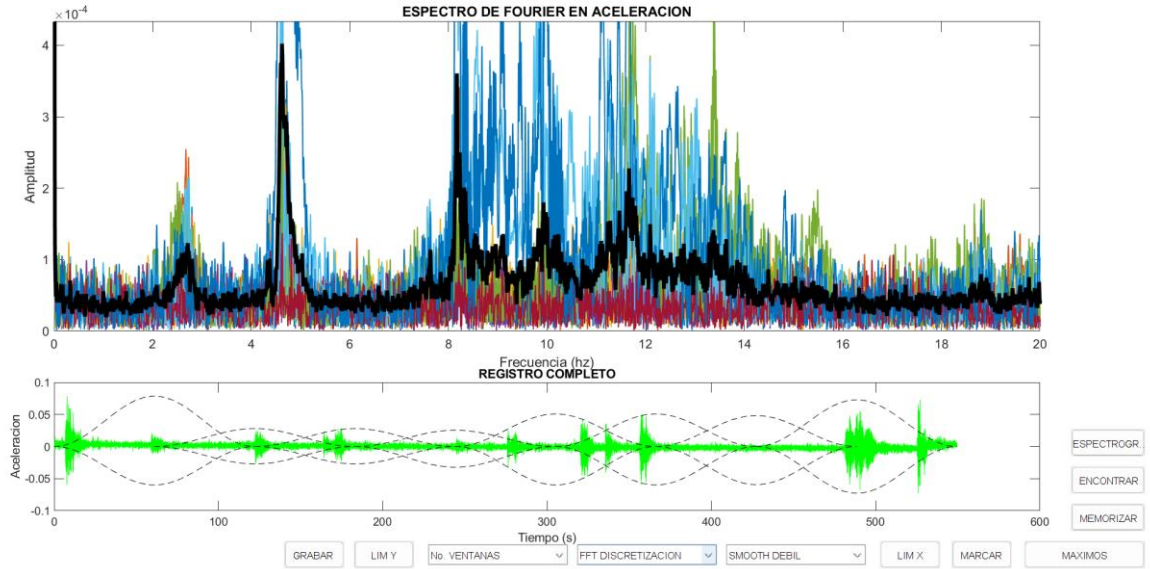
## Anexo 39.CH1B-03-36-R30-45



Fuente: Propia

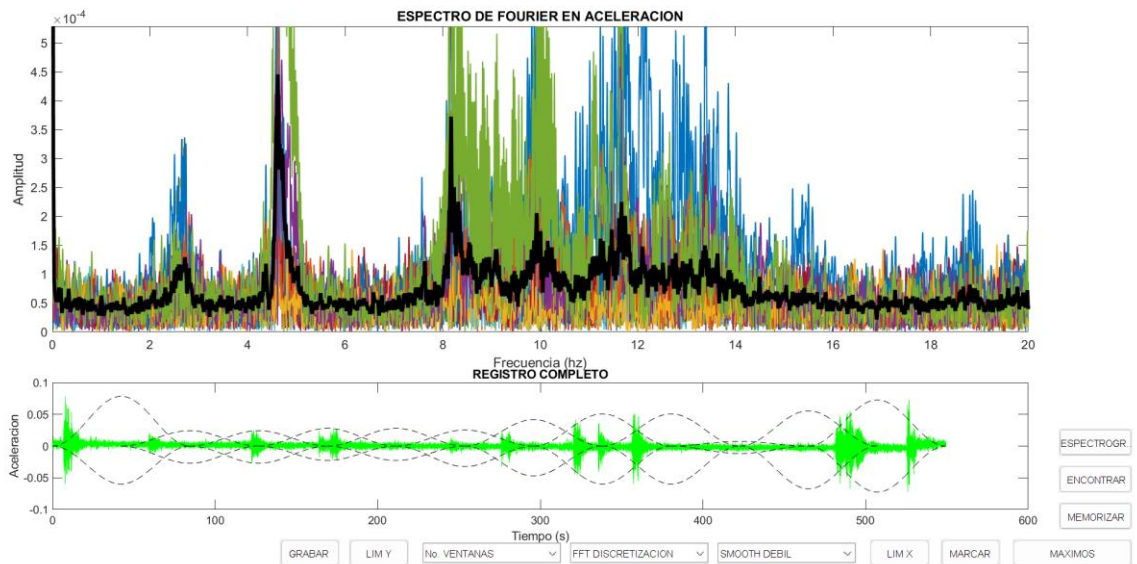
**CERCHA 1**  
**SITIO B**  
**CH1B-05-39**

Anexo 40.CH1B-05-39-R90-120



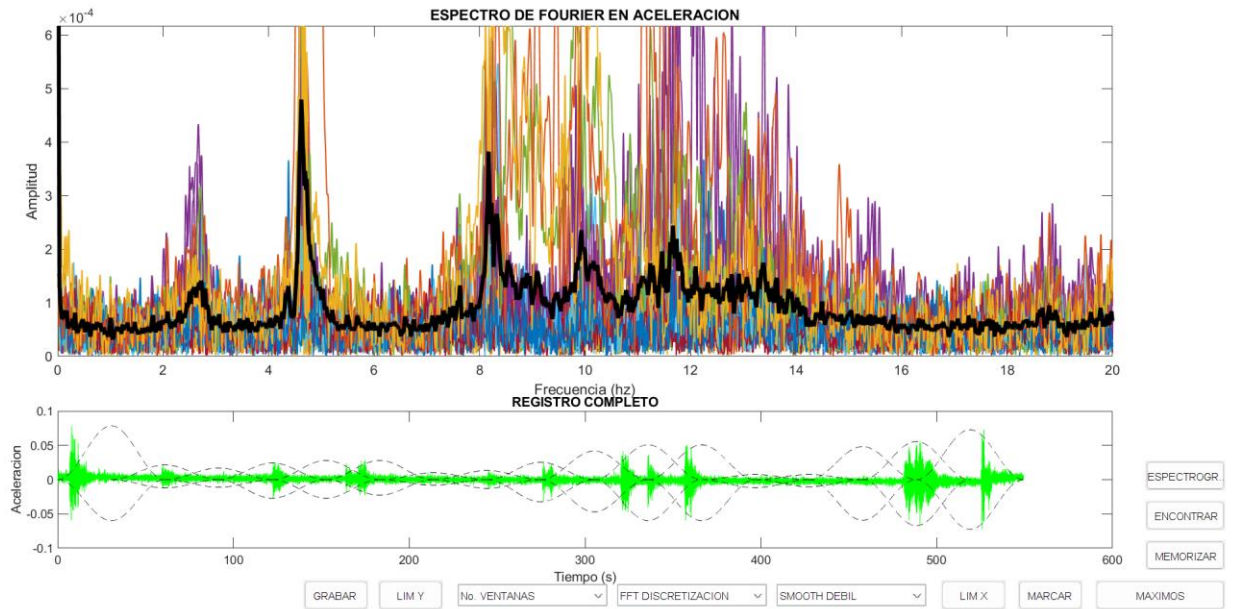
Fuente: Propia

Anexo 41.CH1B-05-39-R60-90



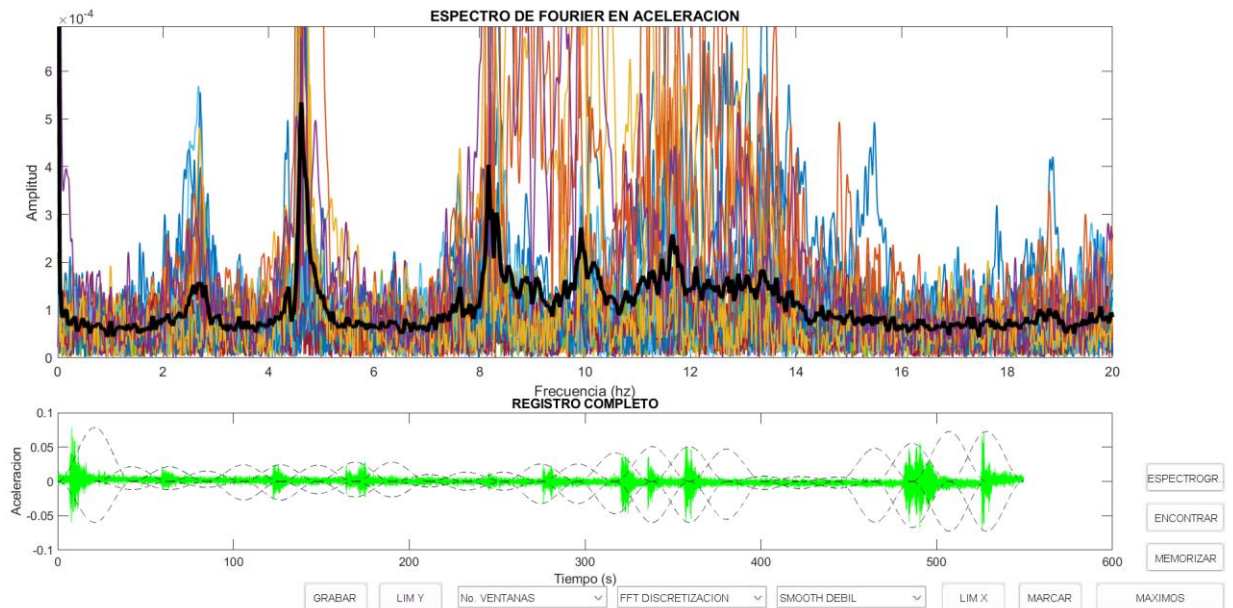
Fuente: Propia

Anexo 42.CH1B-05-39-R45-60



Fuente: Propia

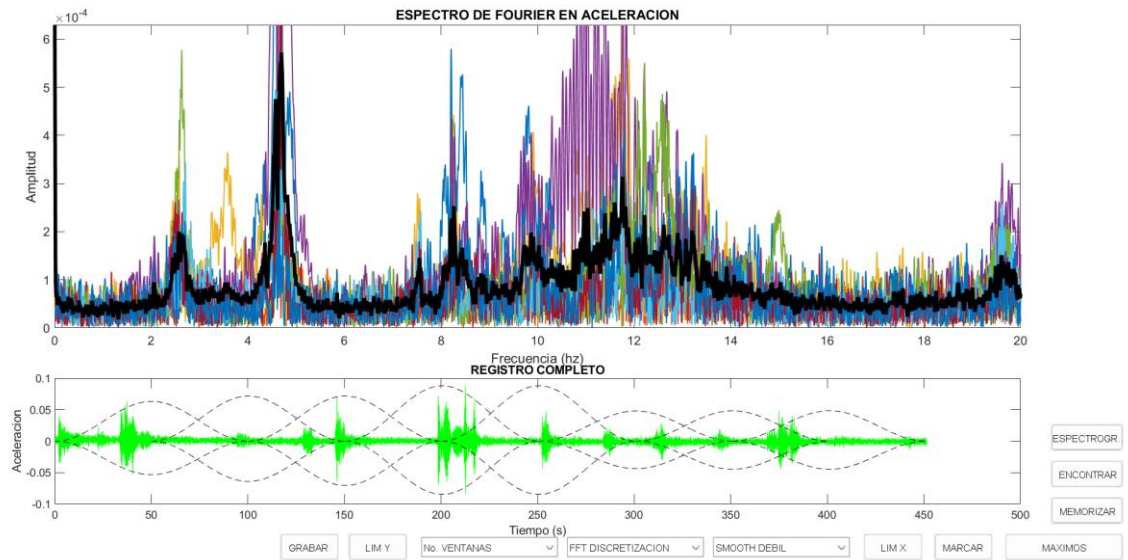
Anexo 43.CH1B-05-39-R30-45



Fuente: Propia

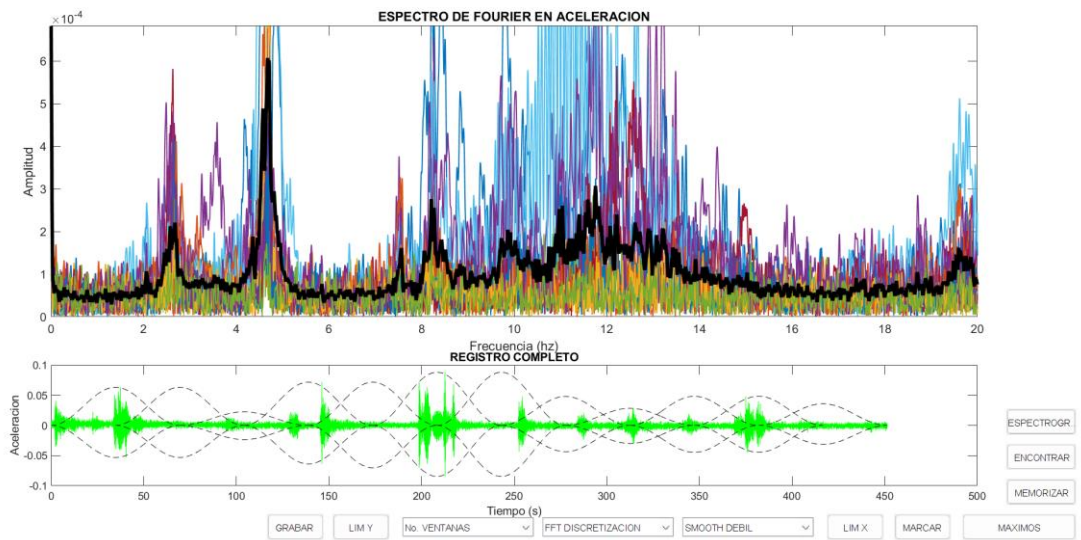
**CERCHA 1**  
**SITIO B**  
**CH1B-07-39**

Anexo 44.CH1B-07-39-R90-120



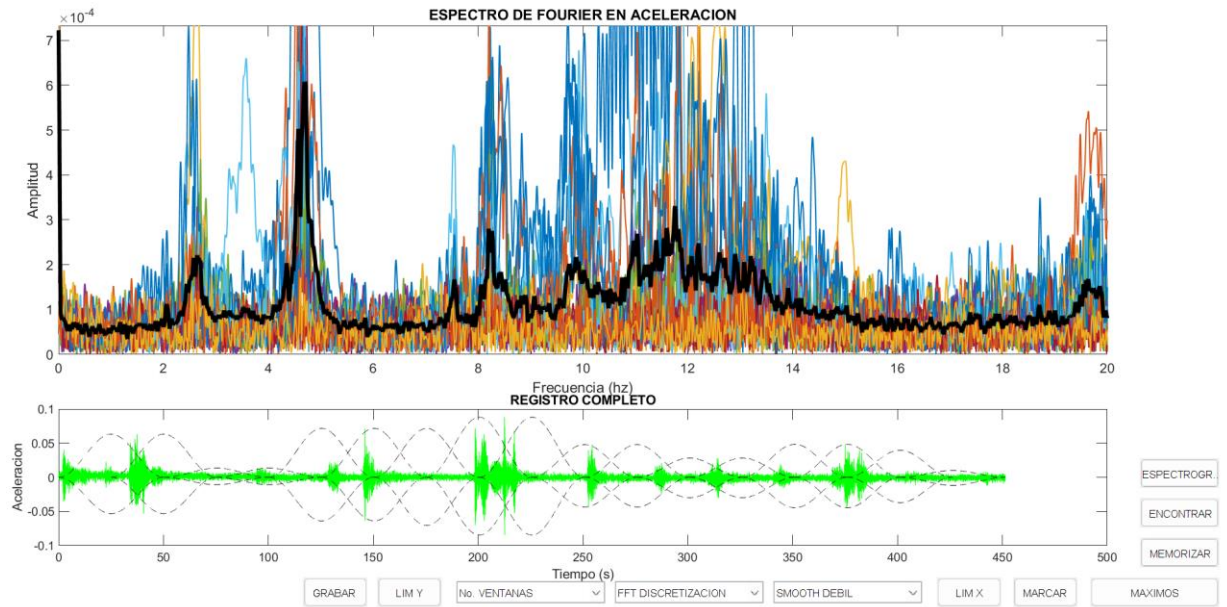
Fuente: Propia

Anexo 45.CH1B-07-39-R60-90



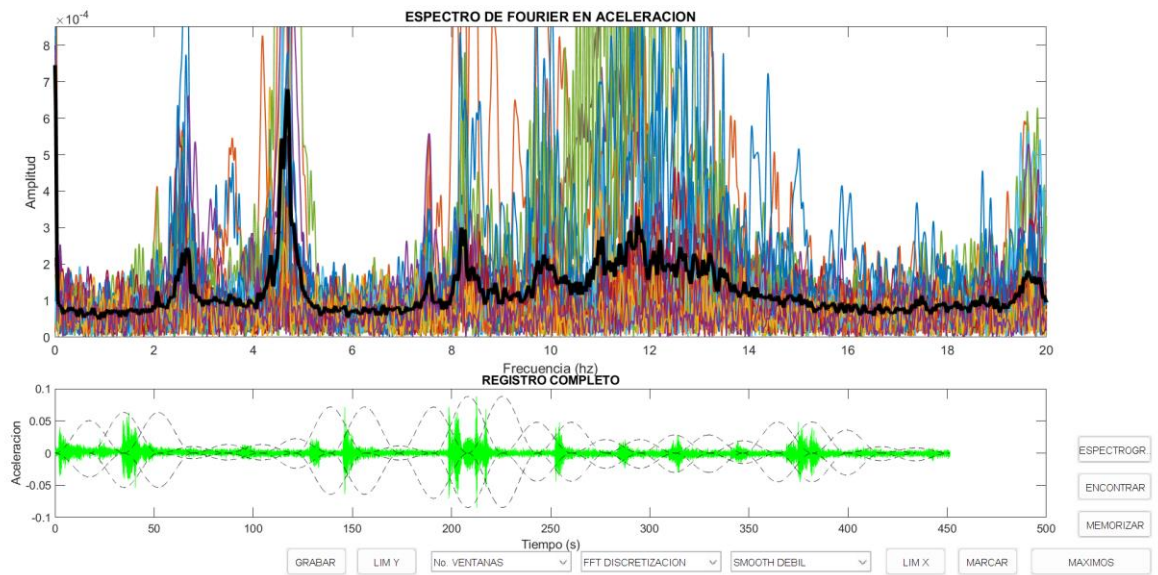
Fuente: Propia

## Anexo 46.CH1B-07-39-R45-60



Fuente: Propia

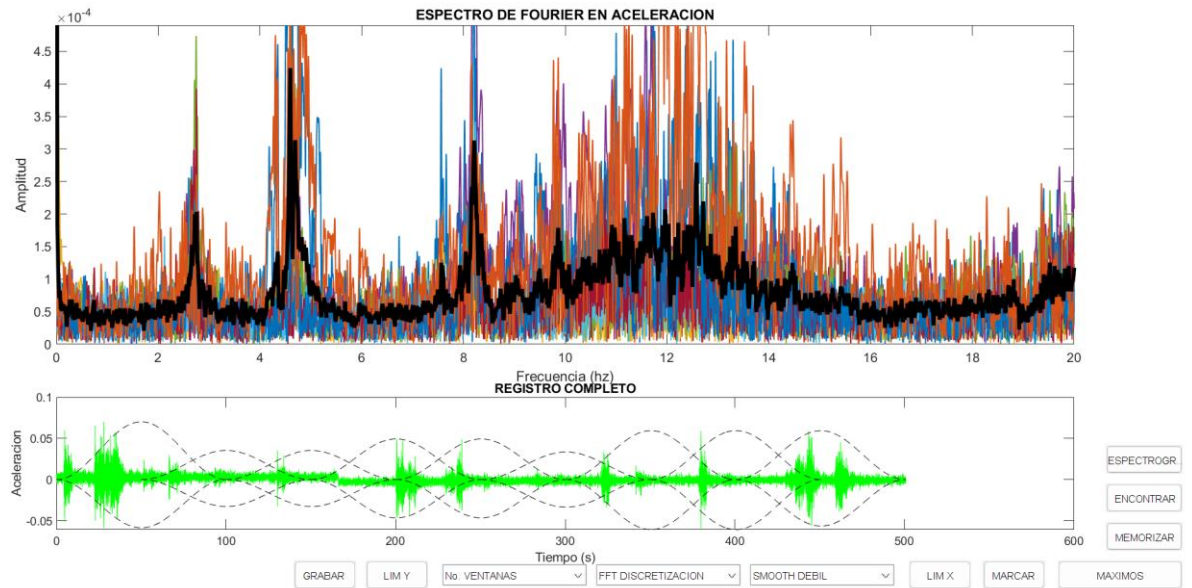
## Anexo 47.CH1B-07-39-R30-45



Fuente: Propia

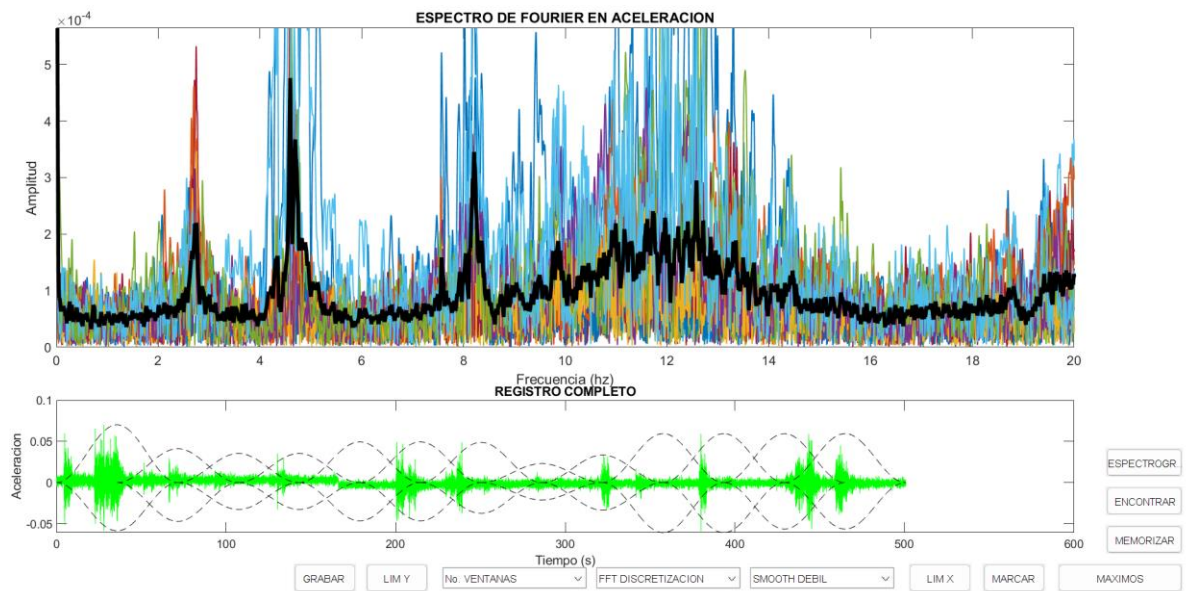
**CERCHA 1**  
**SITIO B**  
**CH1B-10-03**

Anexo 48.CH1B-10-03-R90-120



Fuente: Propia

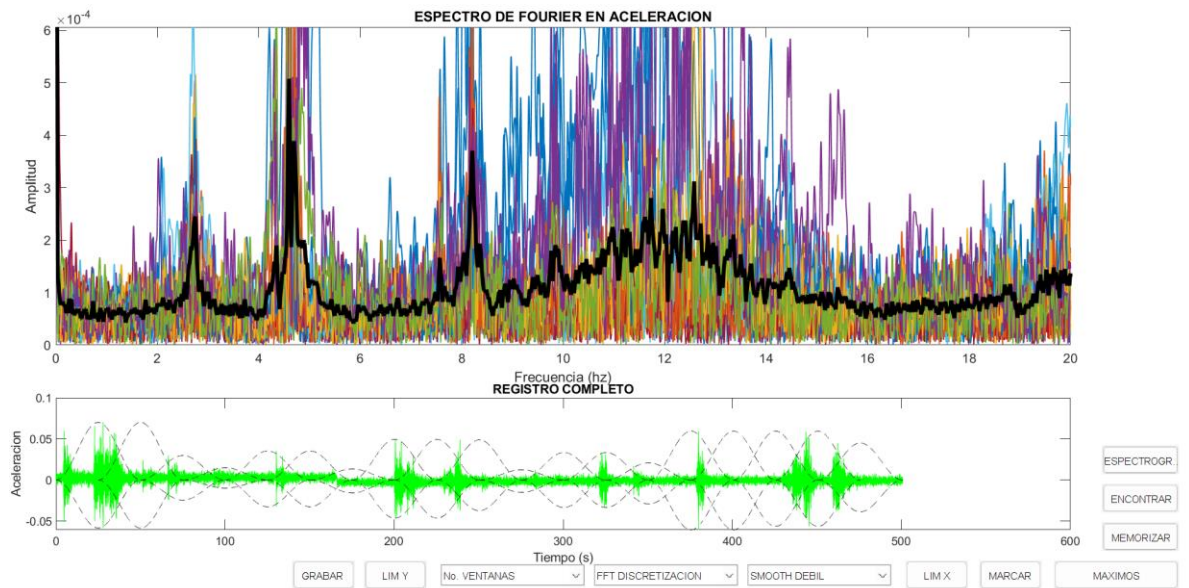
Anexo 49.CH1B-10-03-R60-90



Fuente: Propia

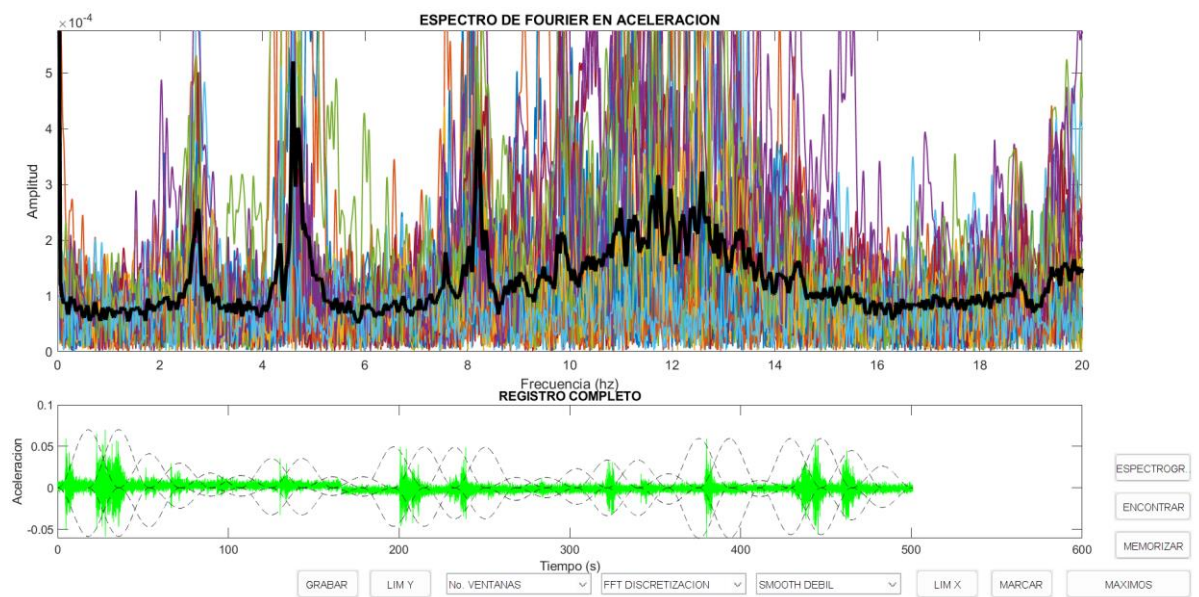


Anexo 50.CH1B-10-03-R45-60



Fuente: Propia

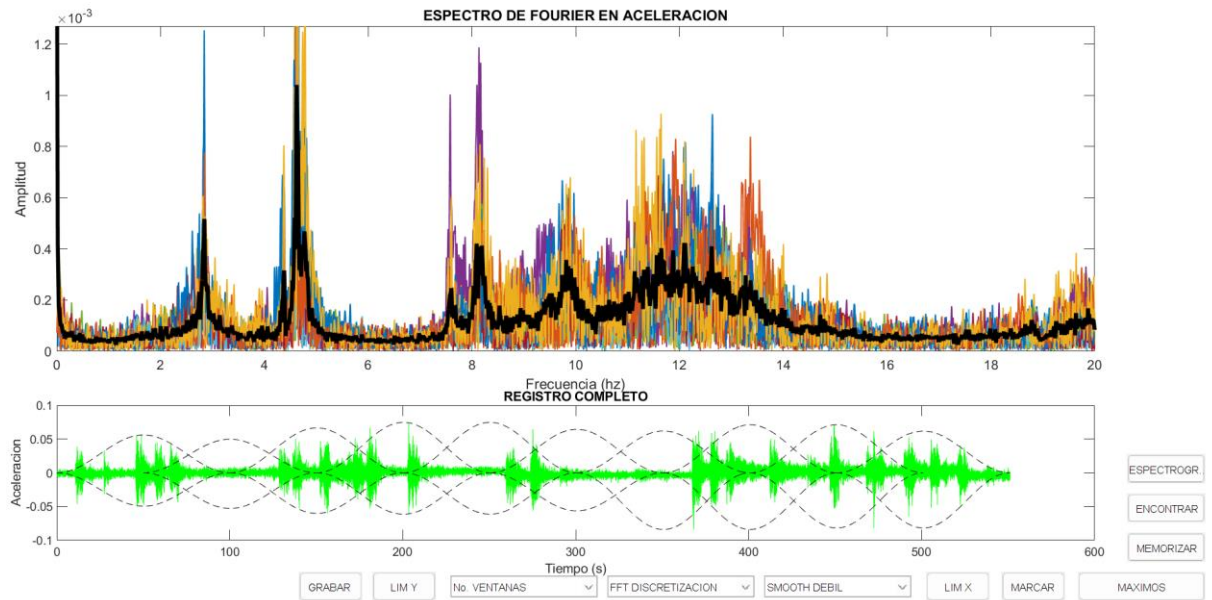
Anexo 51.CH1B-10-03-R30-45



Fuente: Propia

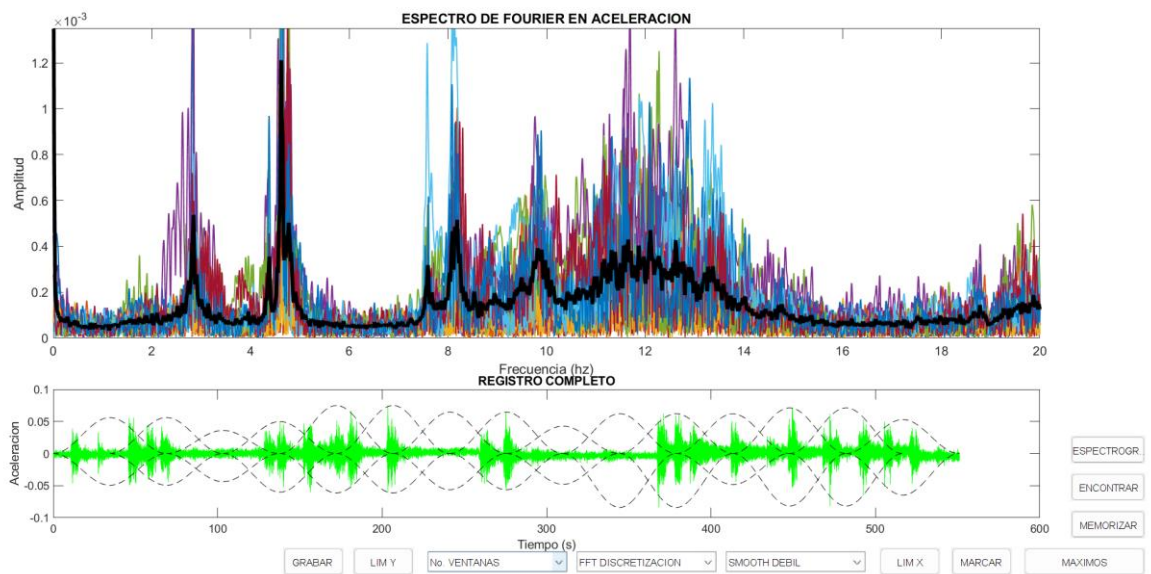
**CERCHA 1**  
**SITIO B**  
**CH1B-12-03**

Anexo 52.CH1B-12-03-R90-120



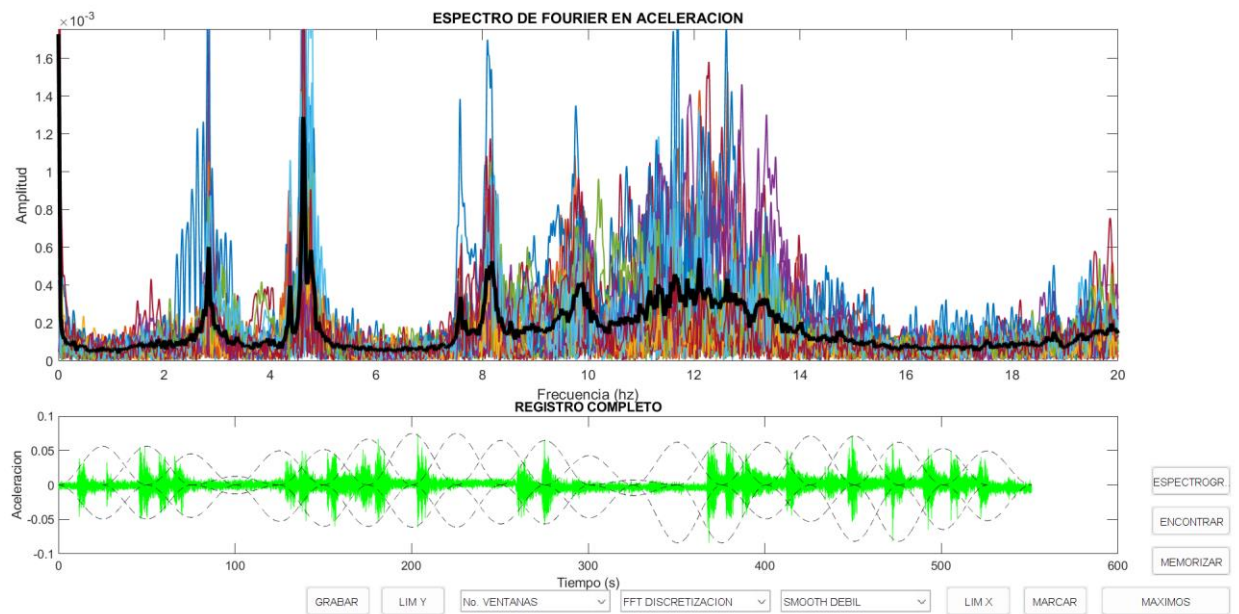
Fuente: Propia

Anexo 53.CH1B-12-03-R60-90



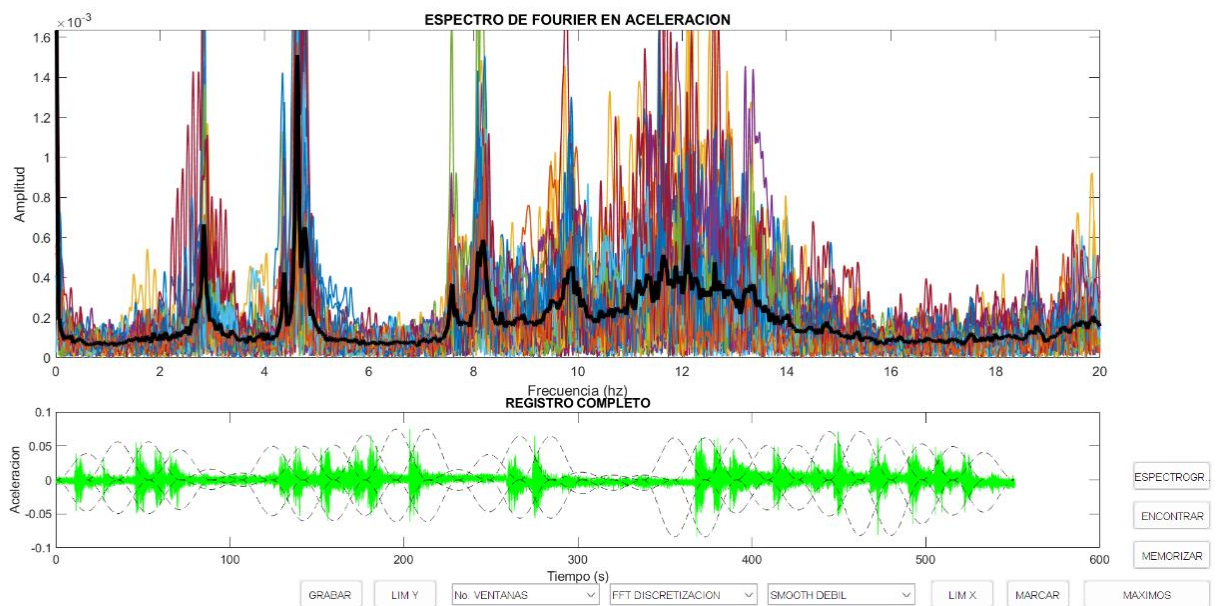
Fuente: Propia

## Anexo 54.CH1B-12-03-R45-60



Fuente: Propia

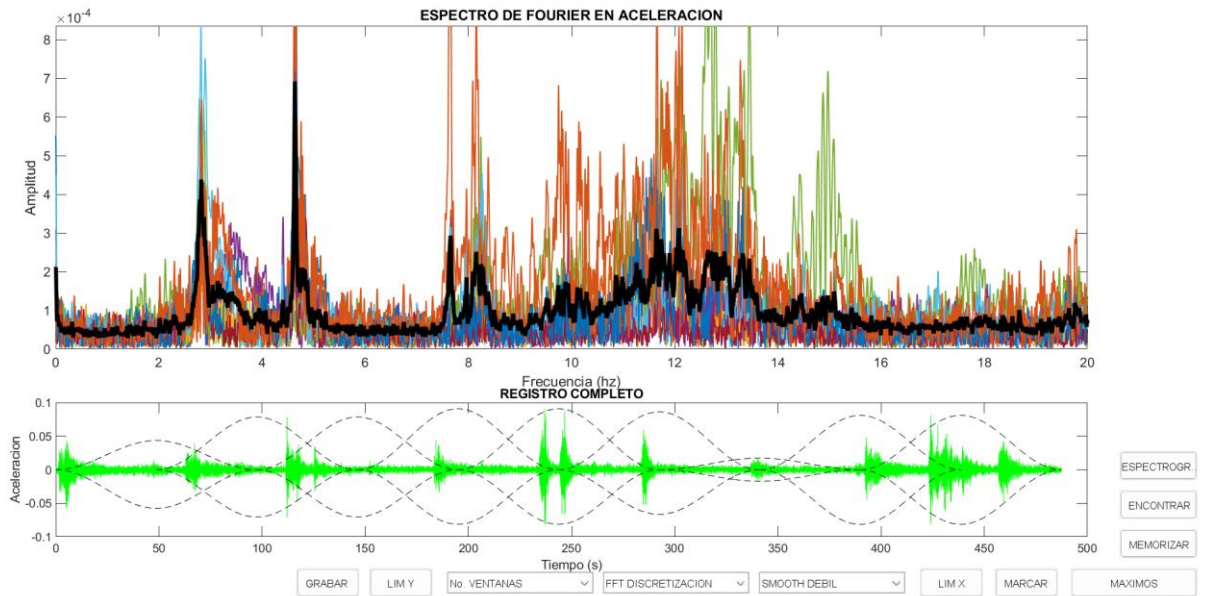
## Anexo 55.CH1B-12-03-R30-45



Fuente: Propia

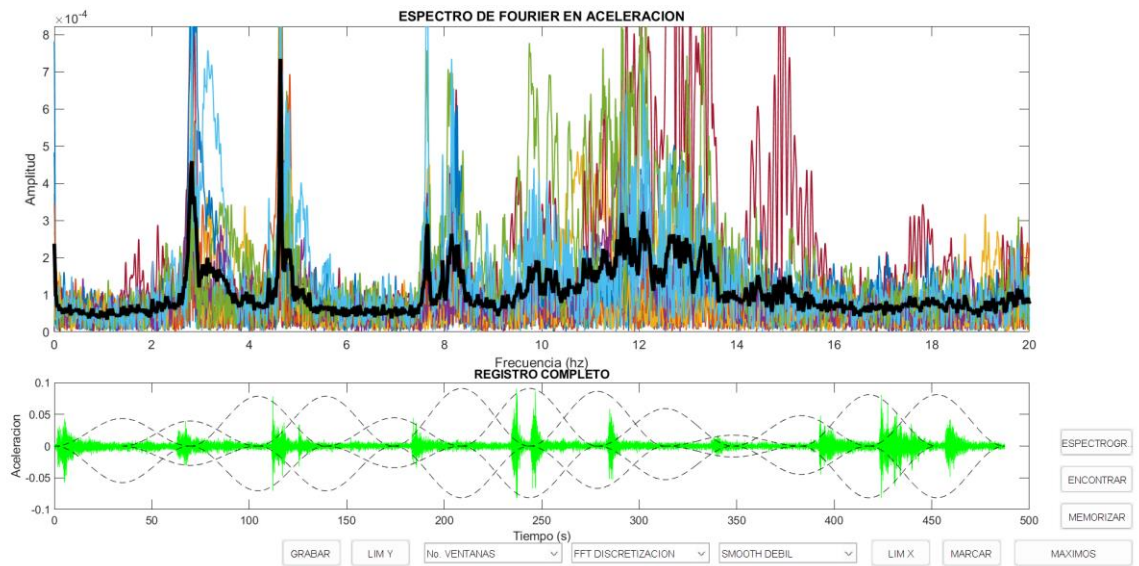
**CERCHA 1**  
**SITIO B**  
**CH1B-14-03**

Anexo 56.CH1B-14-03-R90-120



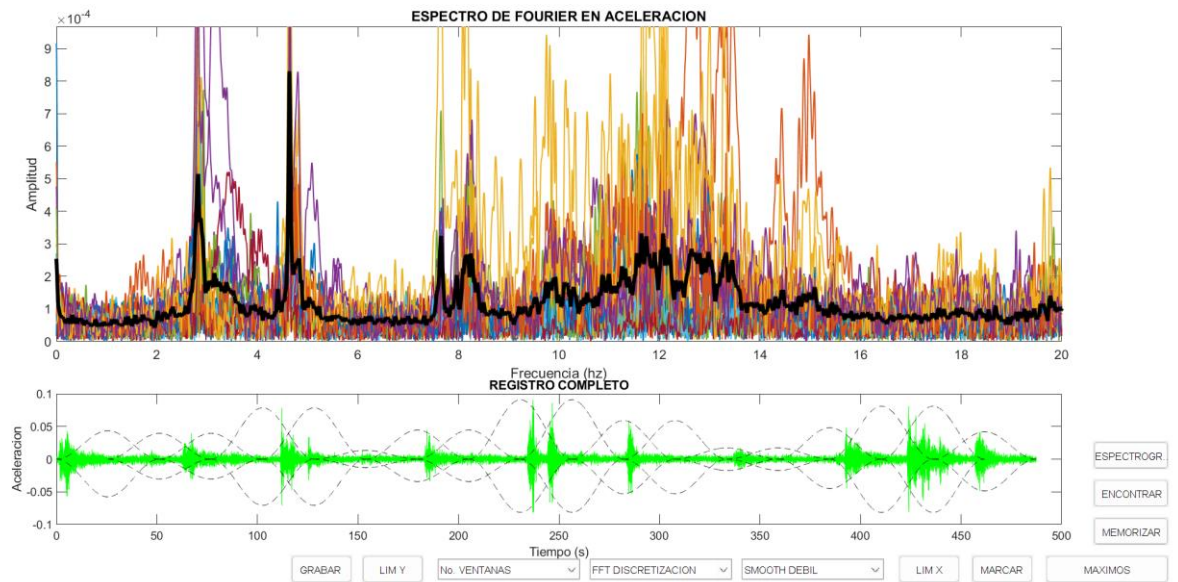
Fuente: Propia

Anexo 57.CH1B-14-03-R60-90



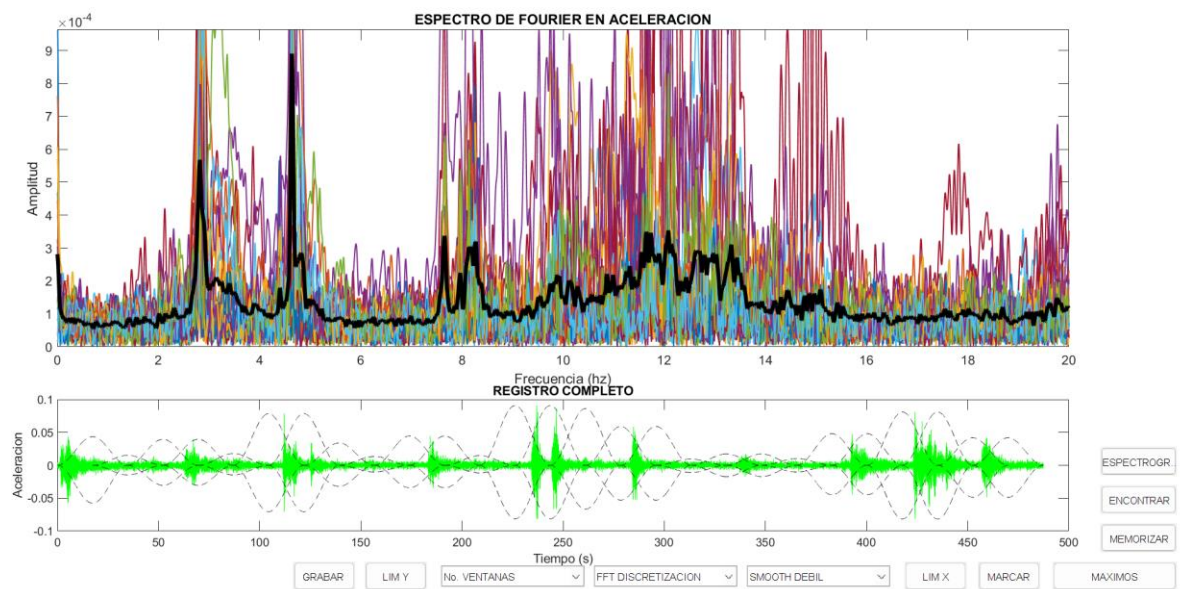
Fuente: Propia

## Anexo 58.CH1B-14-03-R45-60



Fuente: Propia

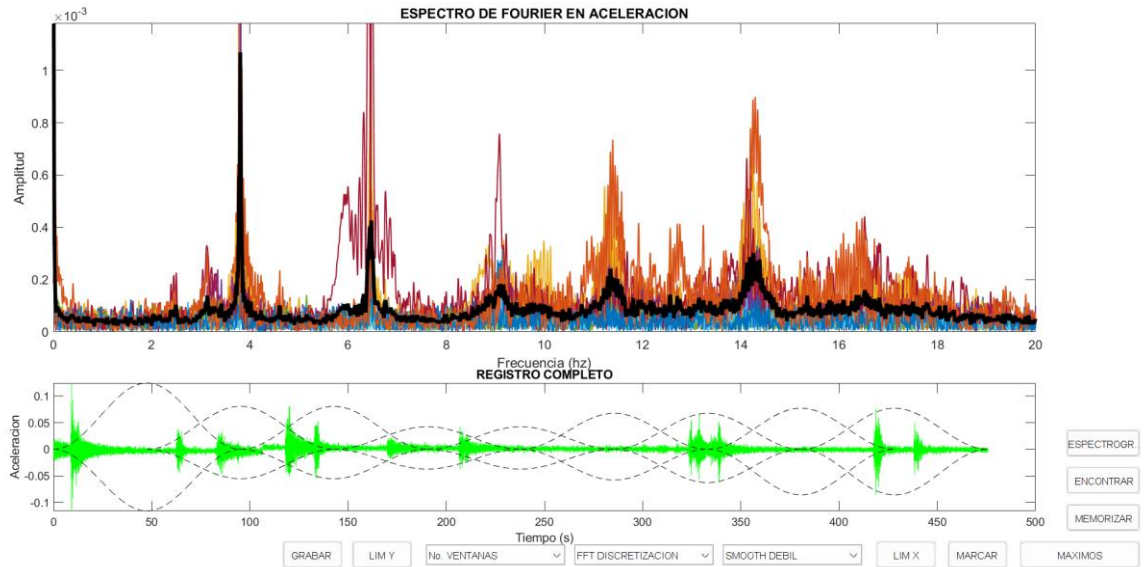
## Anexo 59.CH1B-14-03-R30-45



Fuente: Propia

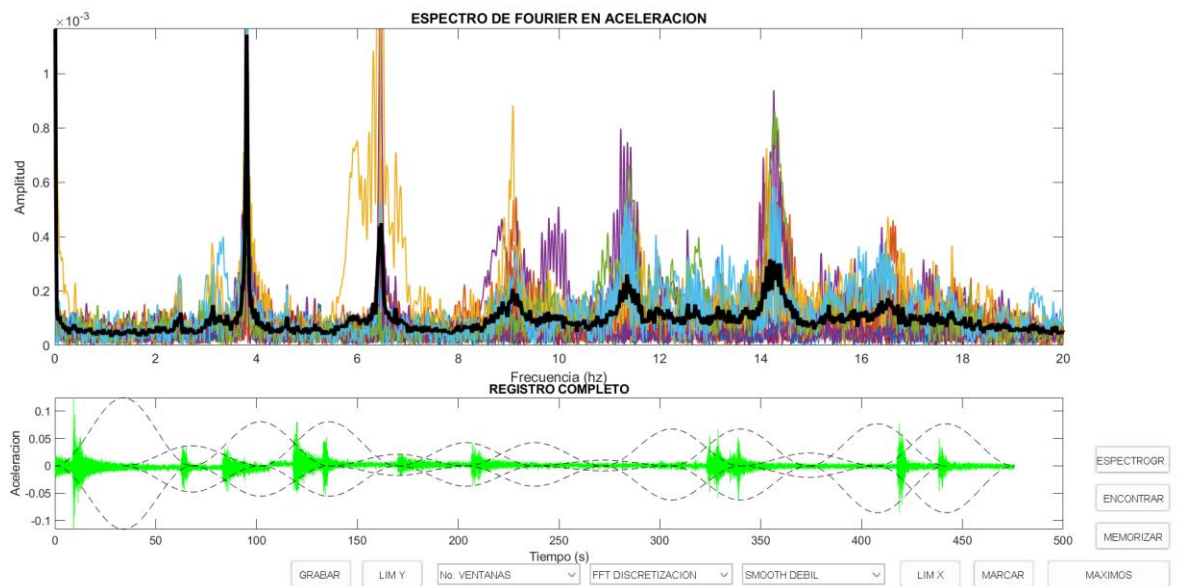
**CERCHA 2**  
**SITIO A**  
**CH2A-02-10**

Anexo 60.CH2A-02-10-R90-120



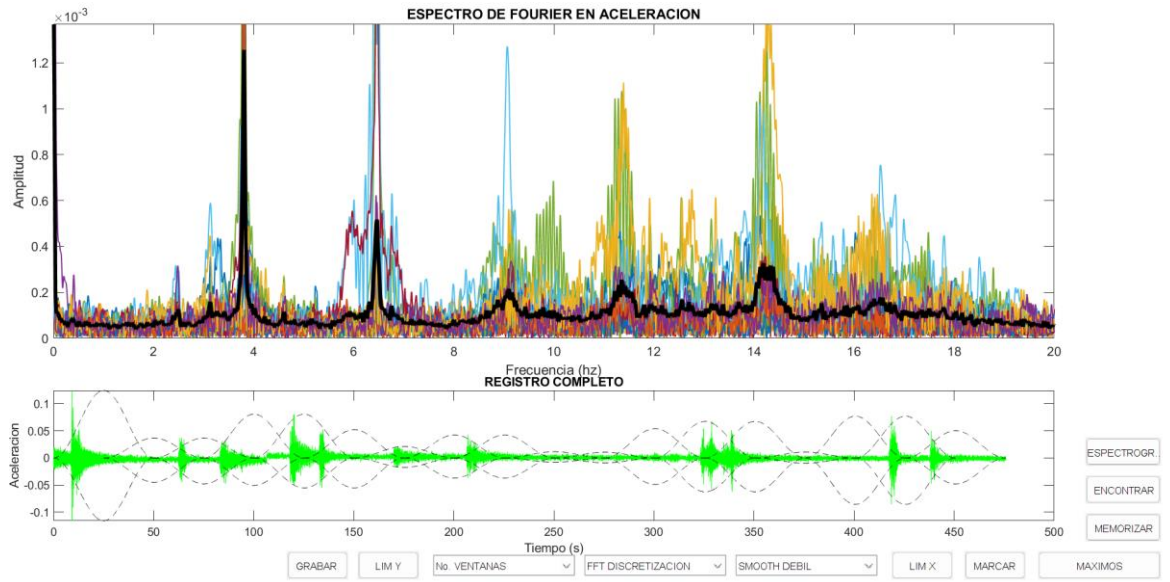
Fuente: Propia

Anexo 61.CH2A-02-10-R60-90



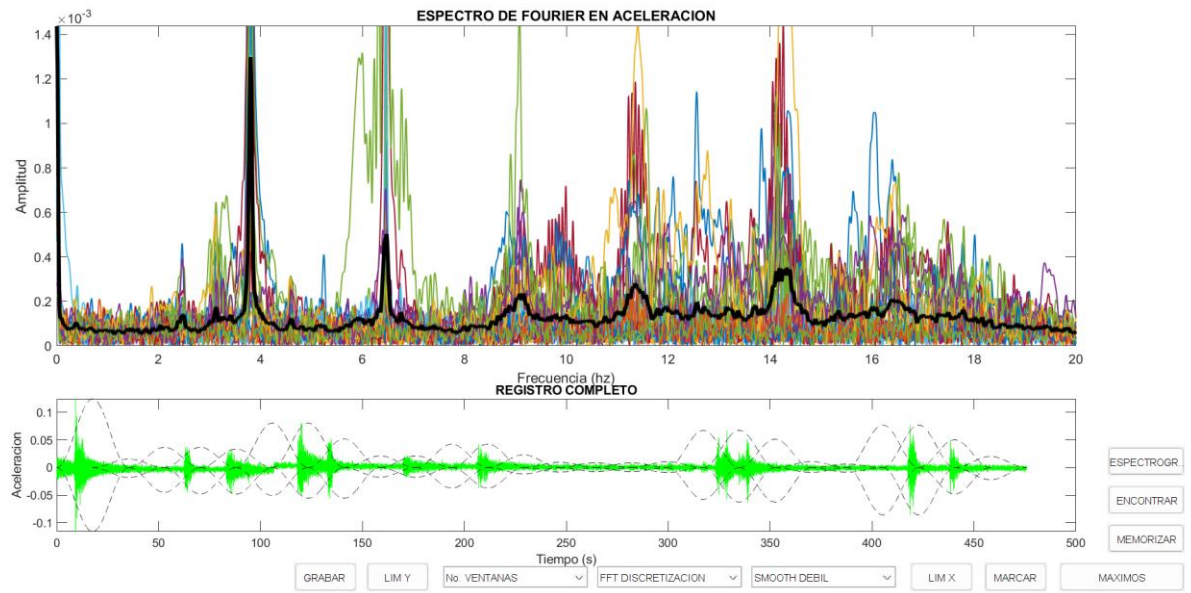
Fuente: Propia

CH2A-02-10-R45-60



Fuente: Propia

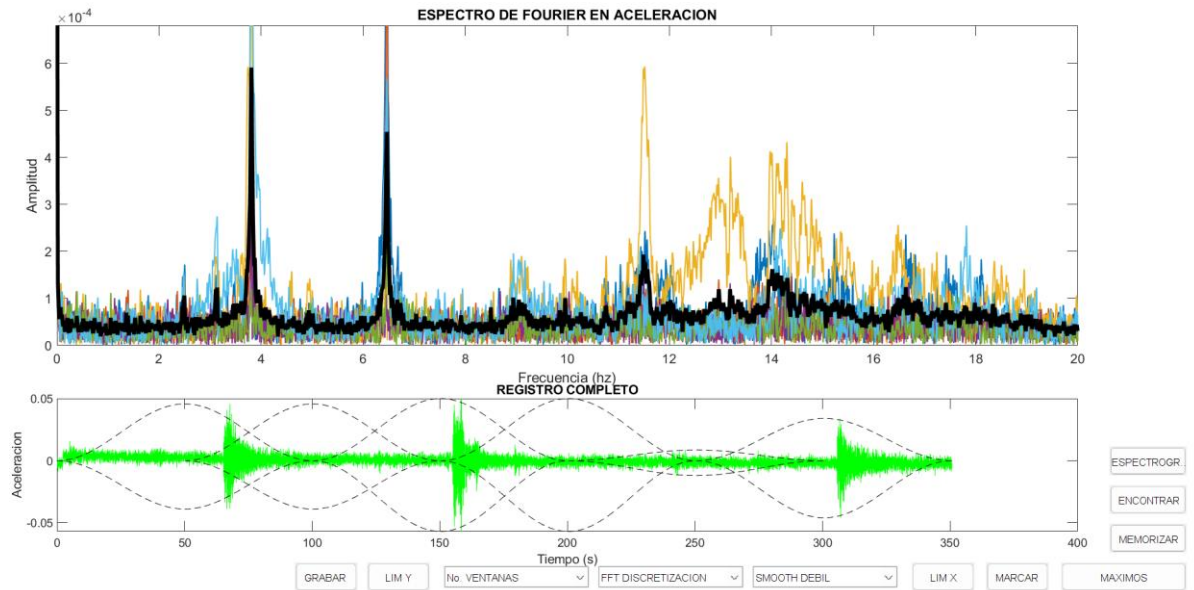
Anexo 62.CH2A-02-10-R30-45



Fuente: Propia

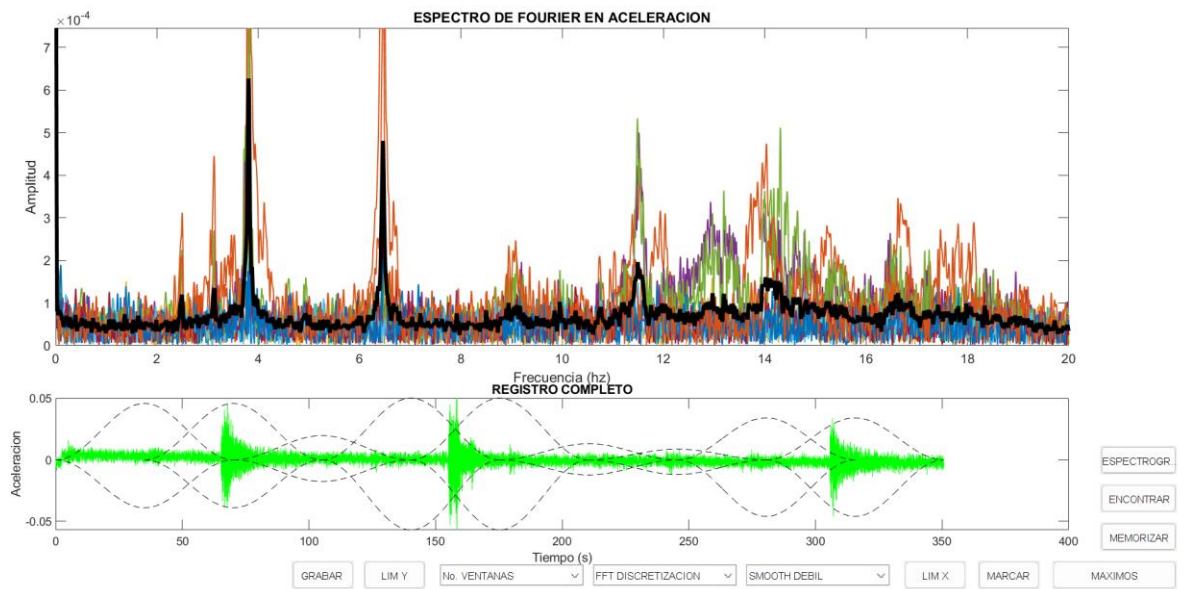
**CERCHA 2**  
**SITIO A**  
**CH2A-03-45**

Anexo 63.CH2A-03-45-R90-120



Fuente: Propia

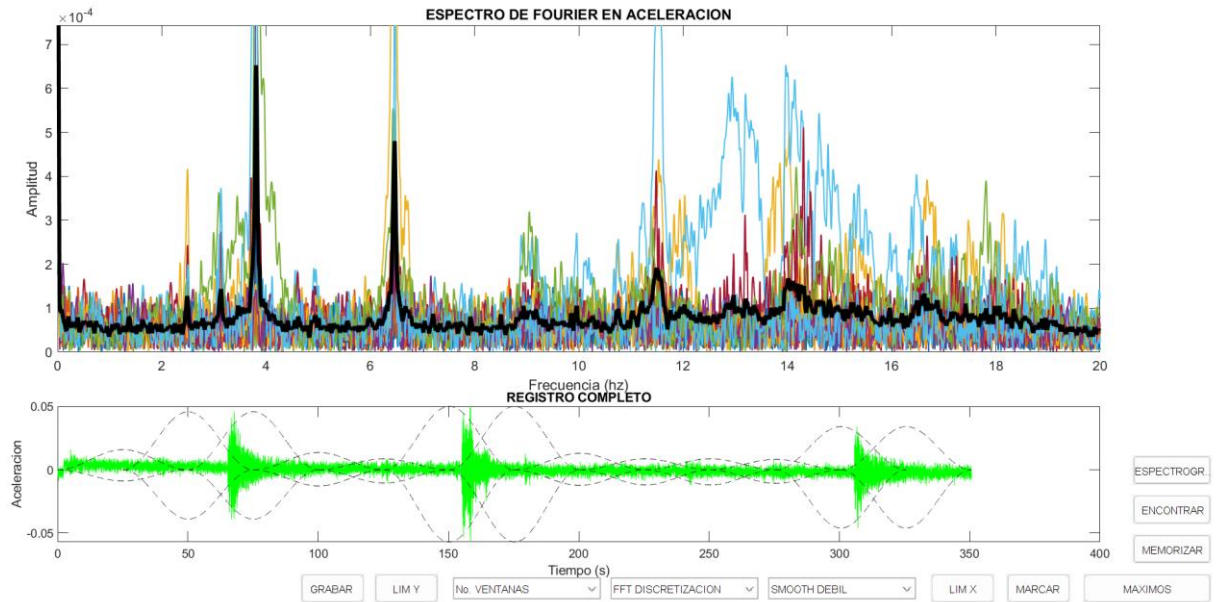
Anexo 64.CH2A-03-45-R60-90



Fuente: Propia

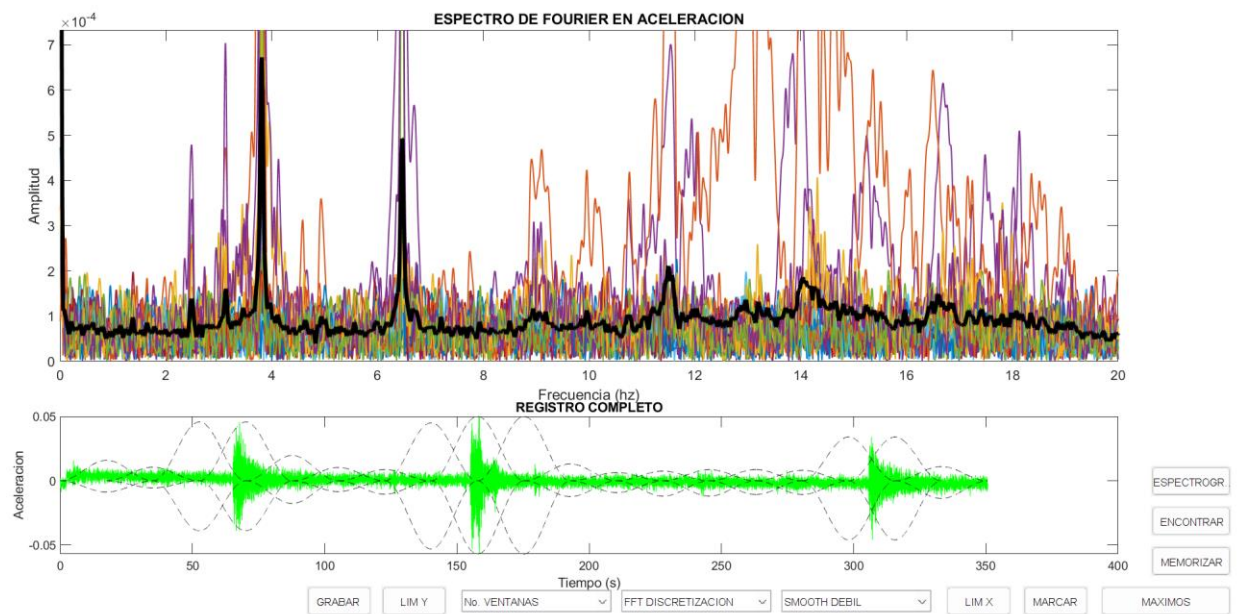


## Anexo 65.CH2A-03-45-R45-60



Fuente: Propia

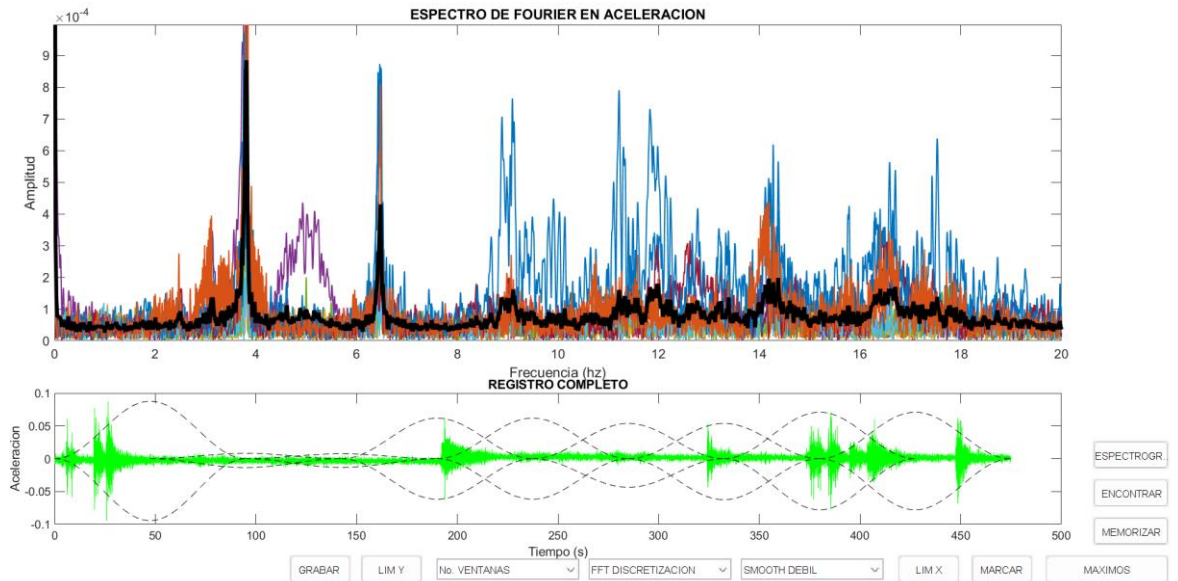
## Anexo 66.CH2A-03-45-R30-45



Fuente: Propia

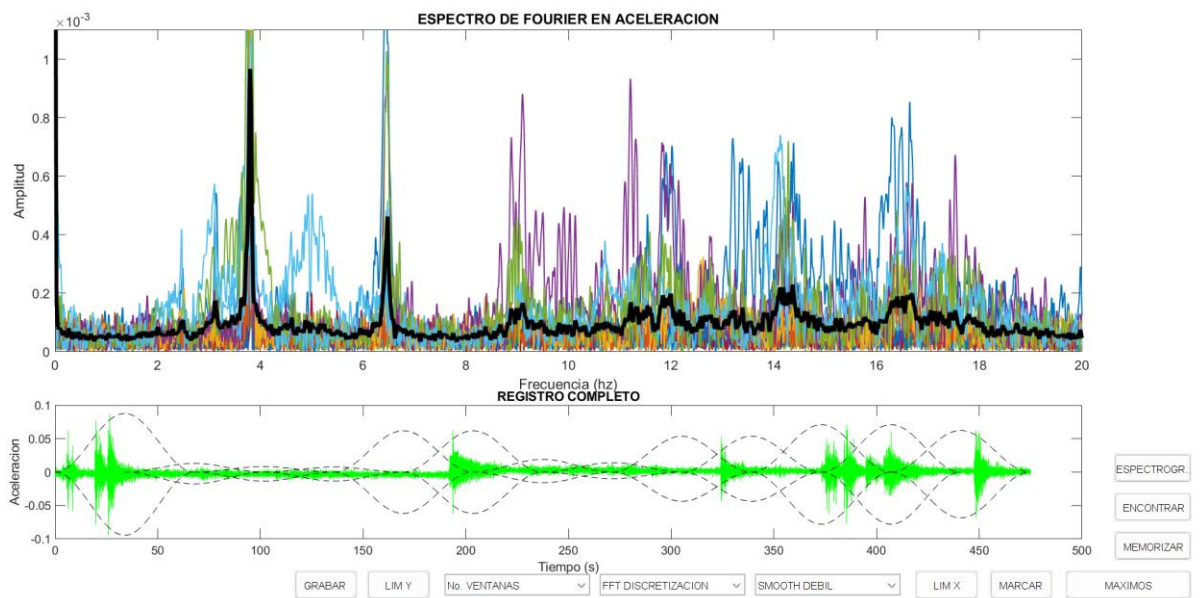
**CERCHA 2**  
**SITIO A**  
**CH2A-05-05**

Anexo 67.CH2A-05-50-R90-120



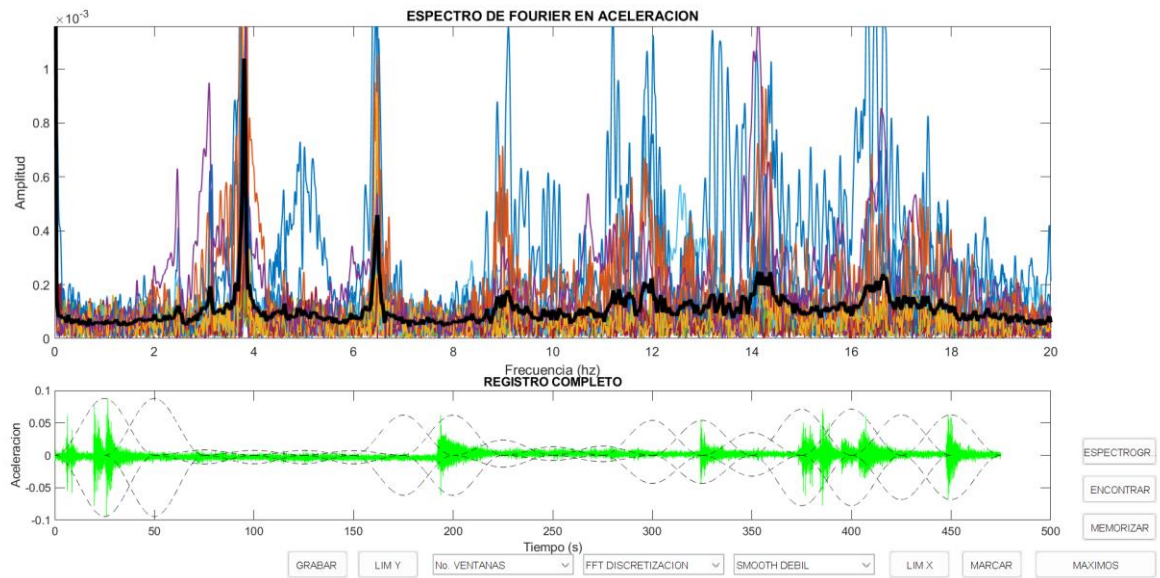
Fuente: Propia

Anexo 68.CH2A-05-50-R60-90



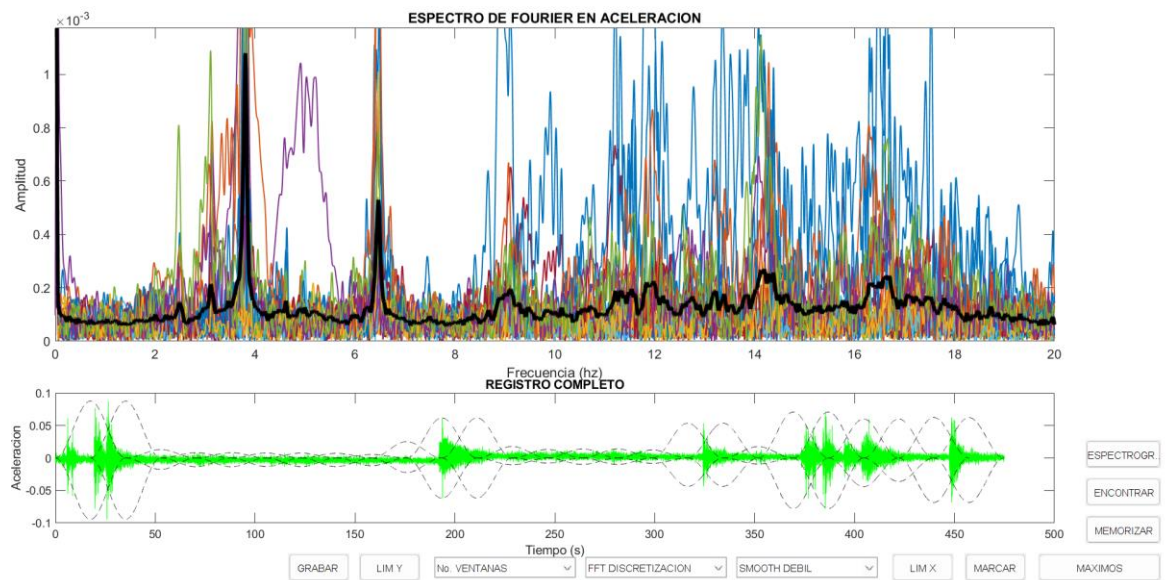
Fuente: Propia

## Anexo 69.CH2A-05-50-R45-60



Fuente: Propia

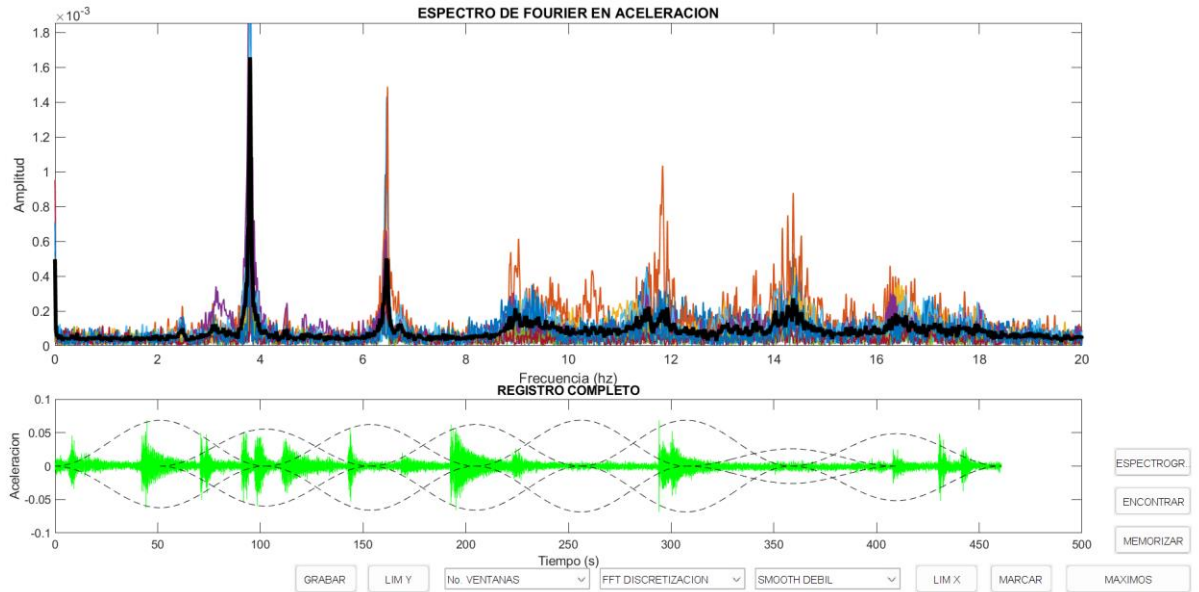
## Anexo 70.CH2A-05-50-R30-45



Fuente: Propia

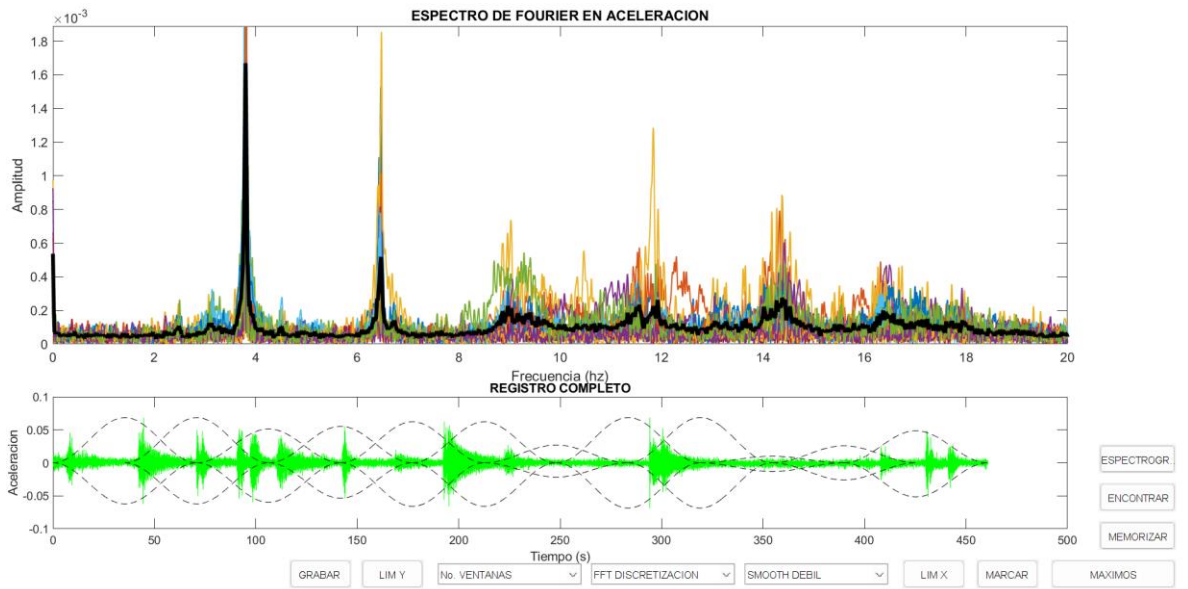
**CERCHA 2**  
**SITIO A**  
**CH2A-07-49**

Anexo 71.CH2A-07-49-R90-120



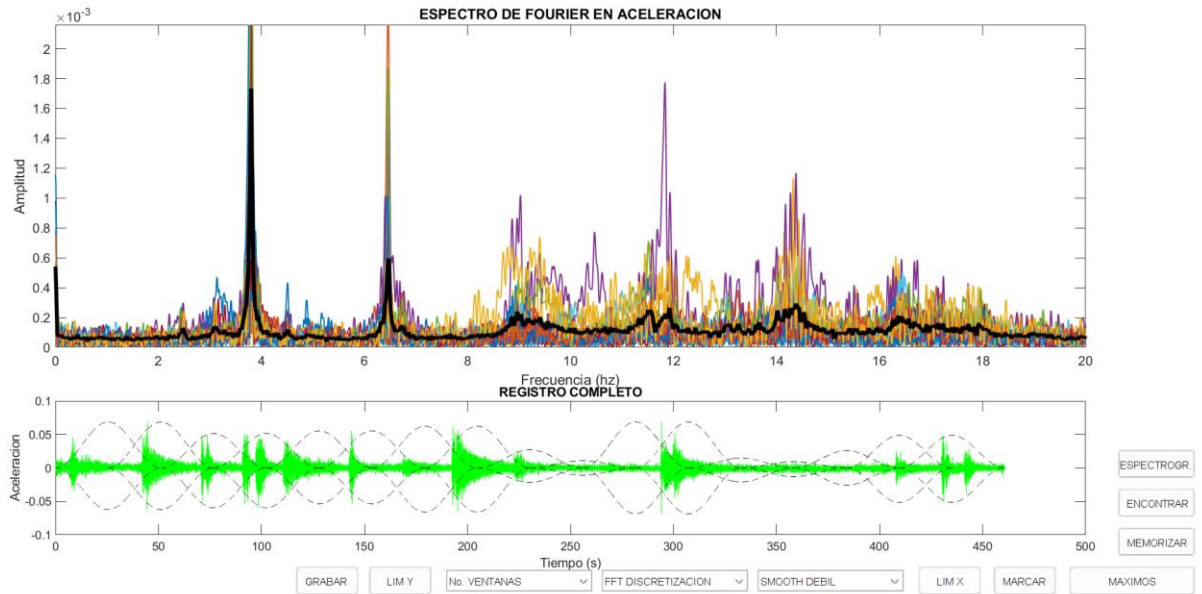
Fuente: Propia

Anexo 72.CH2A-07-49-R60-90



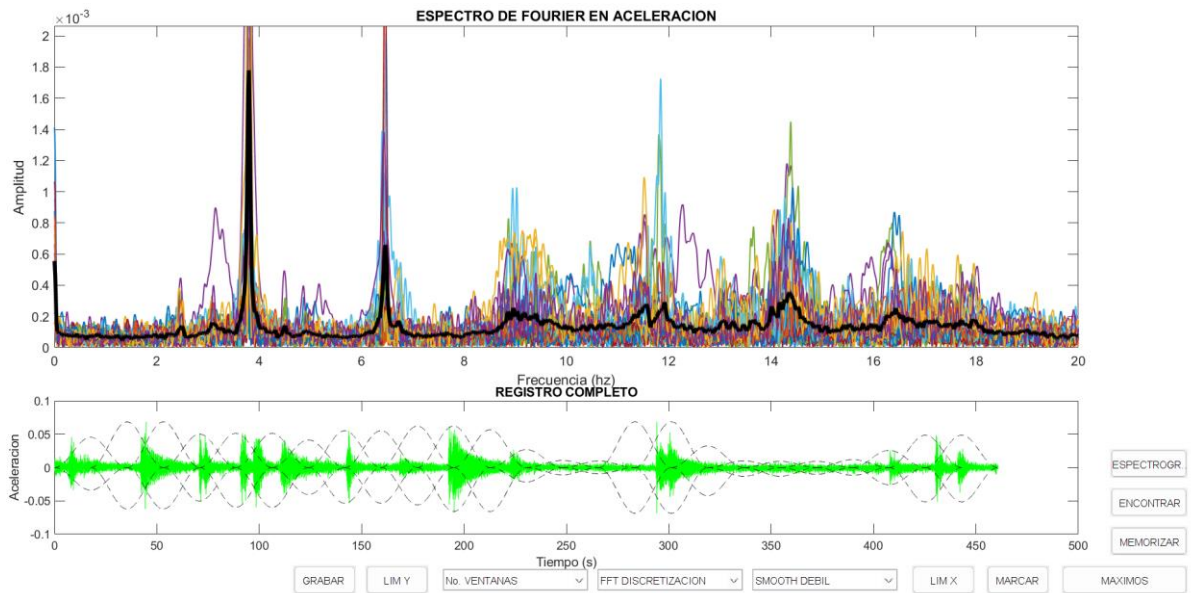
Fuente: Propia

Anexo 73.CH2A-07-49-R45-60



Fuente: Propia

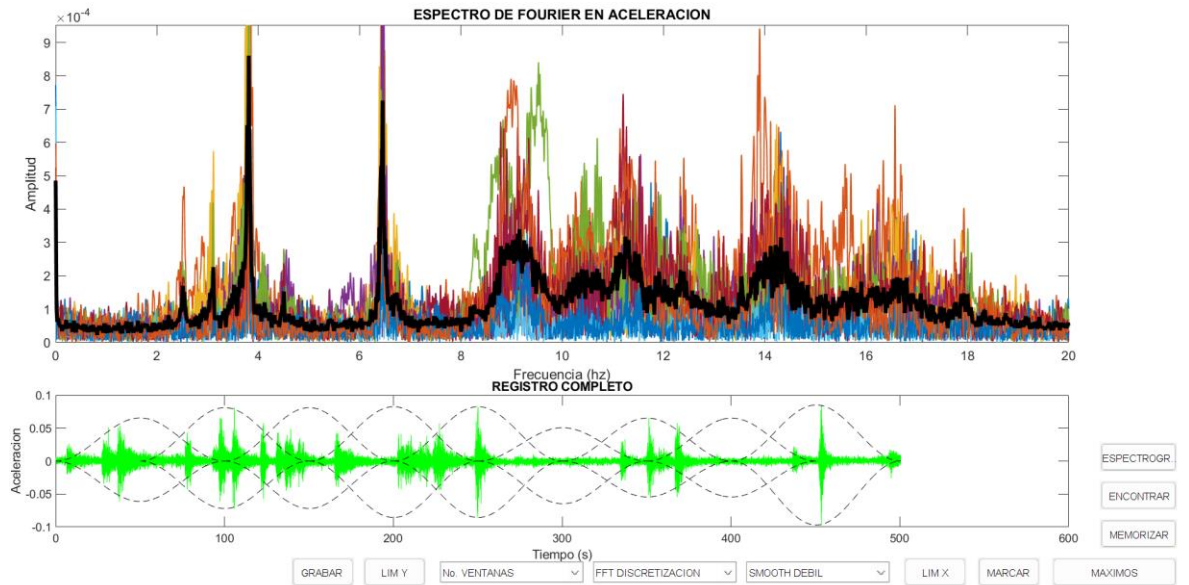
Anexo 74.CH2A-07-49-R30-45



Fuente: Propia

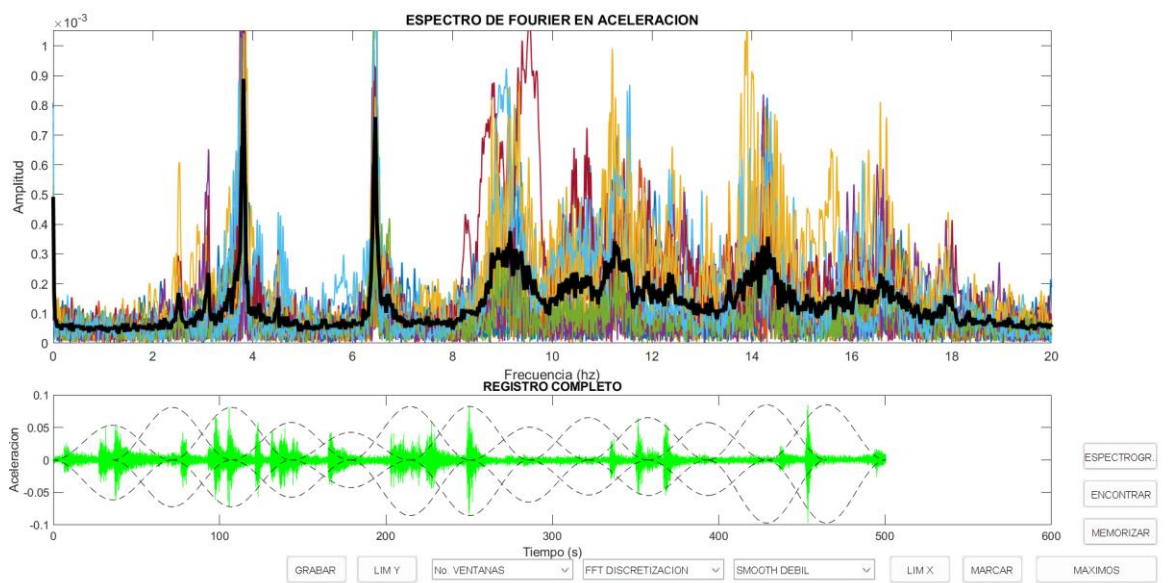
**CERCHA 2**  
**SITIO A**  
**CH2A-10-14**

Anexo 75.CH2A-10-14-R90-120



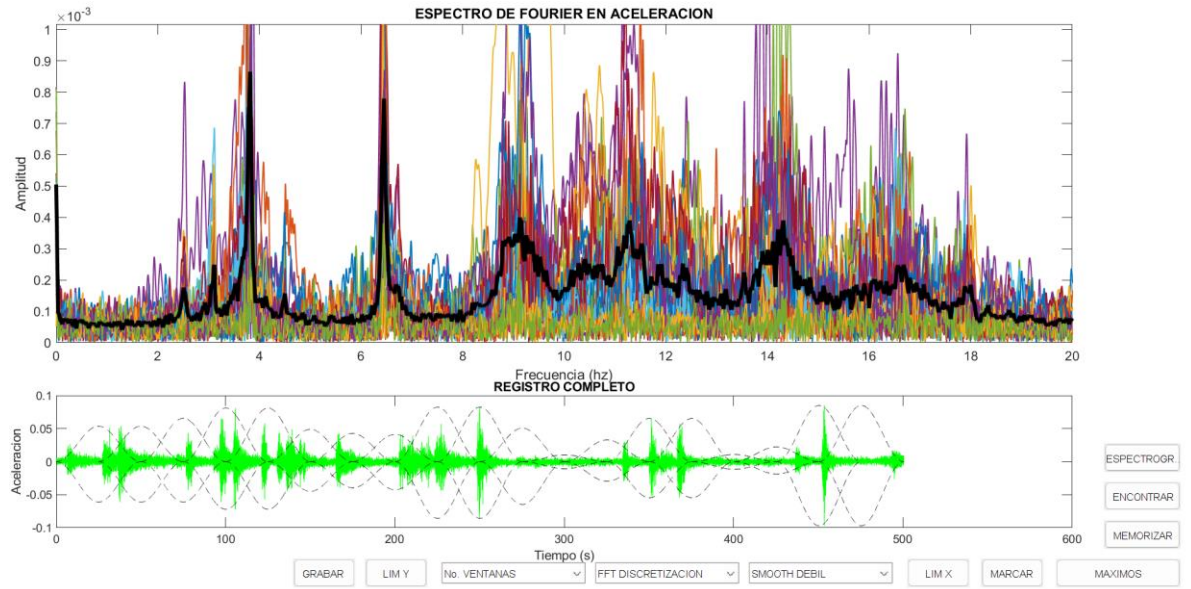
Fuente: Propia

Anexo 76.CH2A-10-14-R60-90



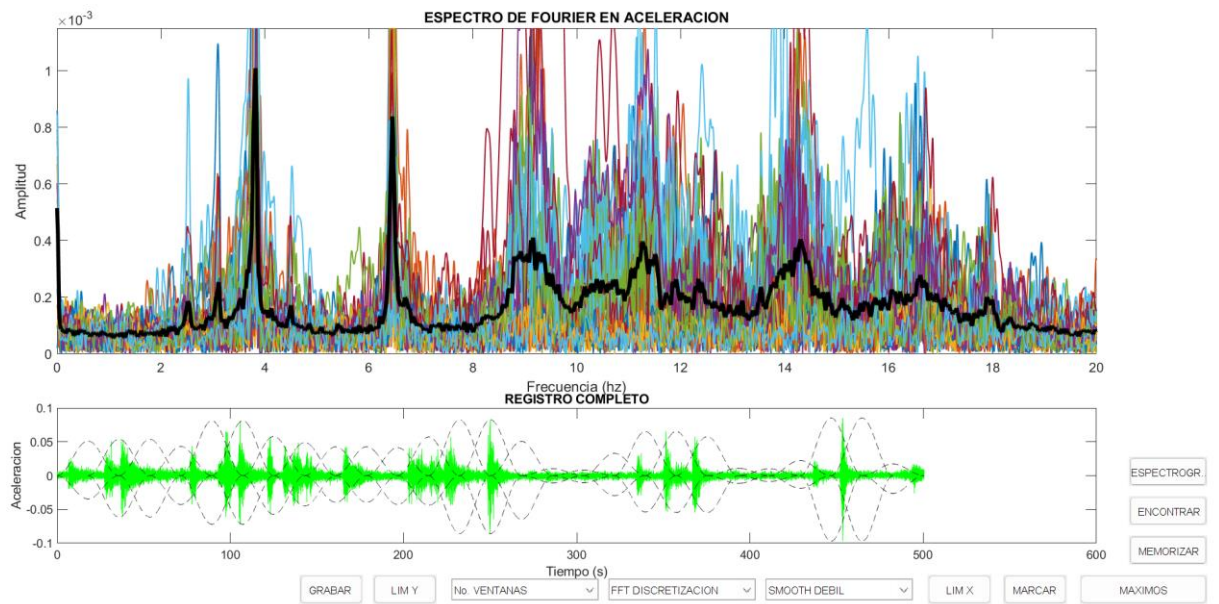
Fuente: Propia

Anexo 77.CH2A-10-14-R45-60



Fuente: Propia

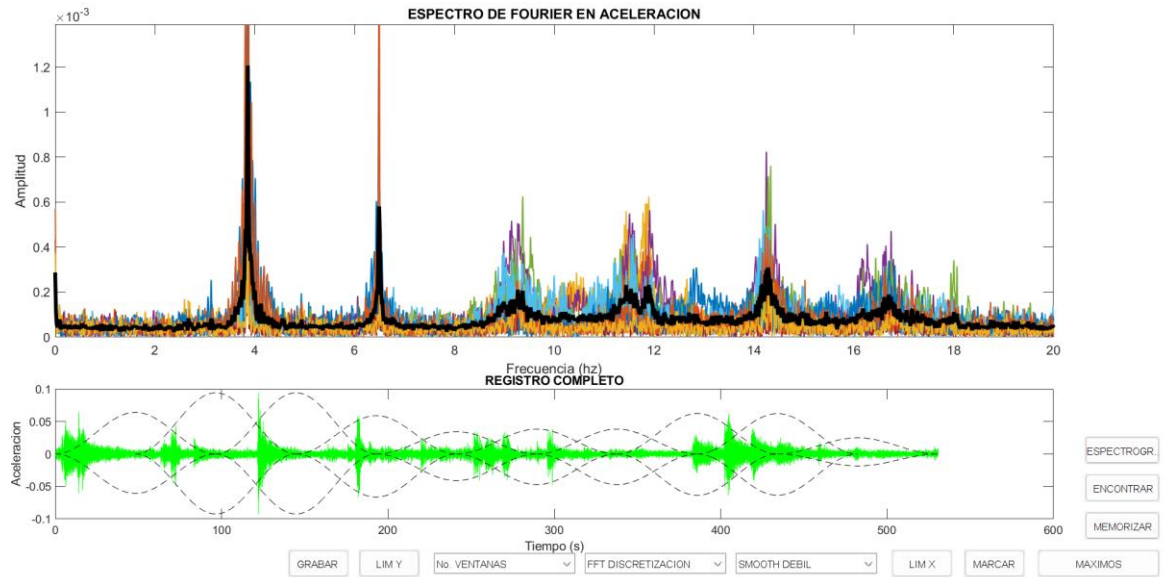
Anexo 78.CH2A-10-14-R30-45



Fuente: Propia

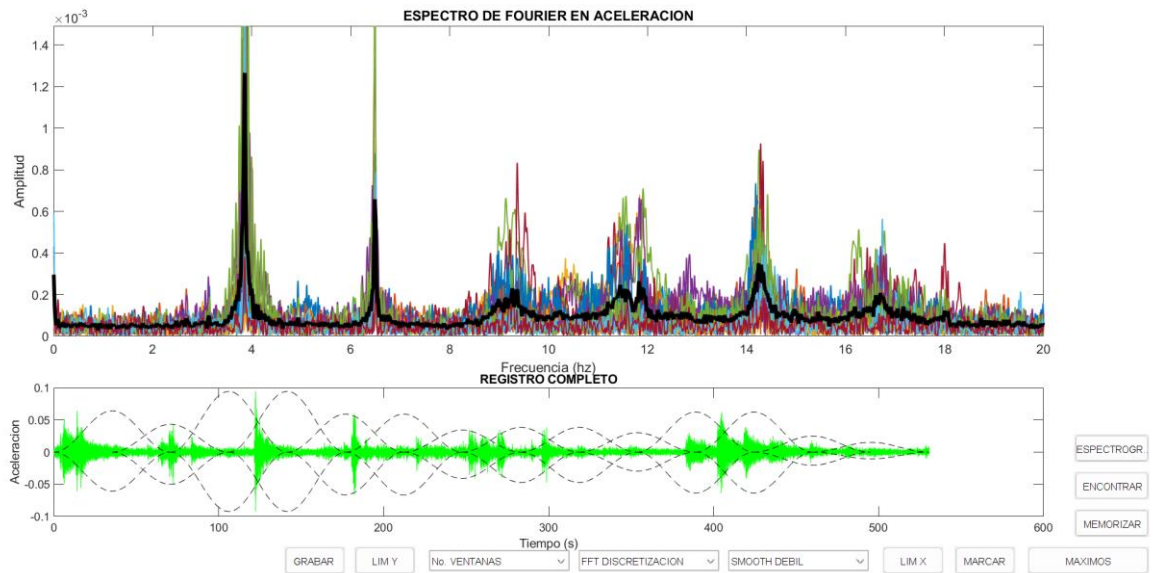
**CERCHA 2**  
**SITIO A**  
**CH2A-12-24**

Anexo 79.CH2A-12-14-R90-120



Fuente: Propia

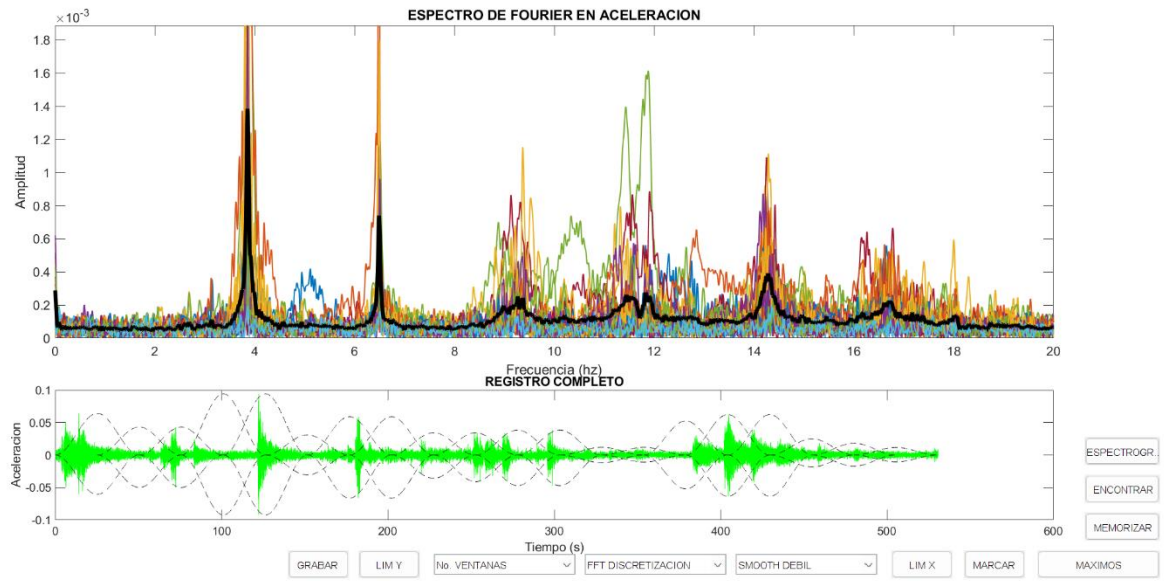
Anexo 80.CH2A-12-14-R60-90



Fuente: Propia

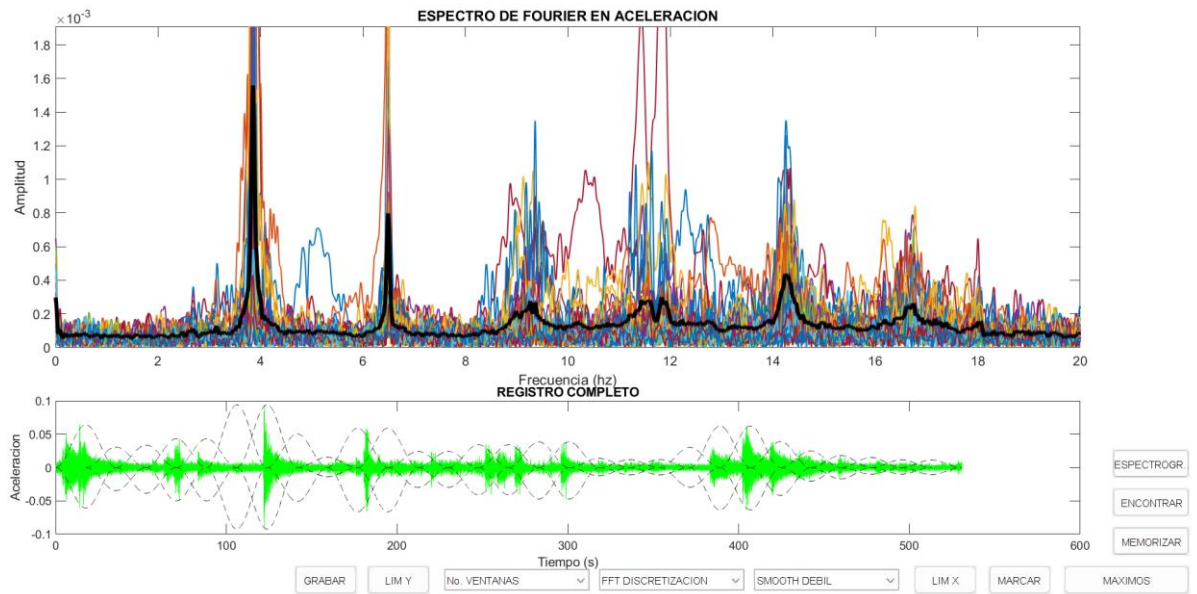


Anexo 81.CH2A-12-14-R45-60



Fuente: Propia

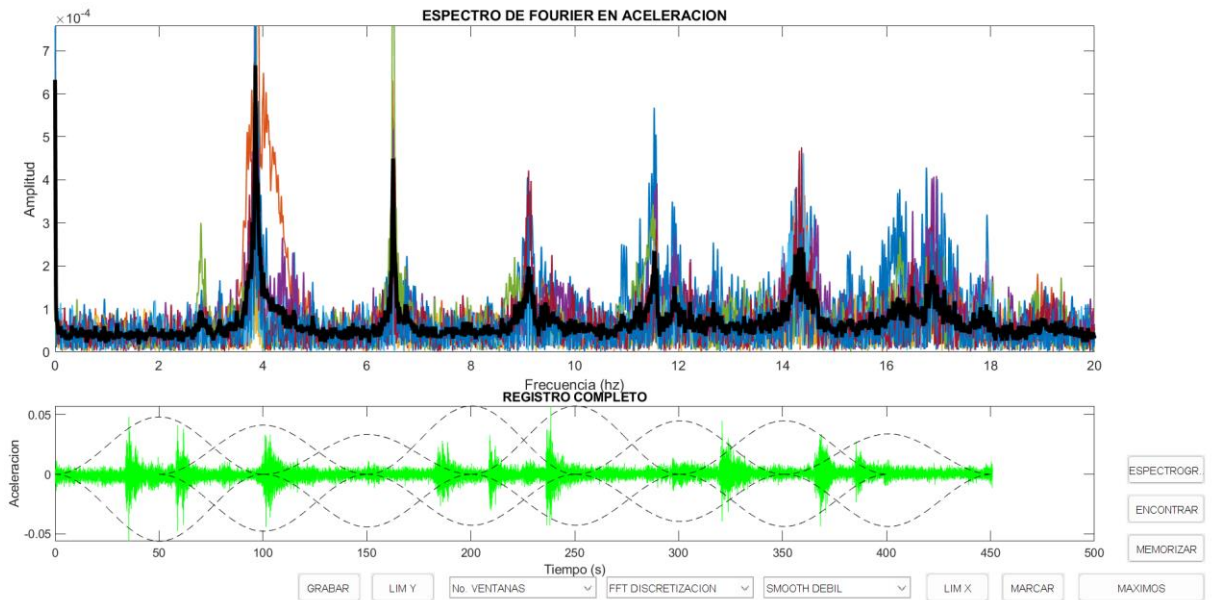
Anexo 82.CH2A-12-14-R30-45



Fuente: Propia

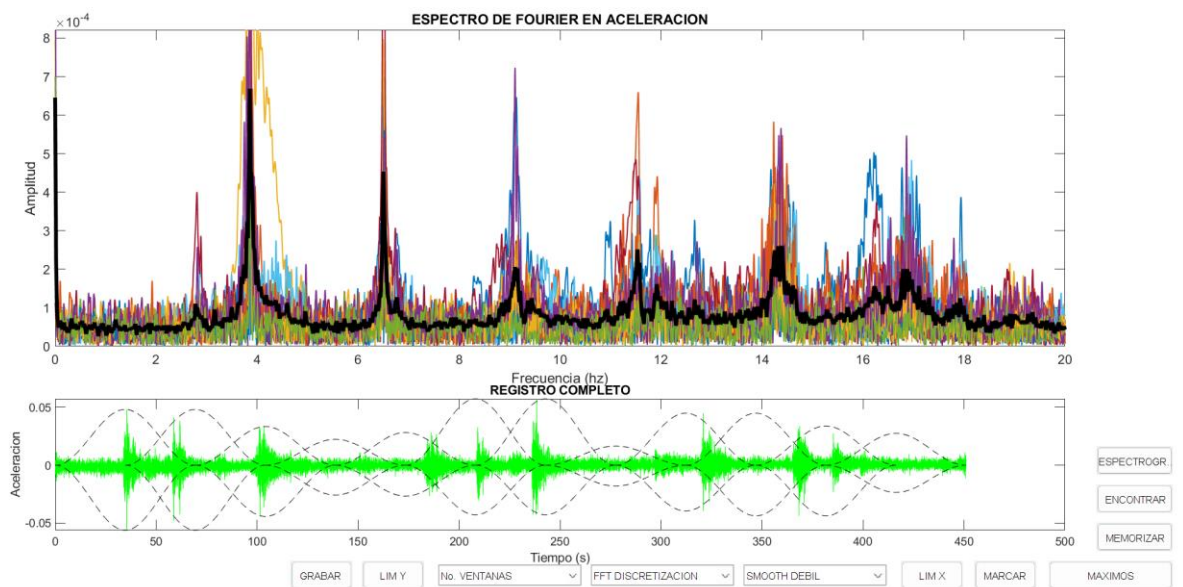
**CERCHA 2**  
**SITIO A**  
**CH2A-14-13**

Anexo 83.CH2A-14-13-R90-120



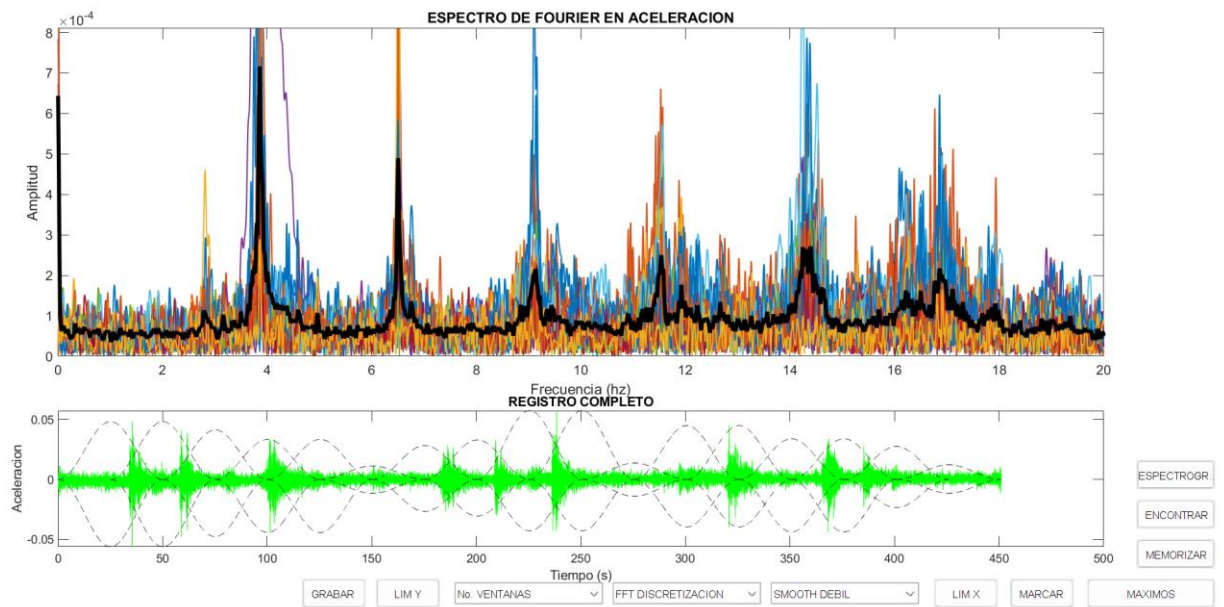
Fuente: Propia

Anexo 84.CH2A-14-13-R60-90



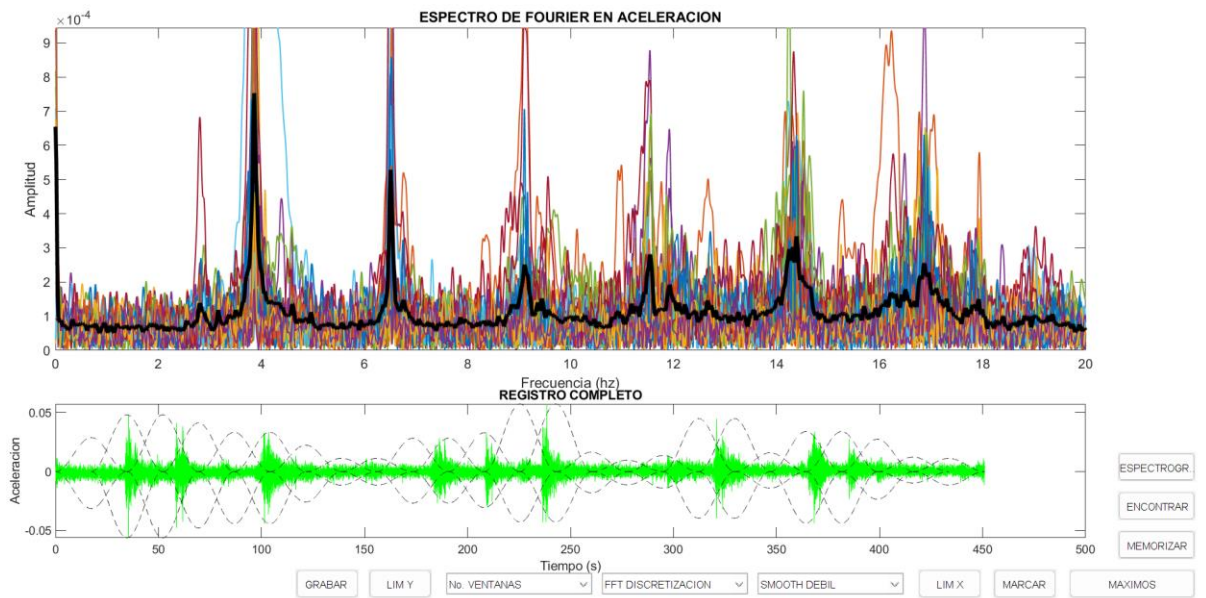
Fuente: Propia

Anexo 85. CH2A-14-13-R45-60



Fuente: Propia

Anexo 86. CH2A-14-13-R30-45



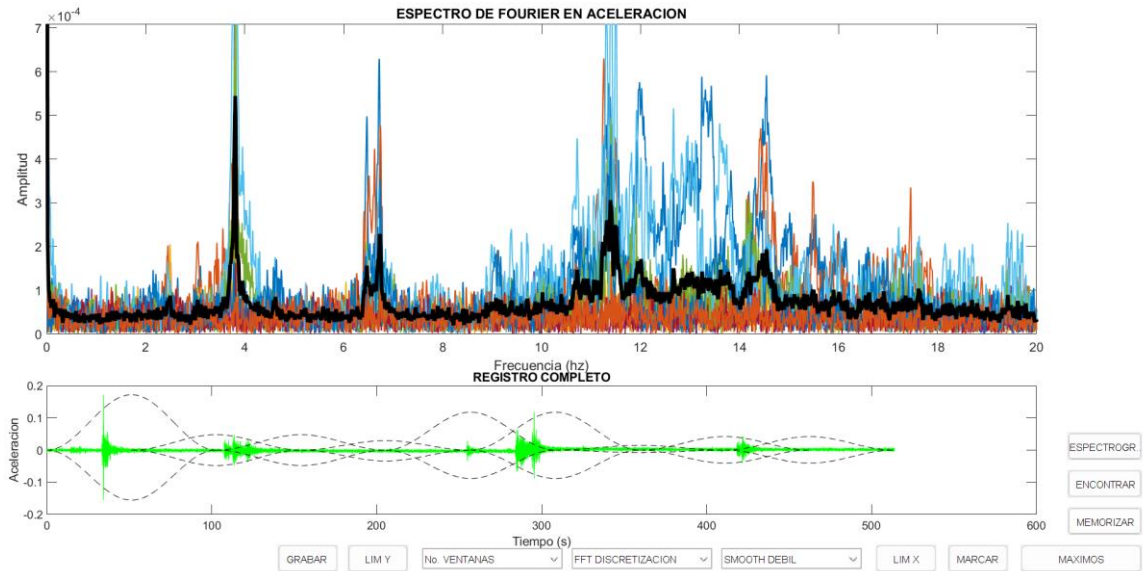
Fuente: Propia

**CERCHA 2**

**SITIO B**

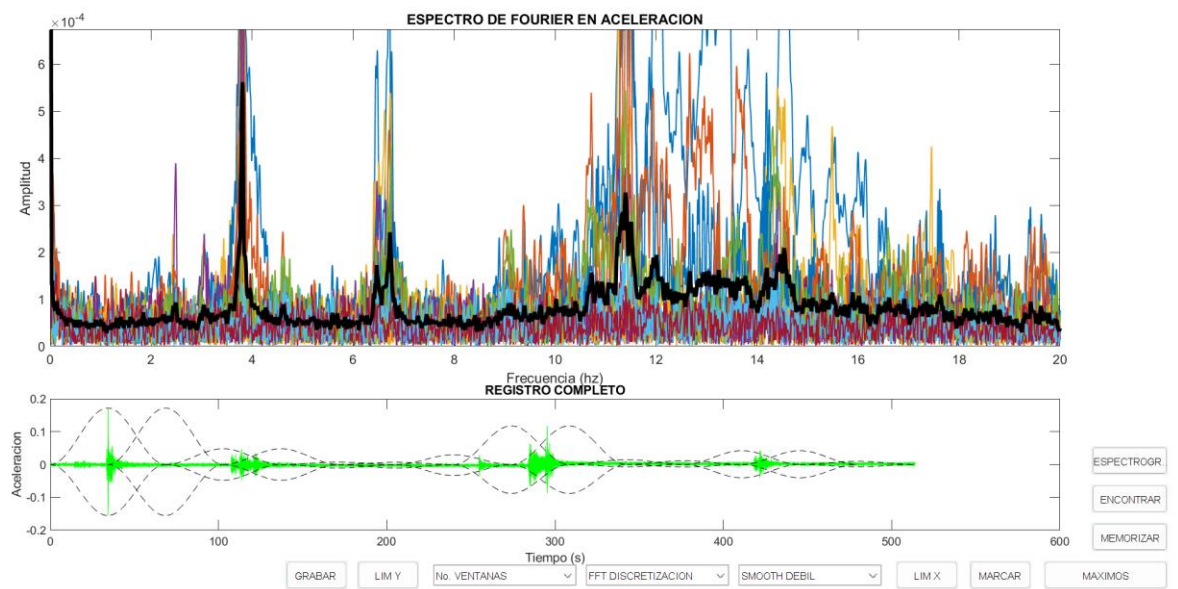
**CH2B-02-19**

Anexo 87.CH2B-02-19-R90-120



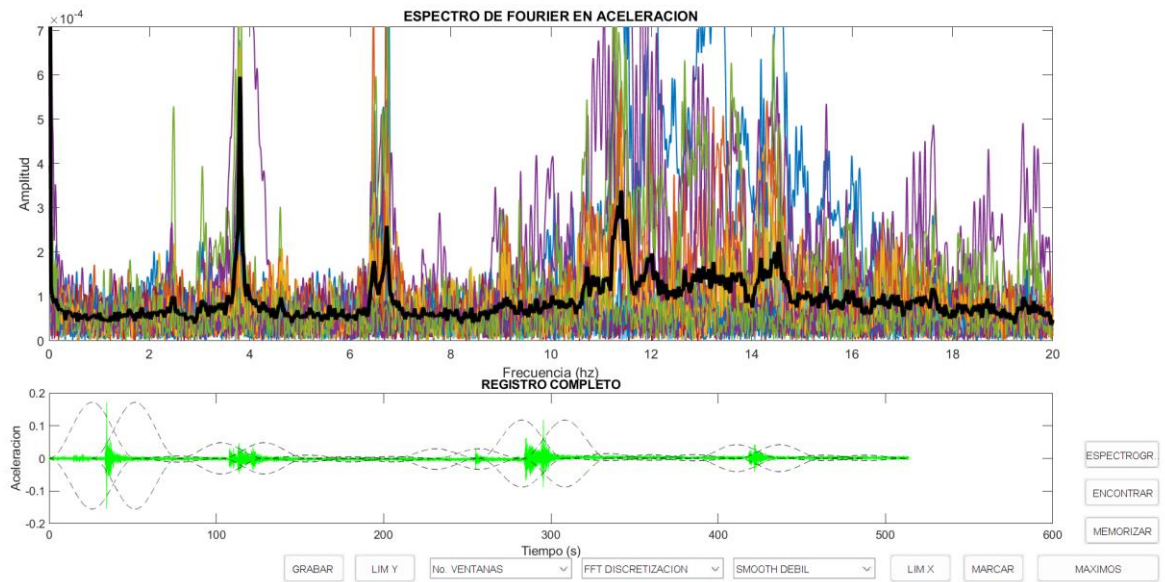
Fuente: Propia

Anexo 88.CH2B-02-19-R60-90



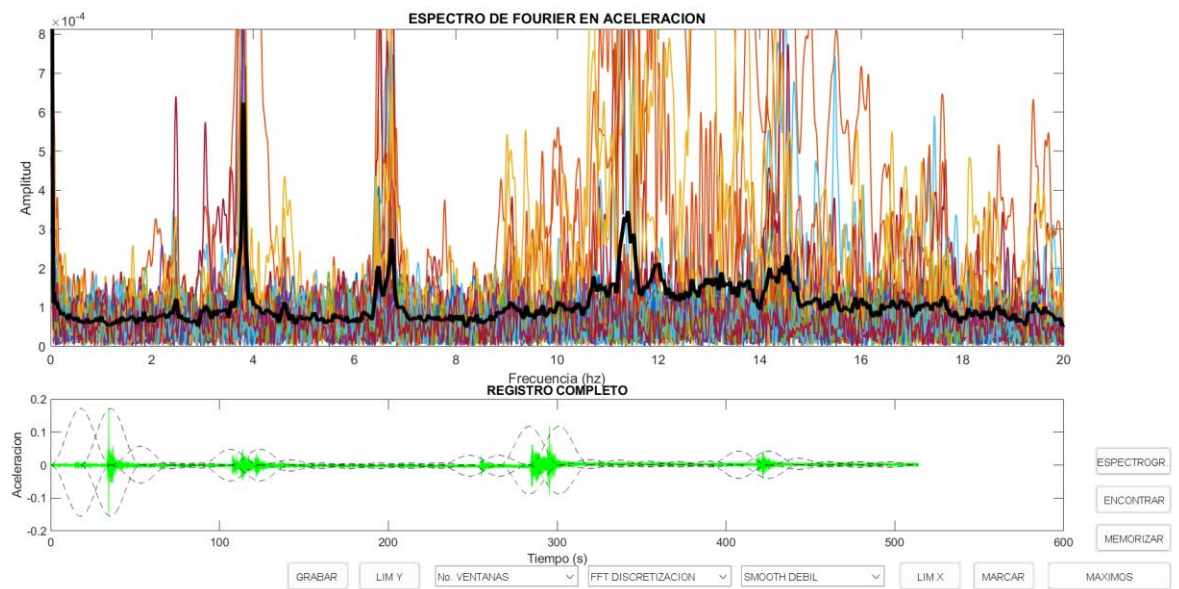
Fuente: Propia

Anexo 89.CH2B-02-19-R45-60



Fuente: Propia

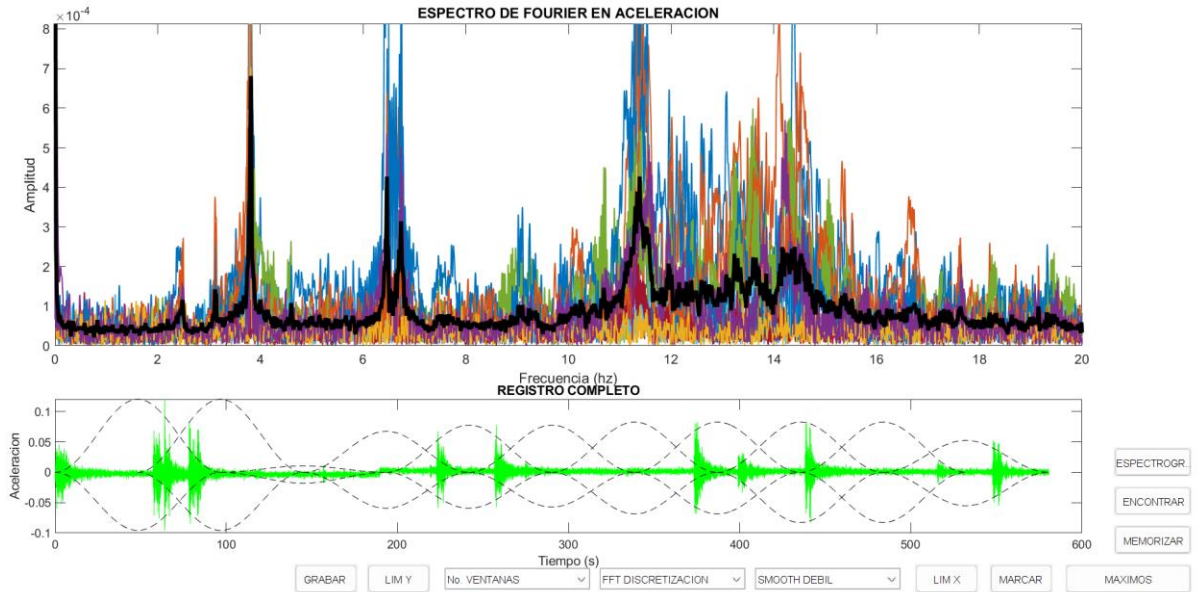
Anexo 90.CH2B-02-19-R30-45



Fuente: Propia

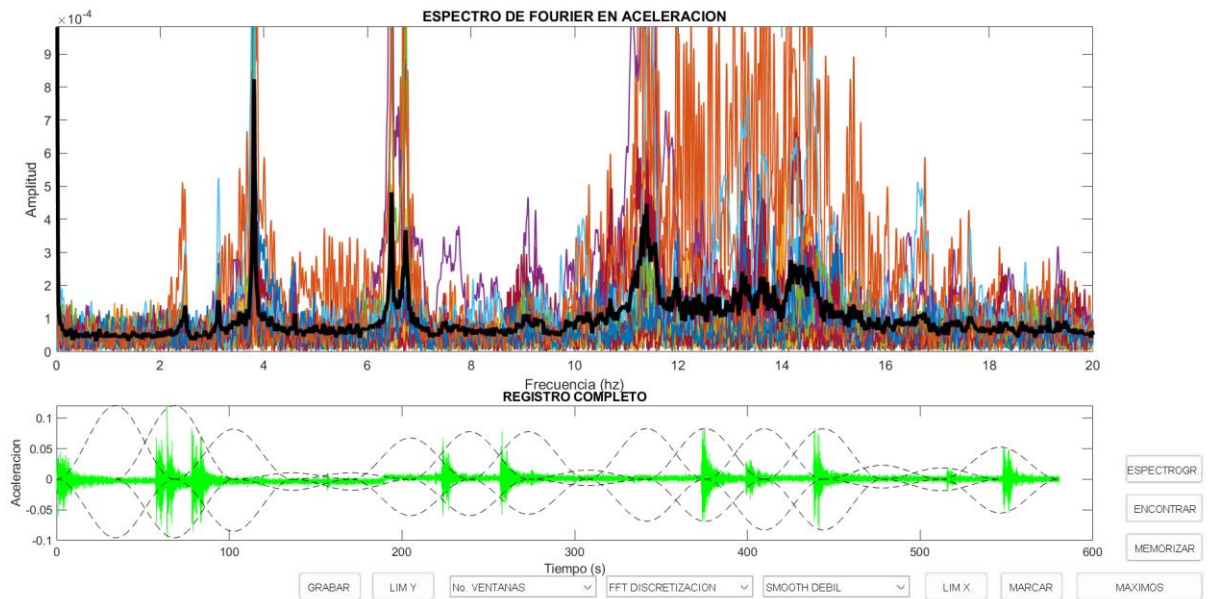
**CERCHA 2**  
**SITIO B**  
**CH2B-03-52**

Anexo 91.CH2B-03-52-R90-120



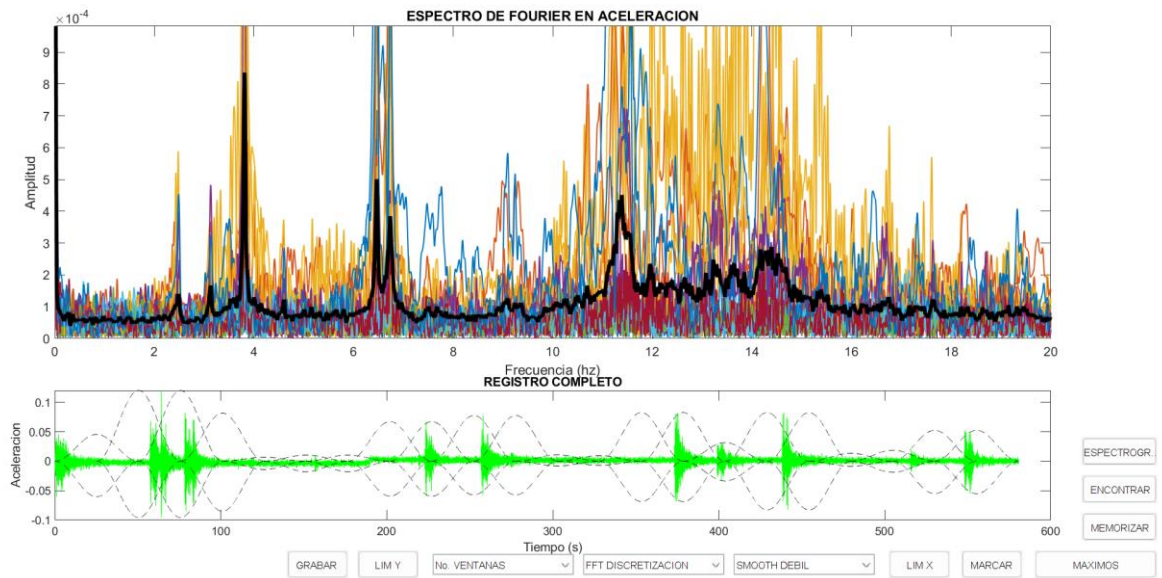
Fuente: Propia

Anexo 92.CH2B-03-52-R60-90



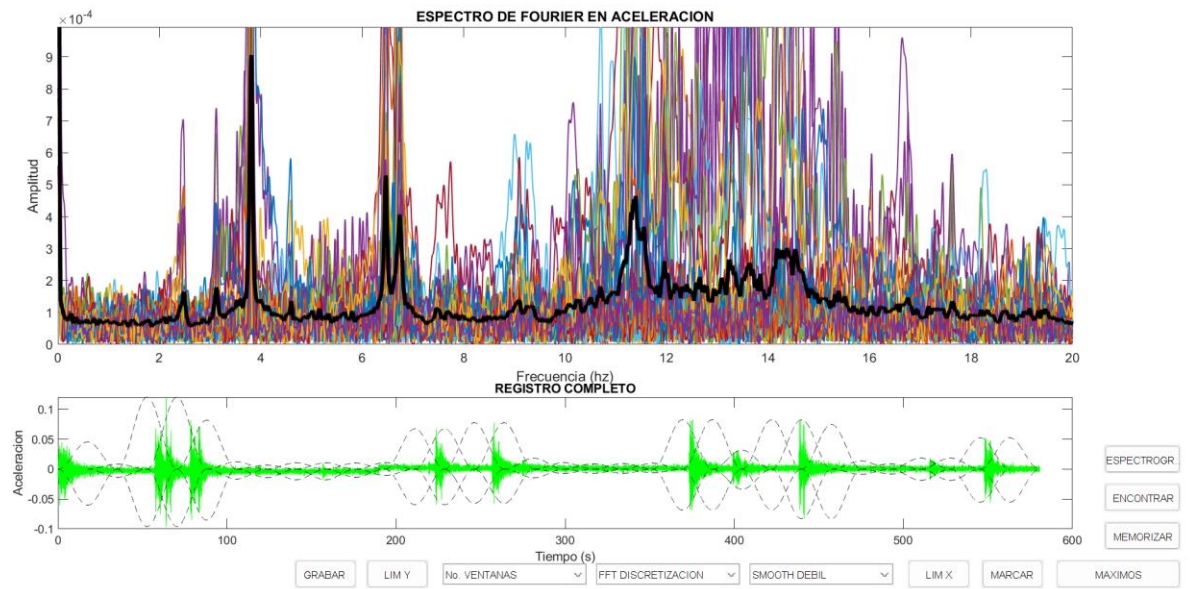
Fuente: Propia

Anexo 93.CH2B-03-52-R45-60



Fuente: Propia

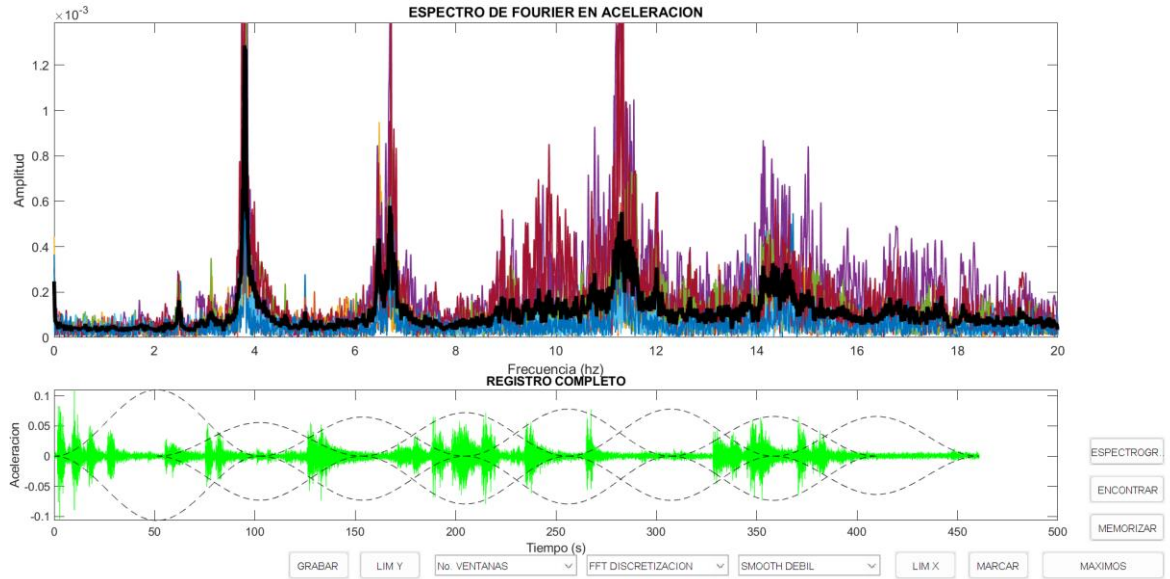
Anexo 94CH2B-03-52-R30-45



Fuente: Propia

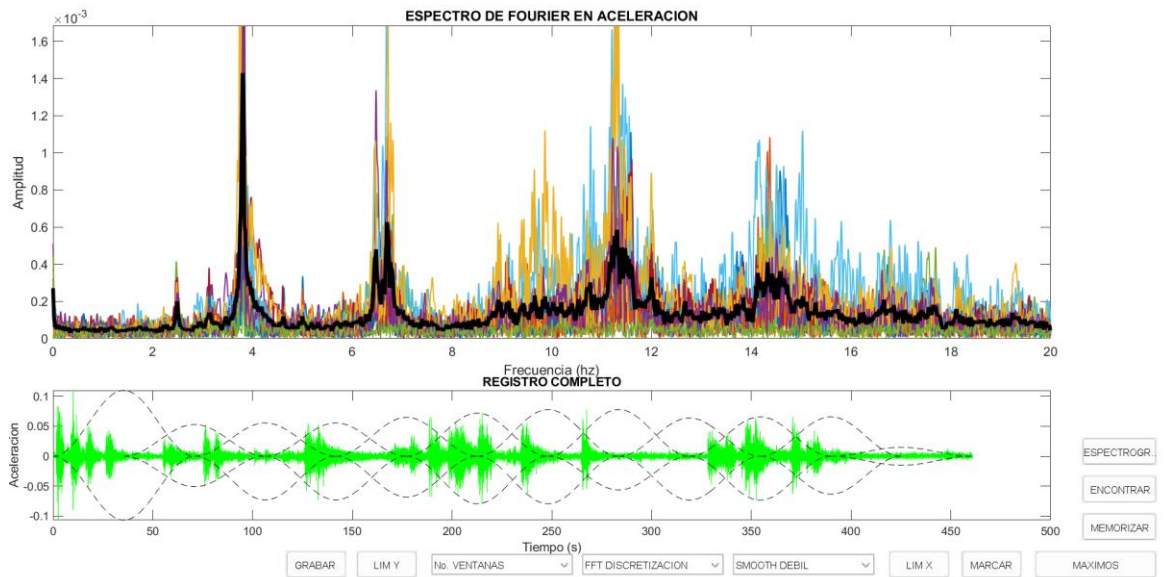
**CERCHA 2**  
**SITIO B**  
**CH2B-05-59**

Anexo 95.CH2B-05-59-R90-120



Fuente: Propia

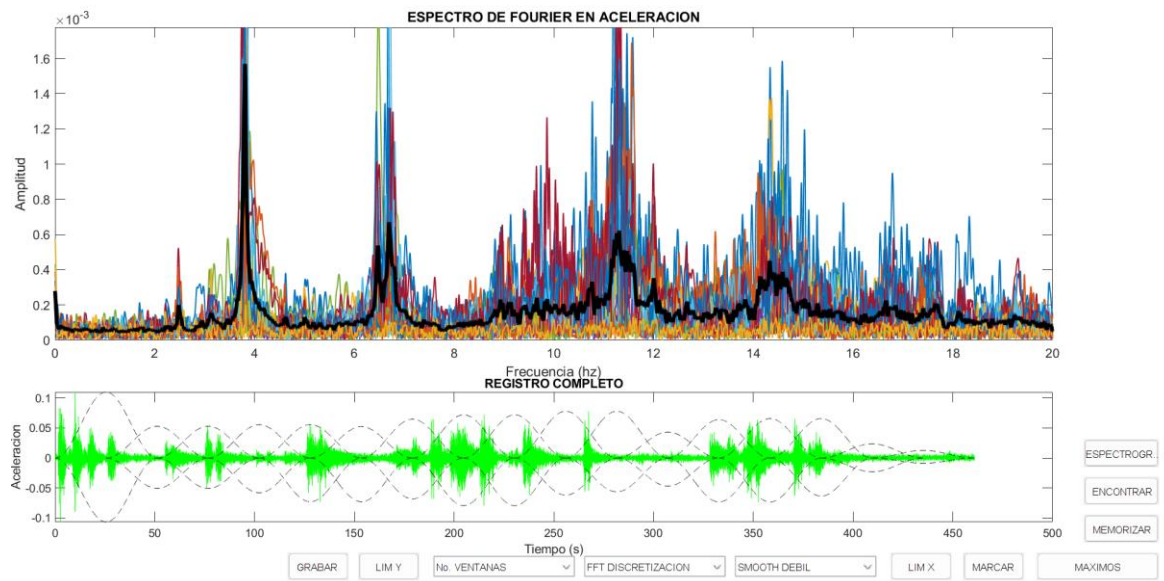
Anexo 96.CH2B-05-59-R60-90



Fuente: Propia

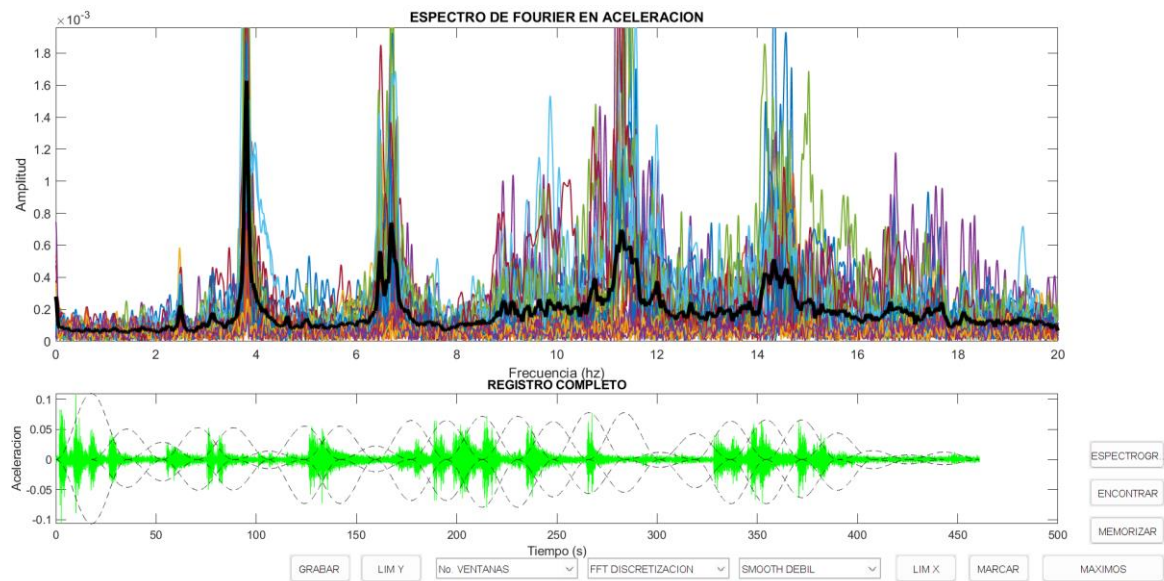


## Anexo 97.CH2B-05-59-R45-60



Fuente: Propia

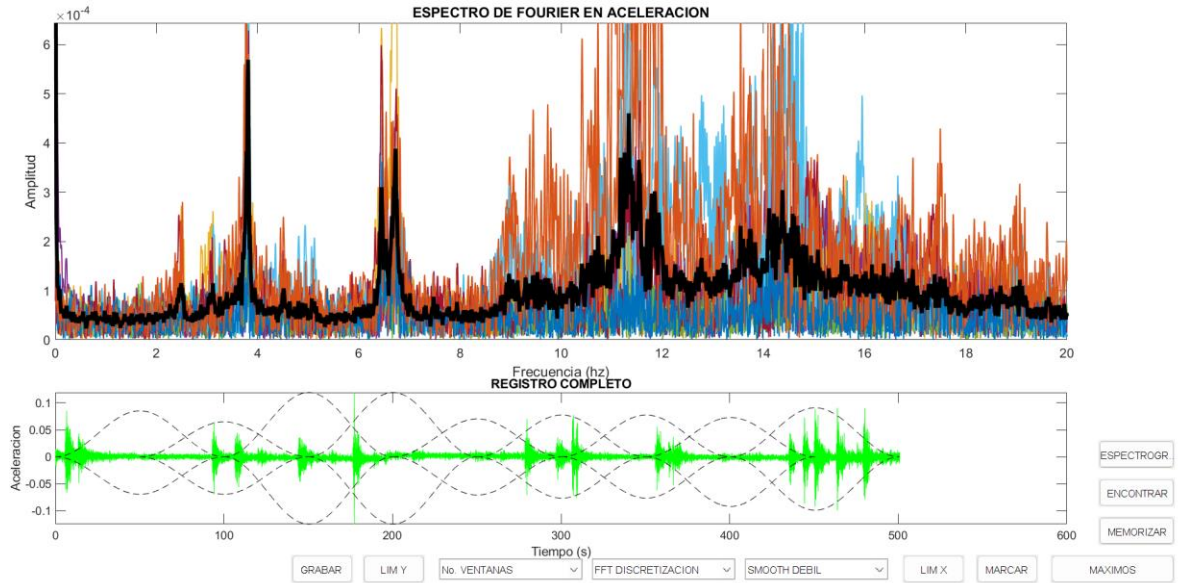
## Anexo 98.CH2B-05-59-R30-45



Fuente: Propia

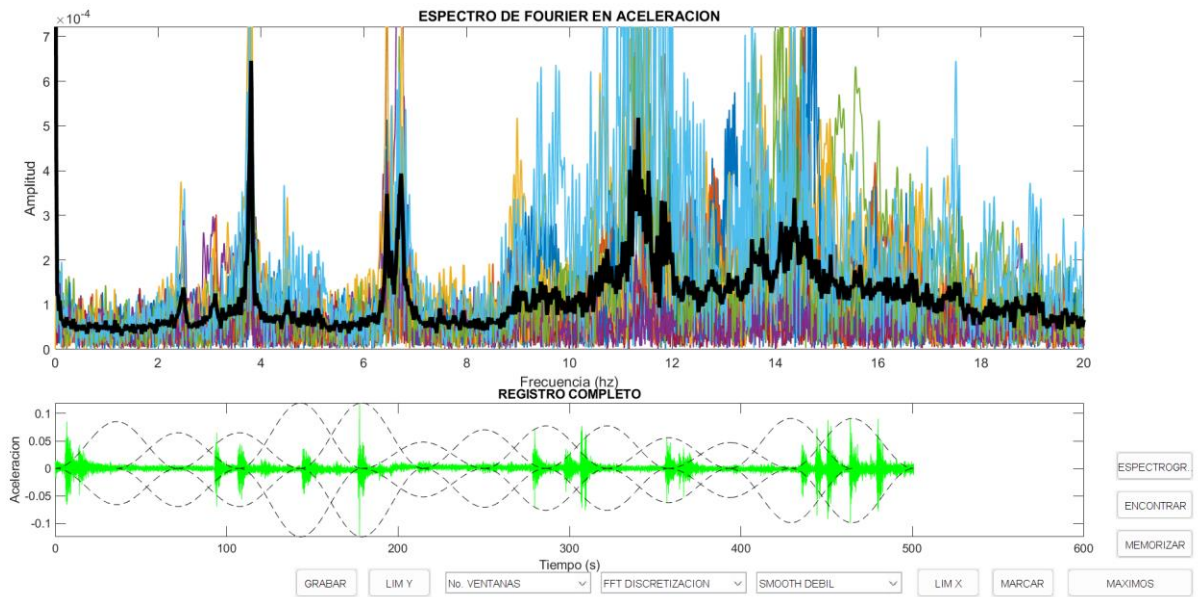
**CERCHA 2**  
**SITIO B**  
**CH2B-07-58**

Anexo 99.CH2B-07-58-R90-120



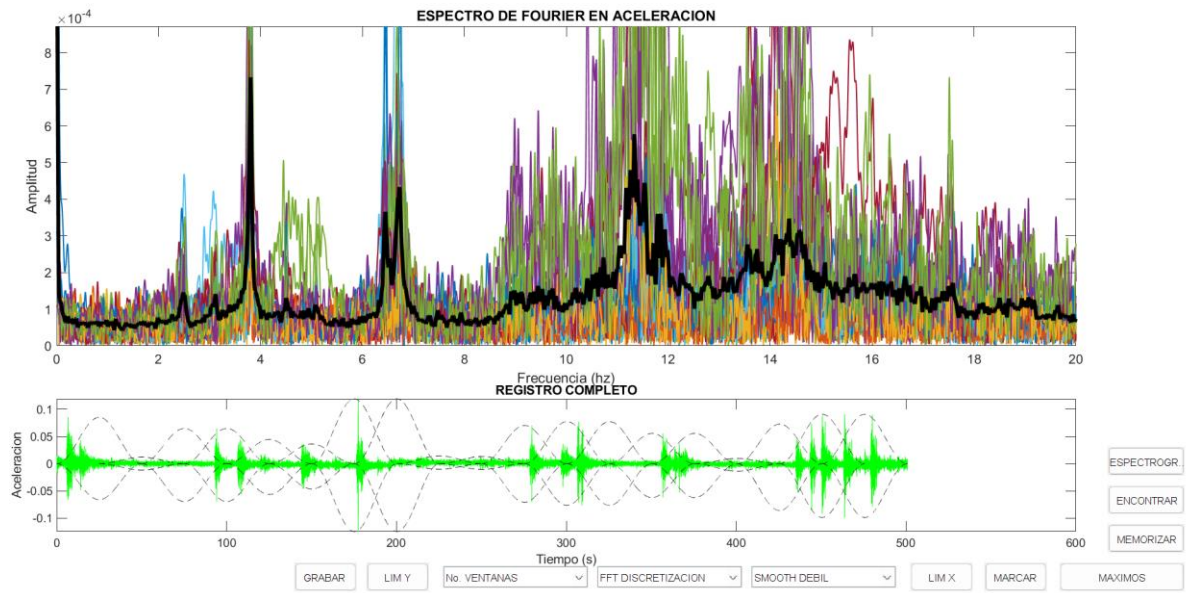
Fuente: Propia

Anexo 100.CH2B-07-58-R60-90



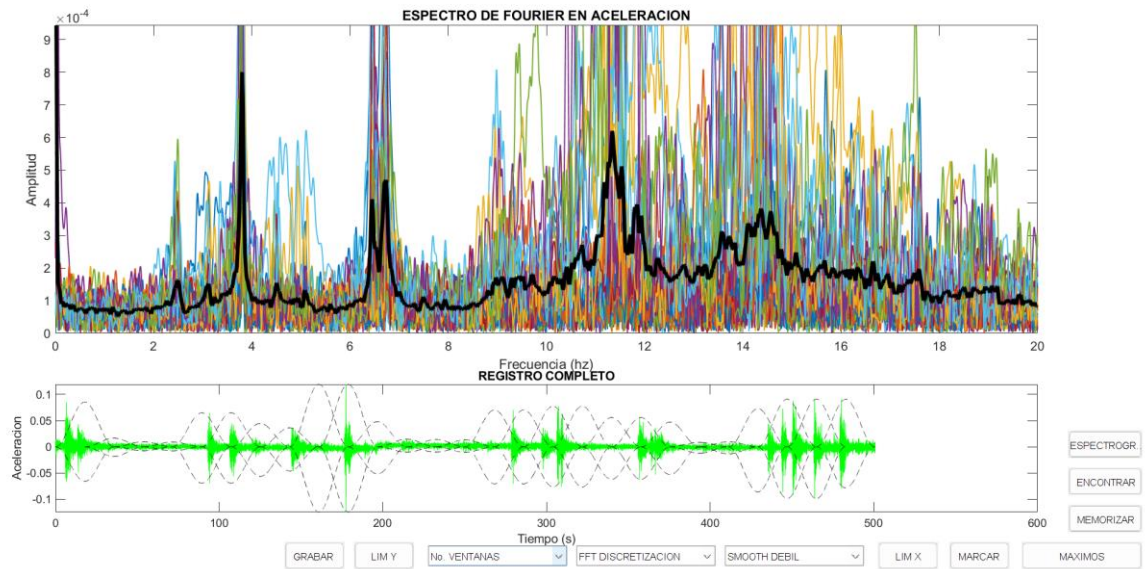
Fuente: Propia

Anexo 101.CH2B-07-58-R45-60



Fuente: Propia

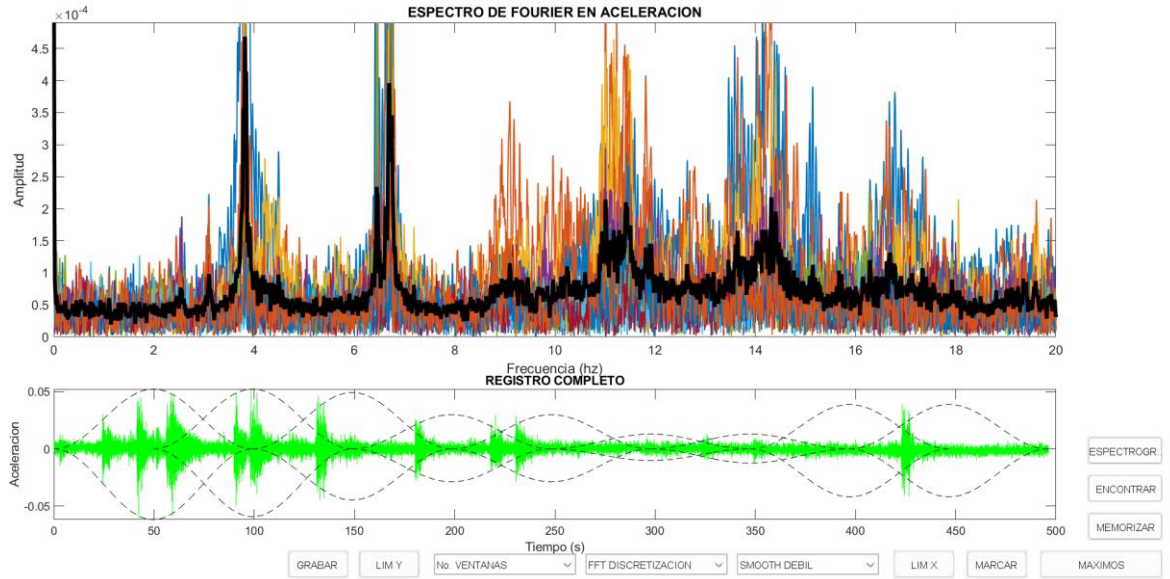
Anexo 102.CH2B-07-58-R30-45



Fuente: Propia

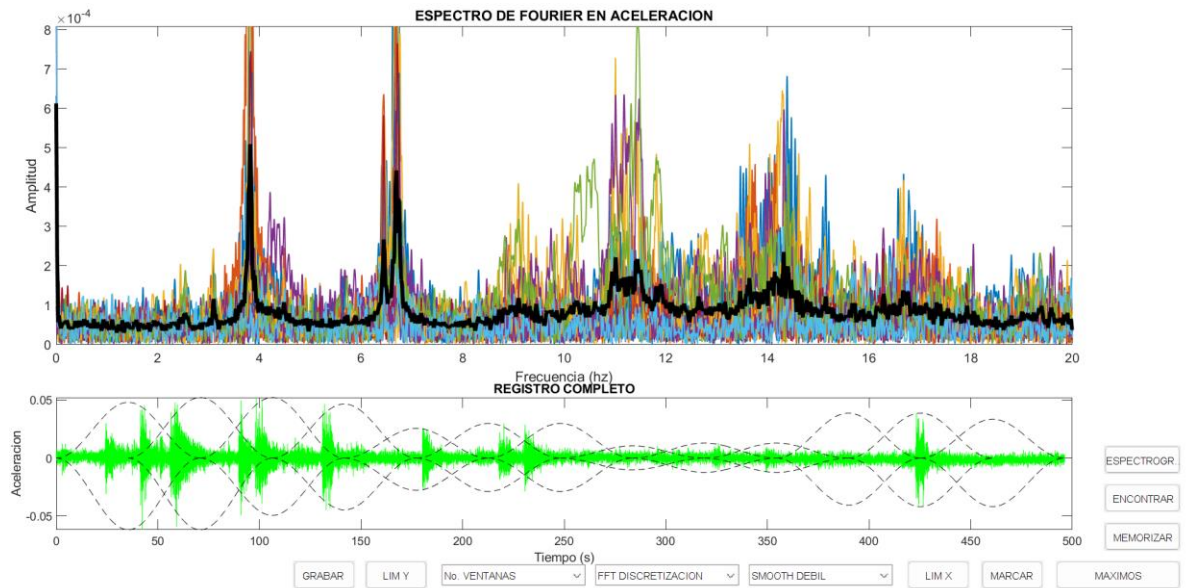
**CERCHA 2**  
**SITIO B**  
**CH2B-10-25**

Anexo 103.CH2B-10-25-R90-120



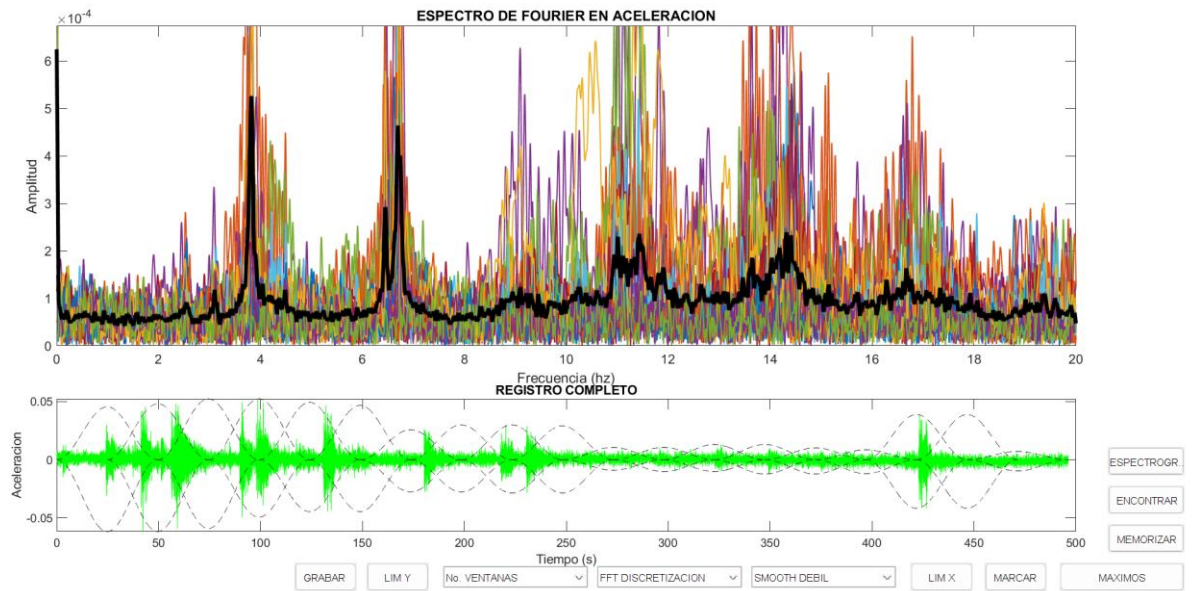
Fuente: Propia

Anexo 104.CH2B-10-25-R60-90



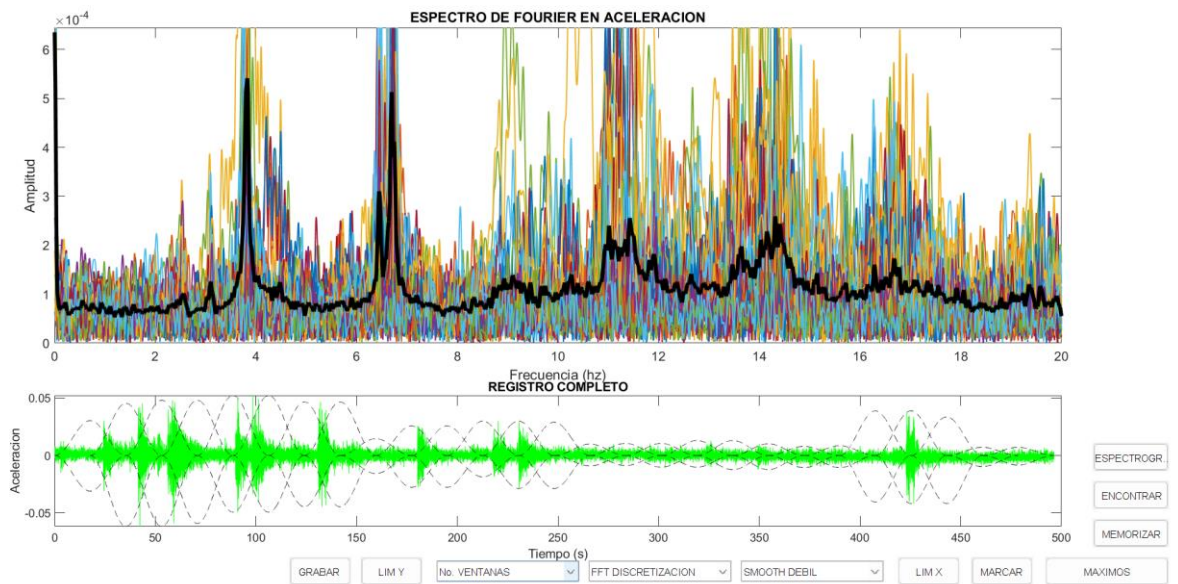
Fuente: Propia

## Anexo 105.CH2B-10-25-R45-60



Fuente: Propia

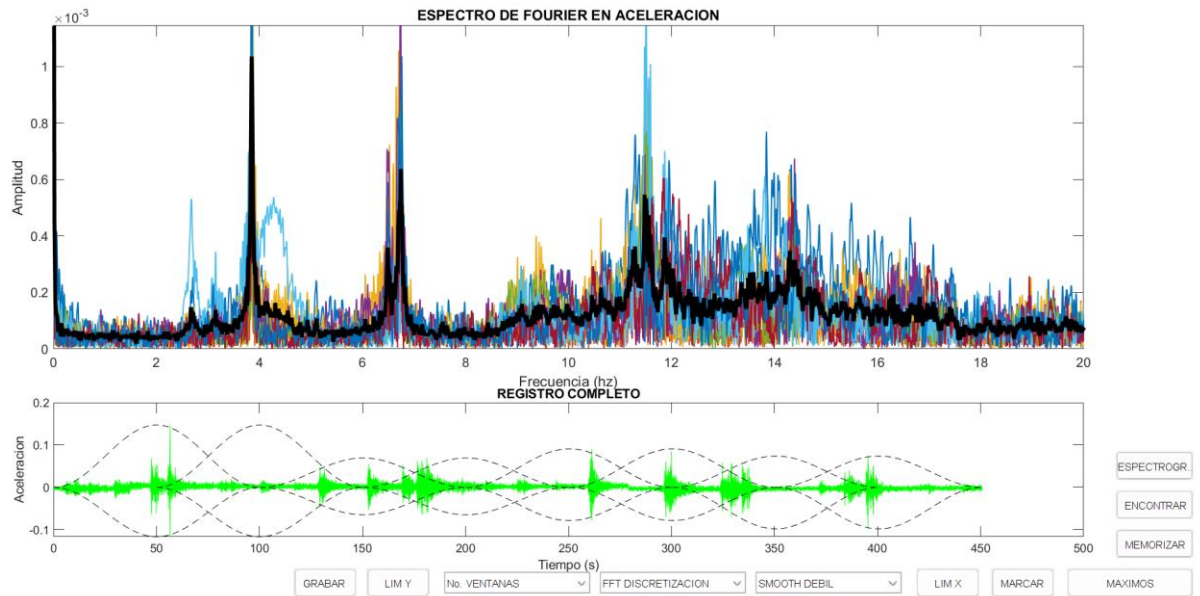
## Anexo 106.CH2B-10-25-R30-45



Fuente: Propia

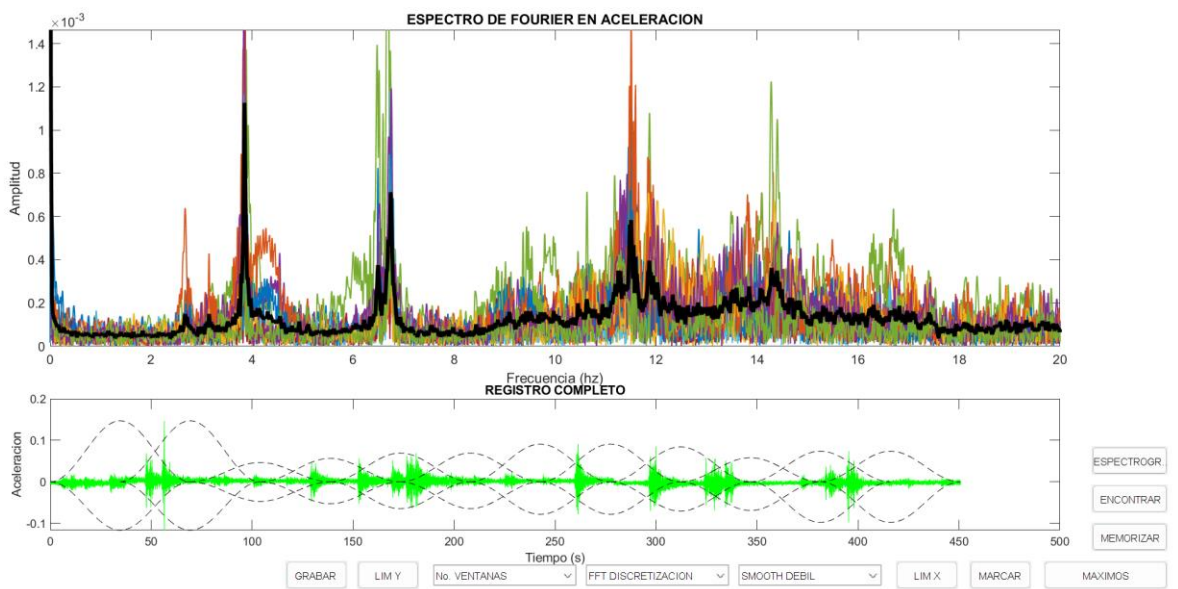
**CERCHA 2**  
**SITIO B**  
**CH2B-12-24**

Anexo 107.CH2B-12-24-R90-120



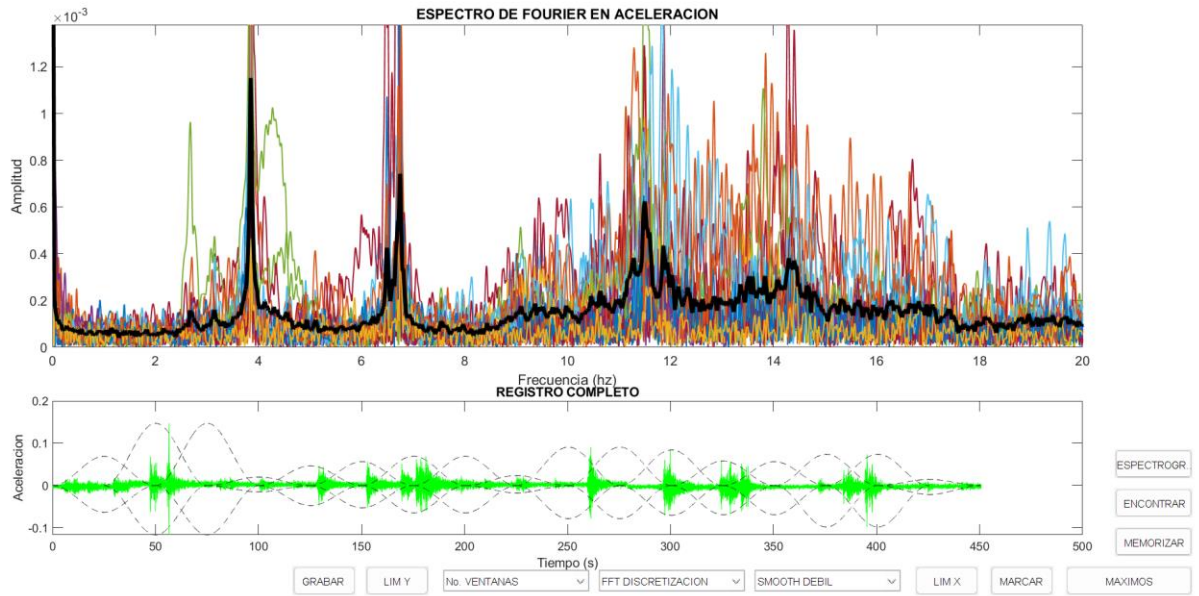
Fuente: Propia

Anexo 108.CH2B-12-24-R60-90



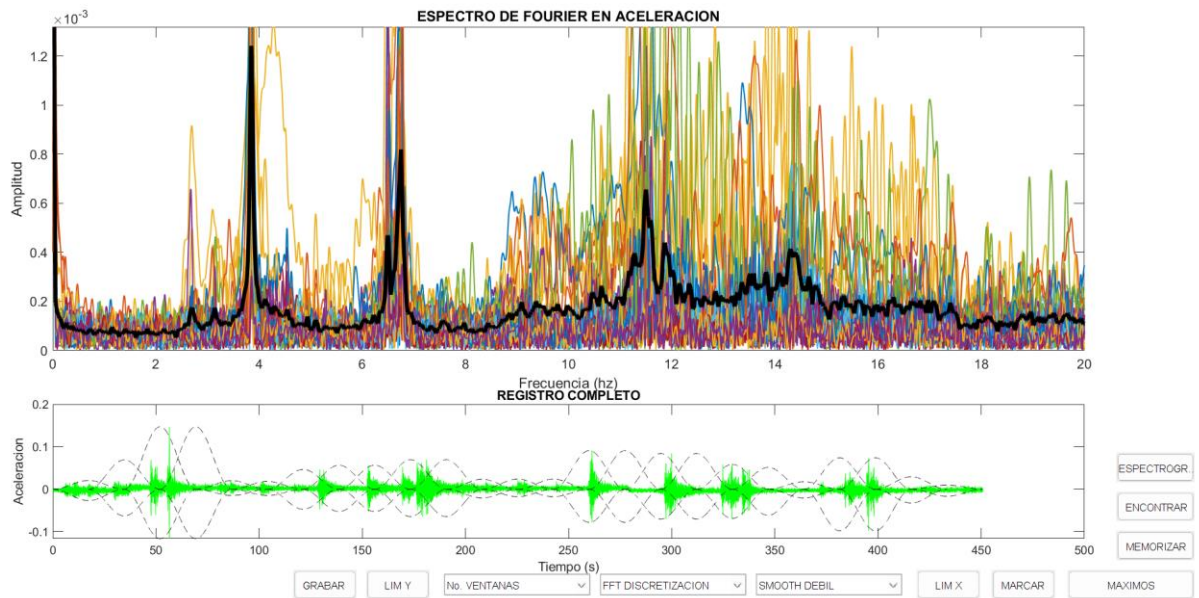
Fuente: Propia

Anexo 109.CH2B-12-24-R45-60



Fuente: Propia

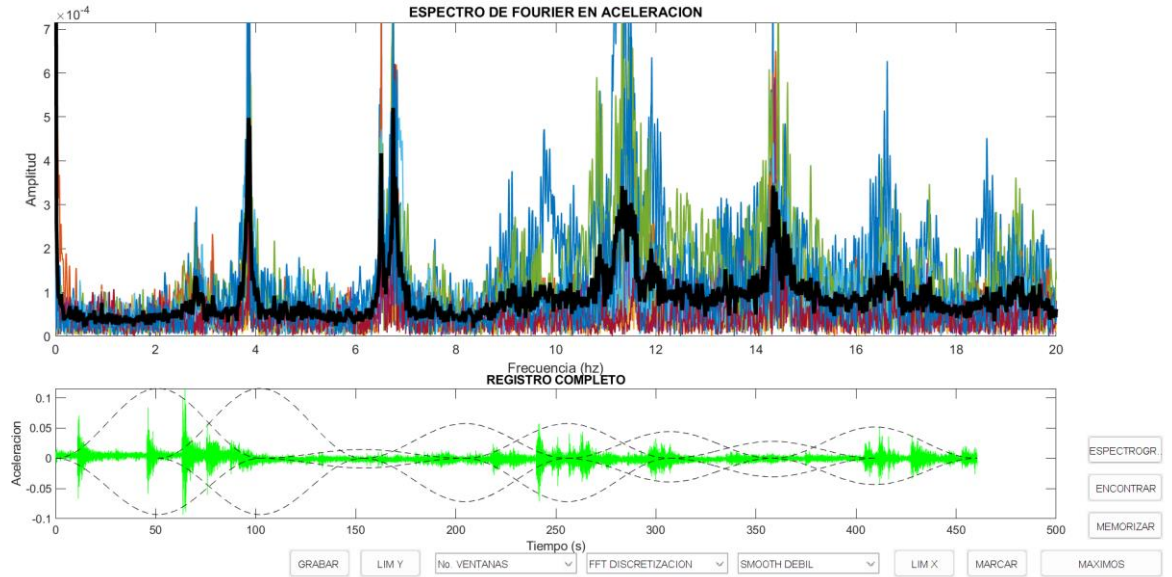
Anexo 110.CH2B-12-24-R30-45



Fuente: Propia

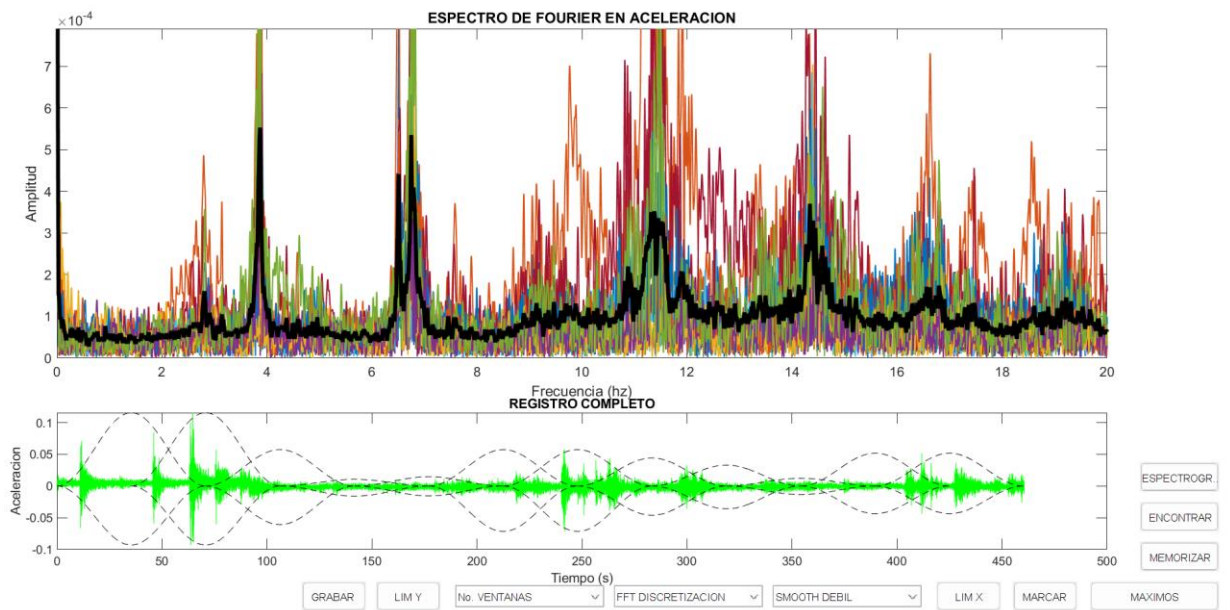
**CERCHA 2**  
**SITIO B**  
**CH2B-14-22**

Anexo 111.CH2B-14-22-R90-120



Fuente: Propia

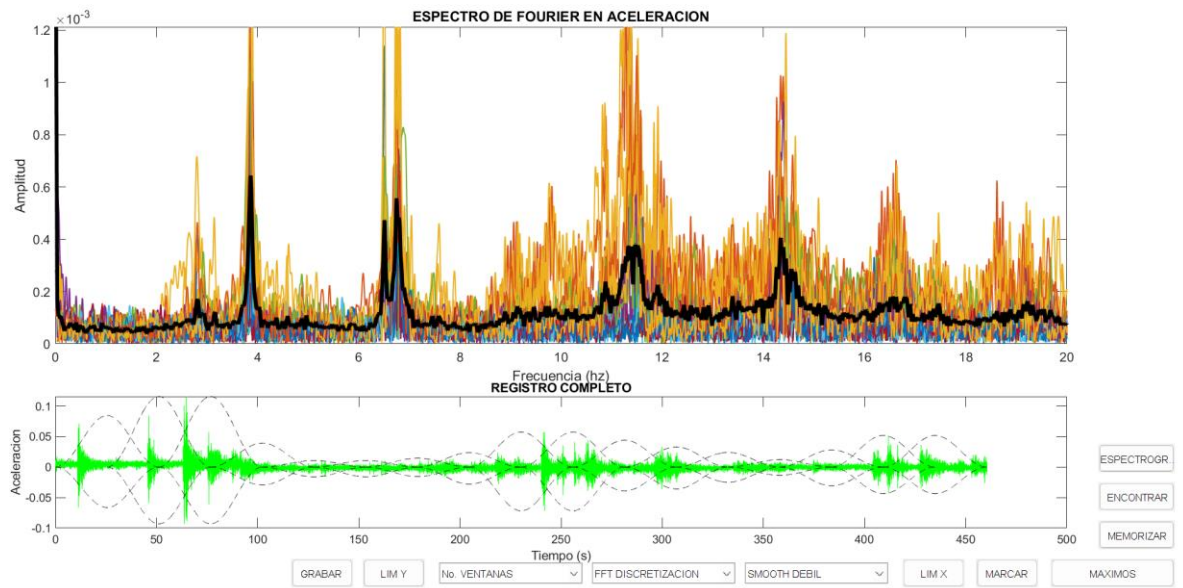
Anexo 112.CH2B-14-22-R60-90



Fuente: Propia

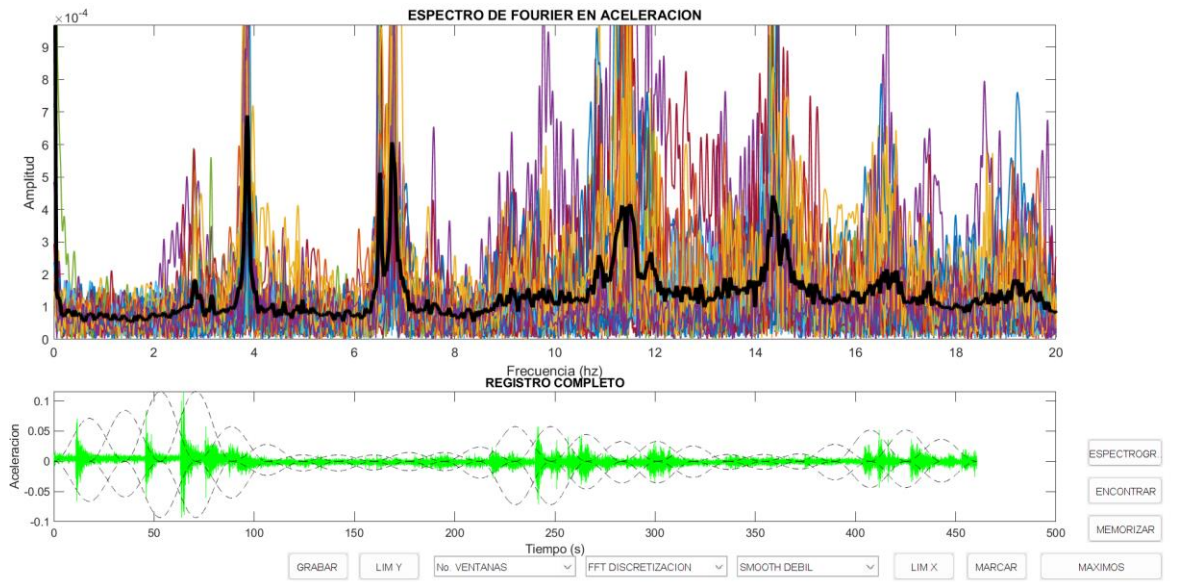


Anexo 113.CH2B-14-22-R45-60



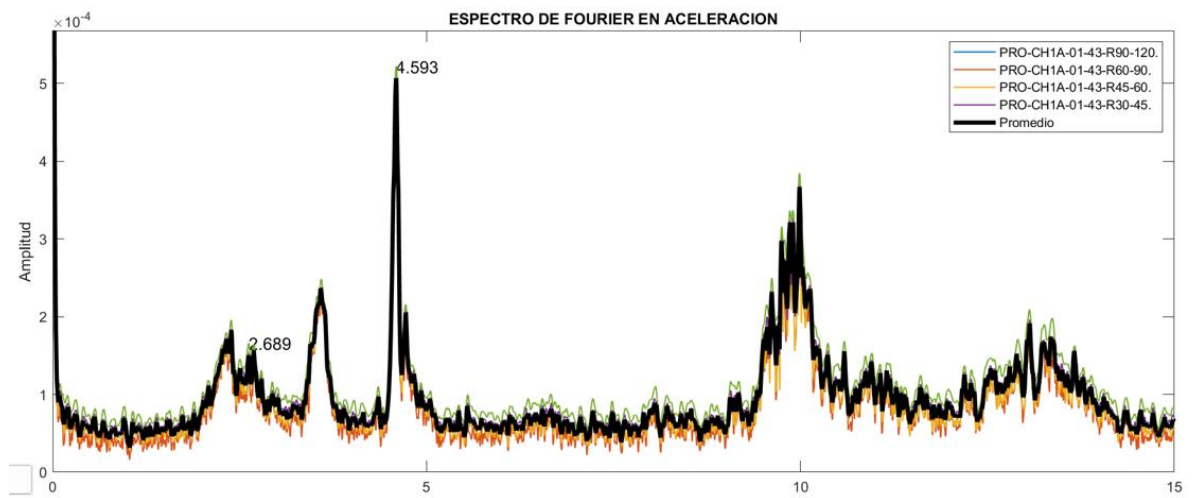
Fuente: Propia

Anexo 114.CH2B-14-22-R30-45



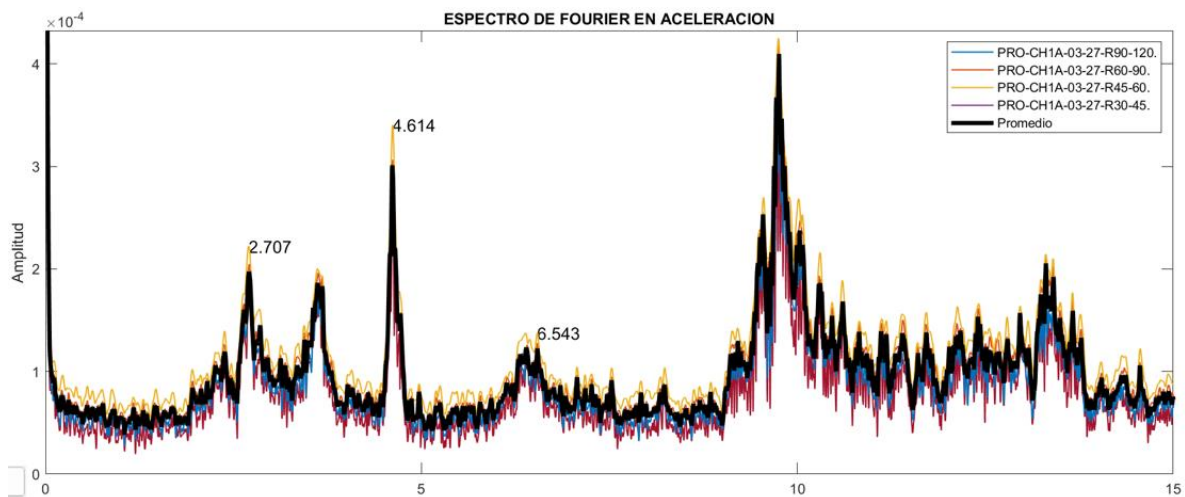
Fuente: Propia

## Anexo 115. Registro de frecuencias en la CH1 A, 01:43



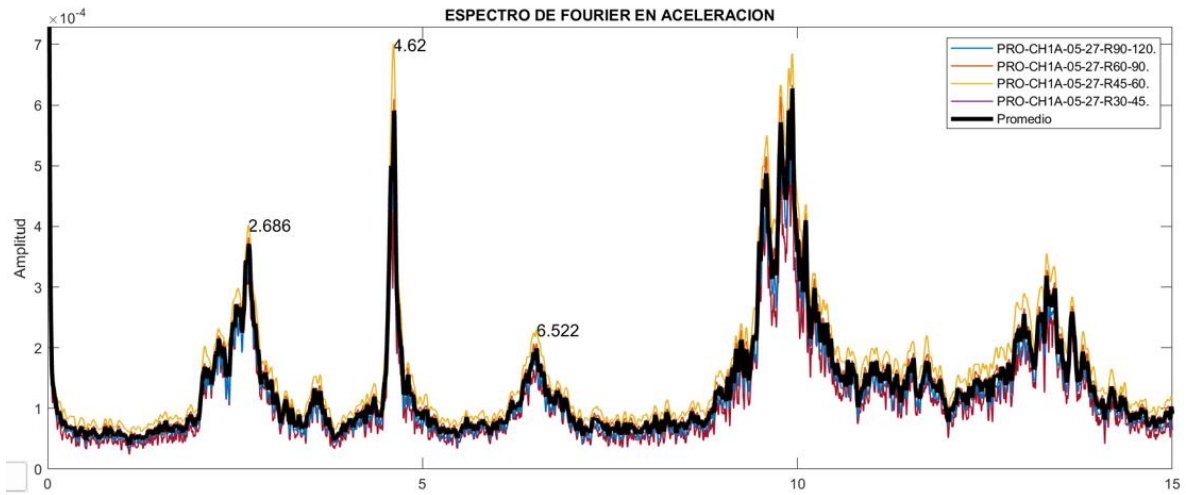
Fuente: propia

## Anexo 116. Registro de frecuencias en la CH1 A, 03:27



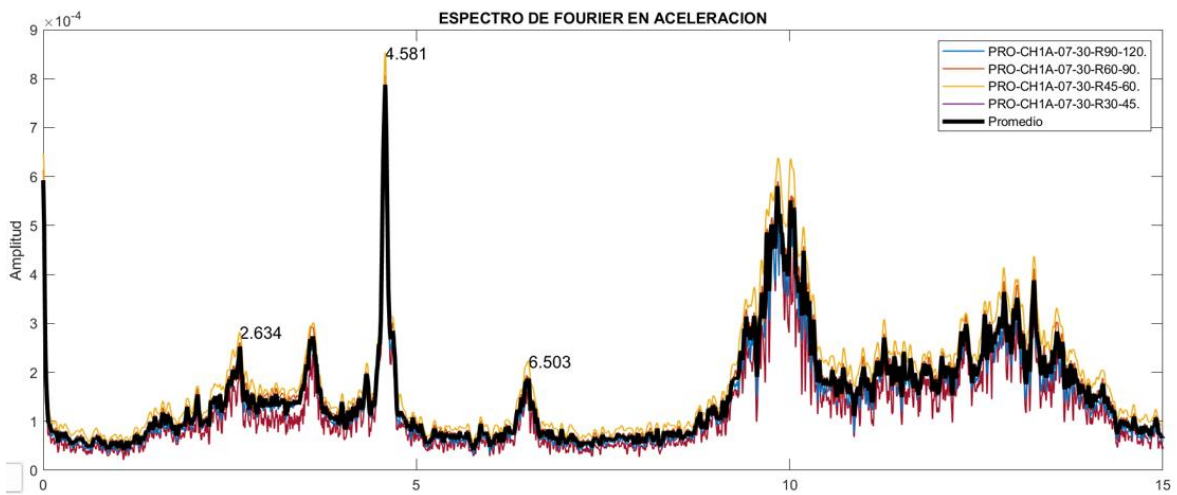
Fuente: propia

## Anexo 117. Registro de frecuencias en la CH1 A, 05:27



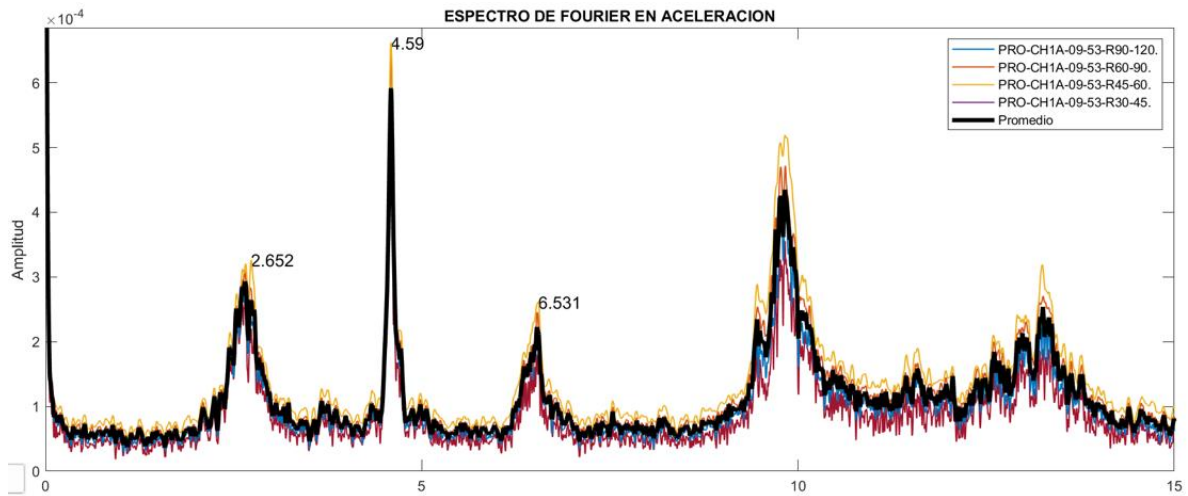
Fuente: Propia

## Anexo 118. Registro de frecuencias en la CH1 A, 07:30



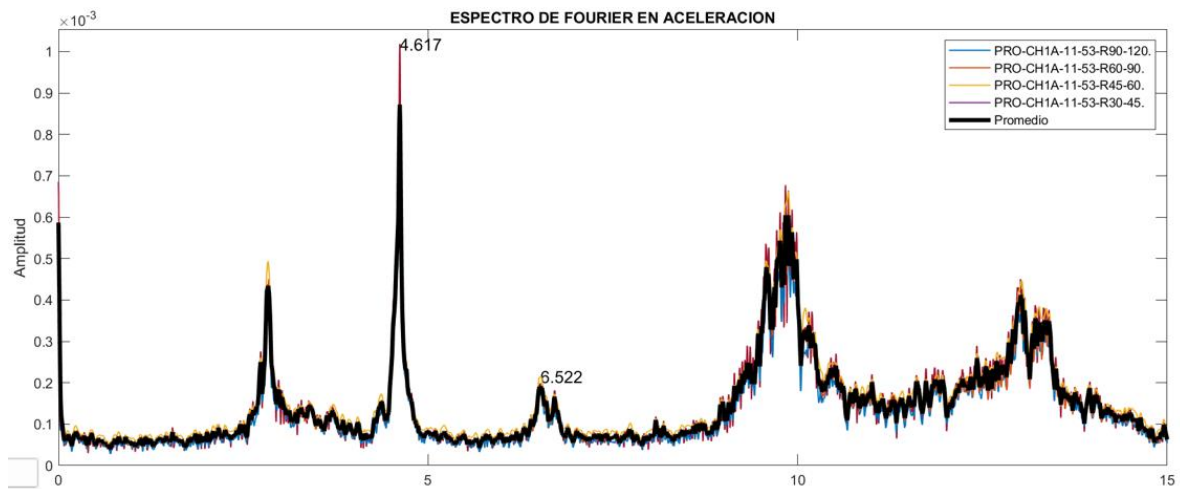
Fuente: Propia

## Anexo 119. Registro de frecuencias en CH1 A, 09:53



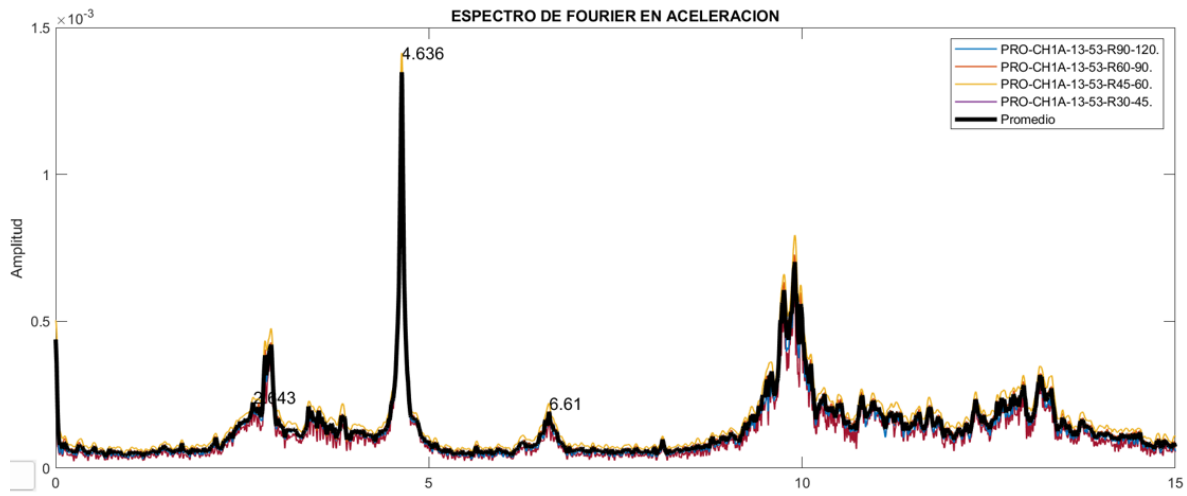
Fuente: Propia

## Anexo 120. Registro de frecuencias en CH1 A, 11:53



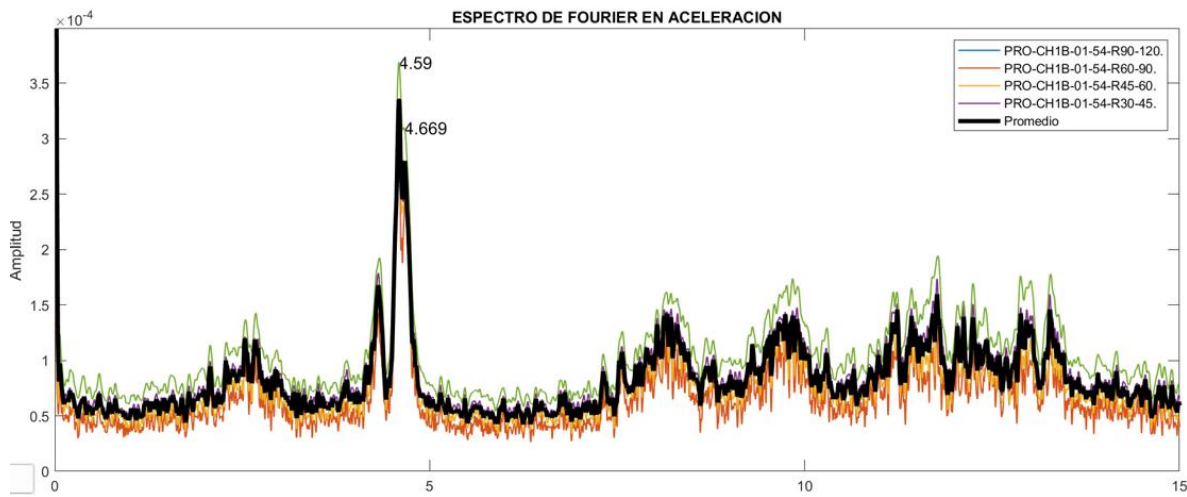
Fuente: Propia

## Anexo 121.Registro de frecuencias en CH1A,13:53



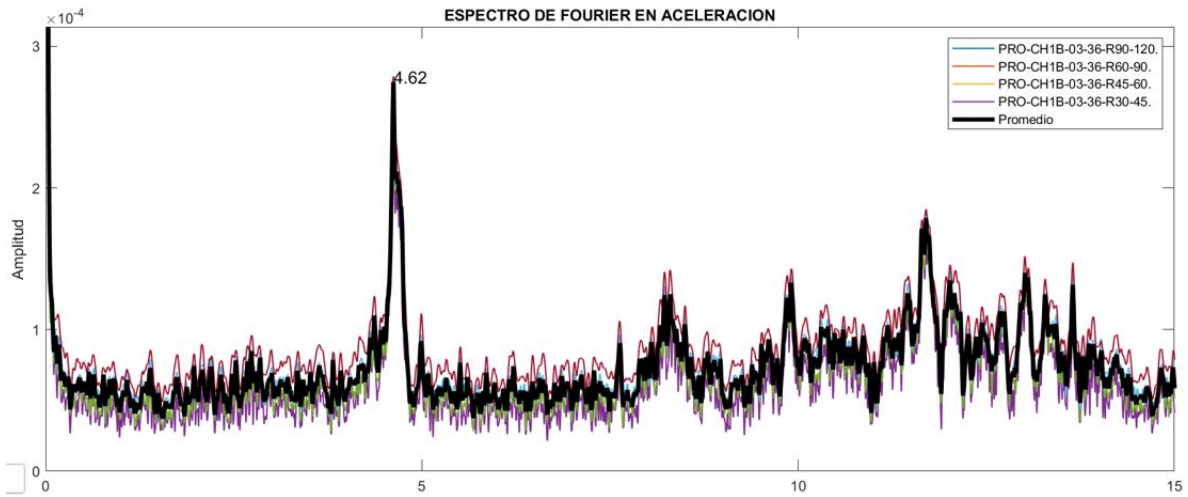
Fuente: Propia

## Anexo 122. Registro de frecuencias en CH1 B, 01:54



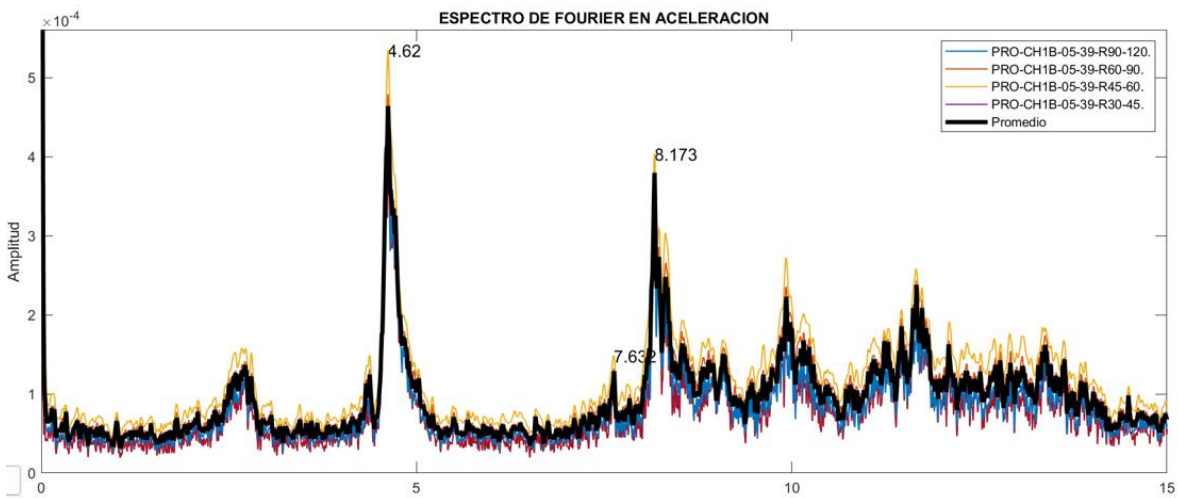
Fuente: Propia

## Anexo 123. Registro de frecuencias en CH1 B, 03:45



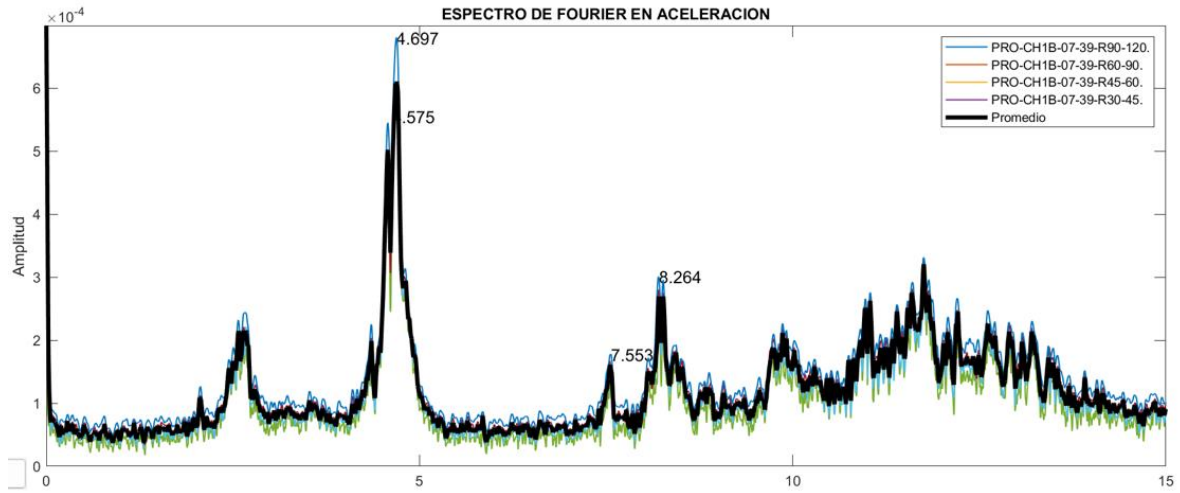
Fuente: Propia

## Anexo 124. Registro de frecuencias en CH1 B, 05:39



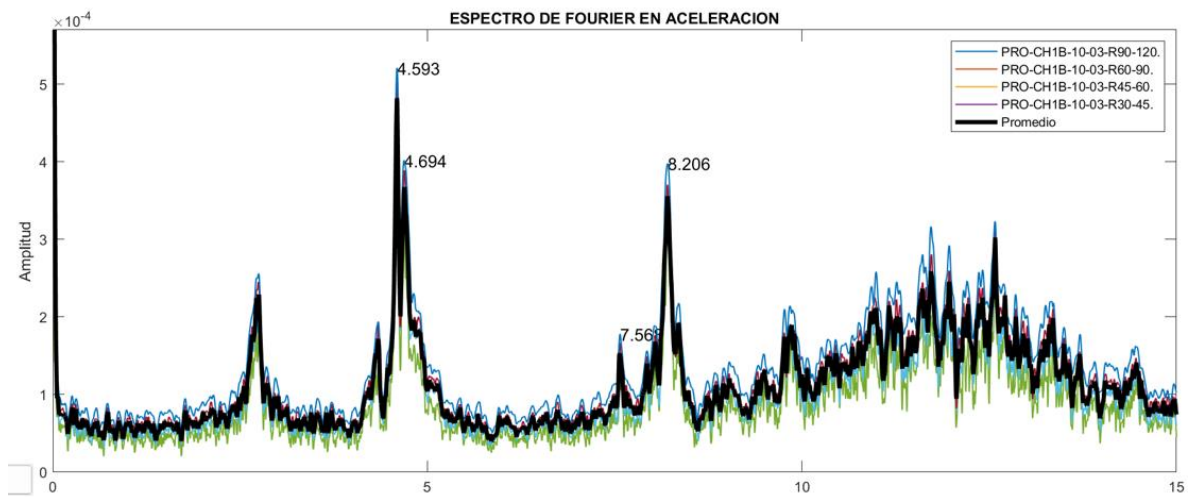
Fuente: Propia

## Anexo 125. Registro de frecuencias en CH1 B, 07:39



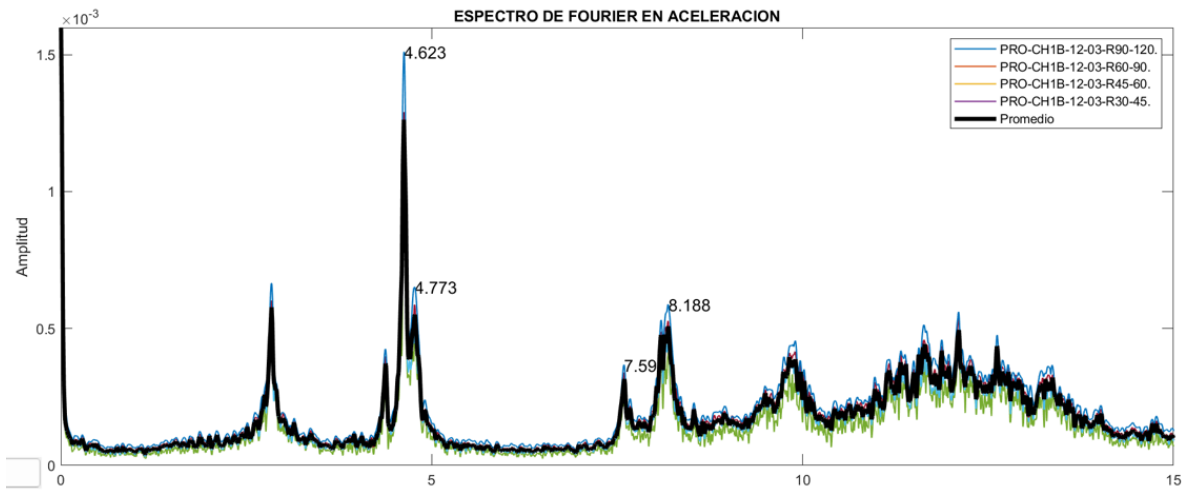
fuente: Propia

## Anexo 126. Registro de frecuencias en CH1 B, 10:03



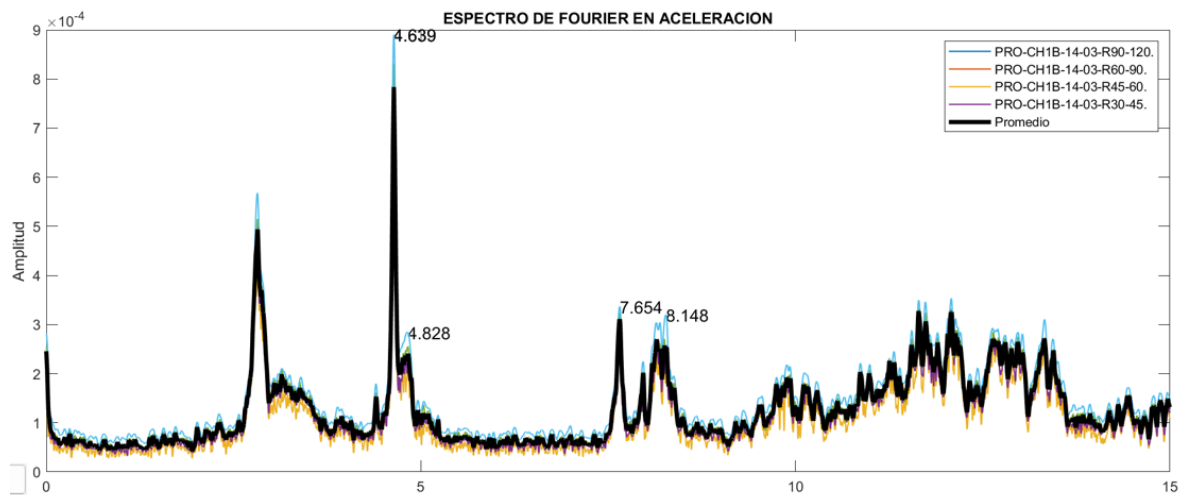
Fuente: Propia

## Anexo 127. Registro de frecuencias en CH1 B, 12:03



Fuente: Propia

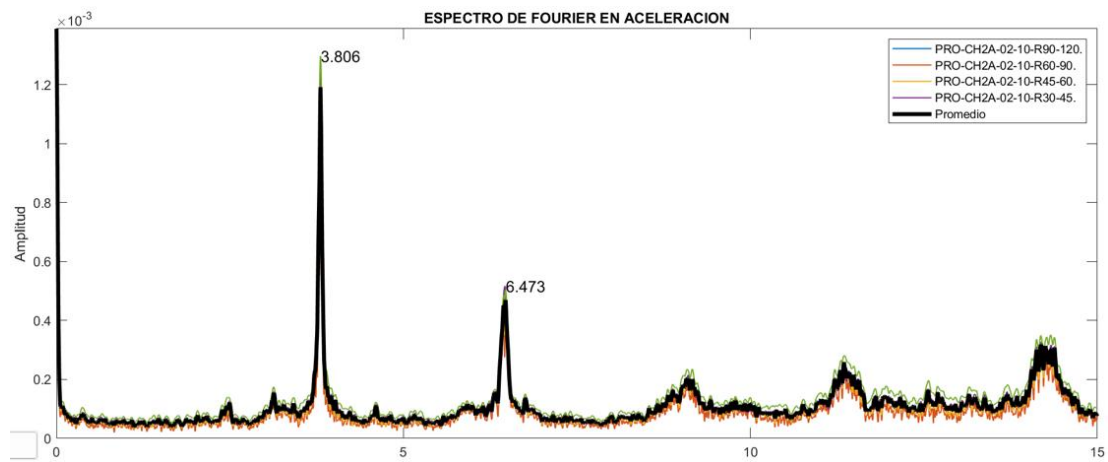
## Anexo 128. Registro de frecuencias en CH1 B, 14:03



Fuente: Propia

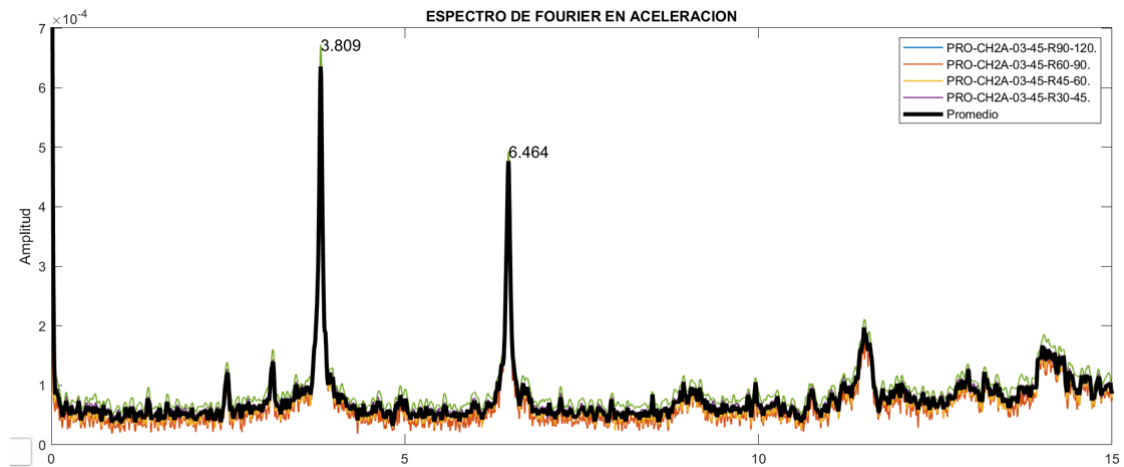


## Anexo 129.Registro de frecuencias en CH2 A, 02:10



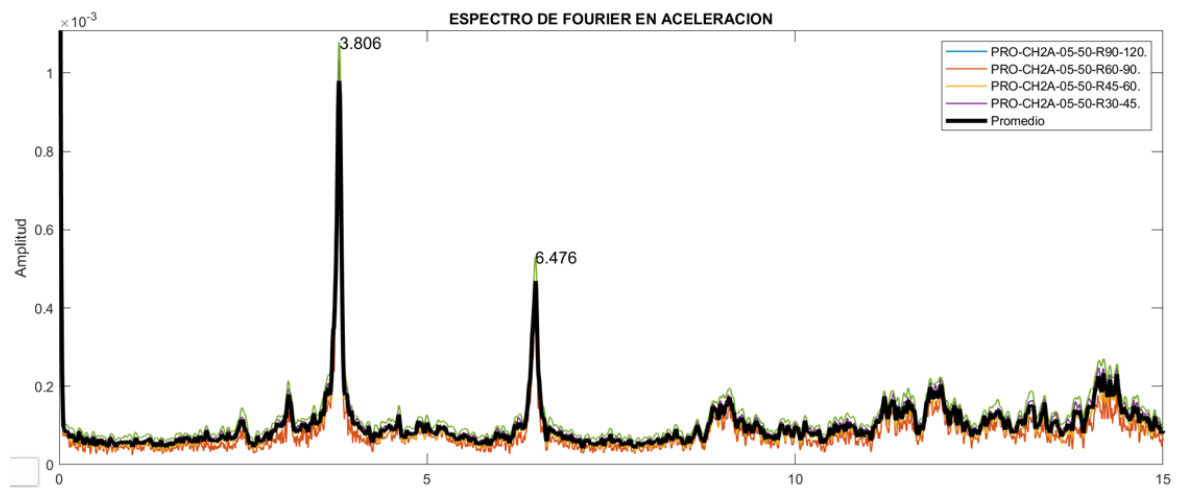
Fuente: Propia

## Anexo 130.Registro de frecuencias en CH2 A, 03:45



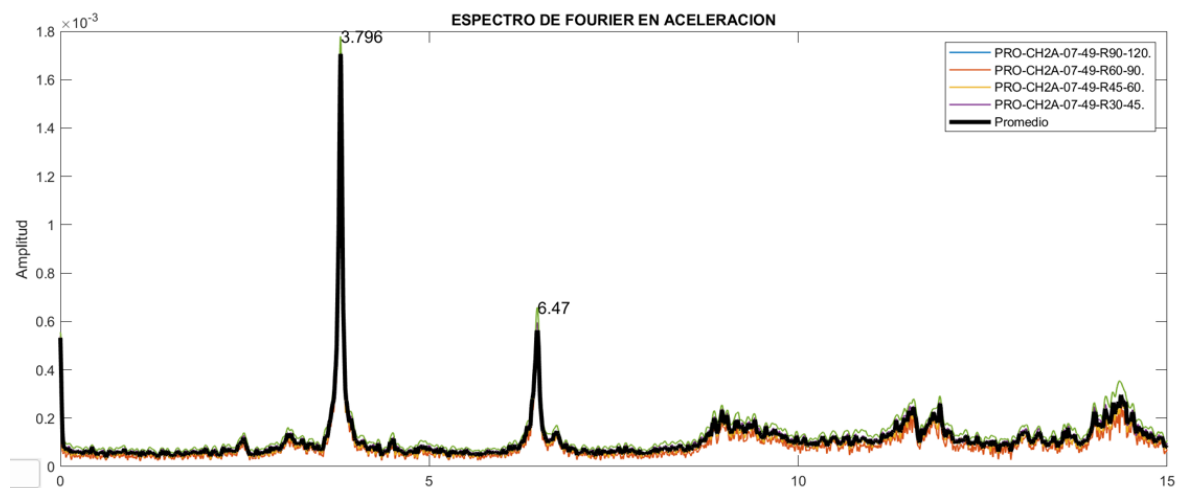
Fuente: Propia

## Anexo 131. Registro de frecuencias en CH2 A, 05:50



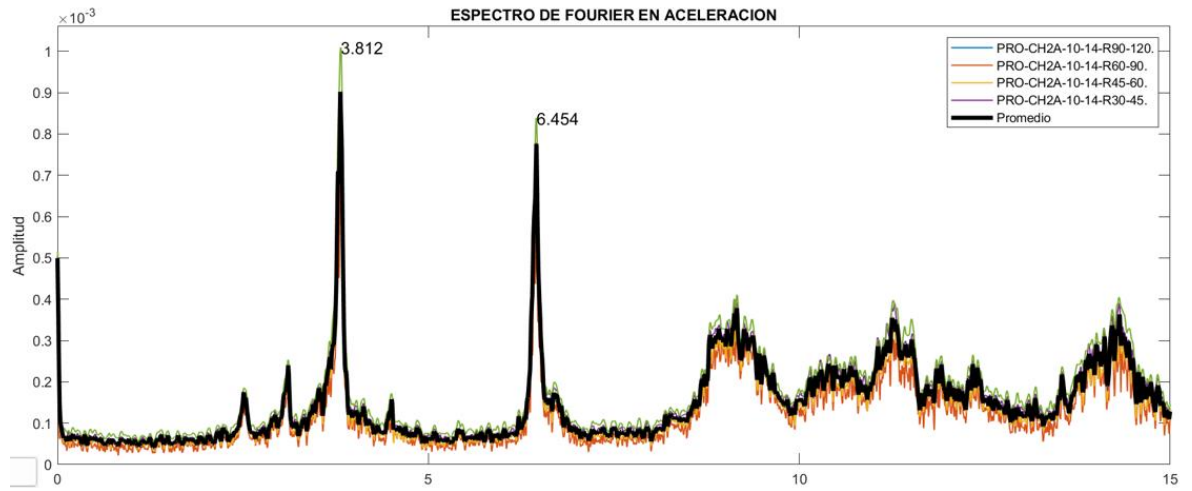
Fuente: Propia

## Anexo 132. Registro de frecuencias en CH2 A, 07:49



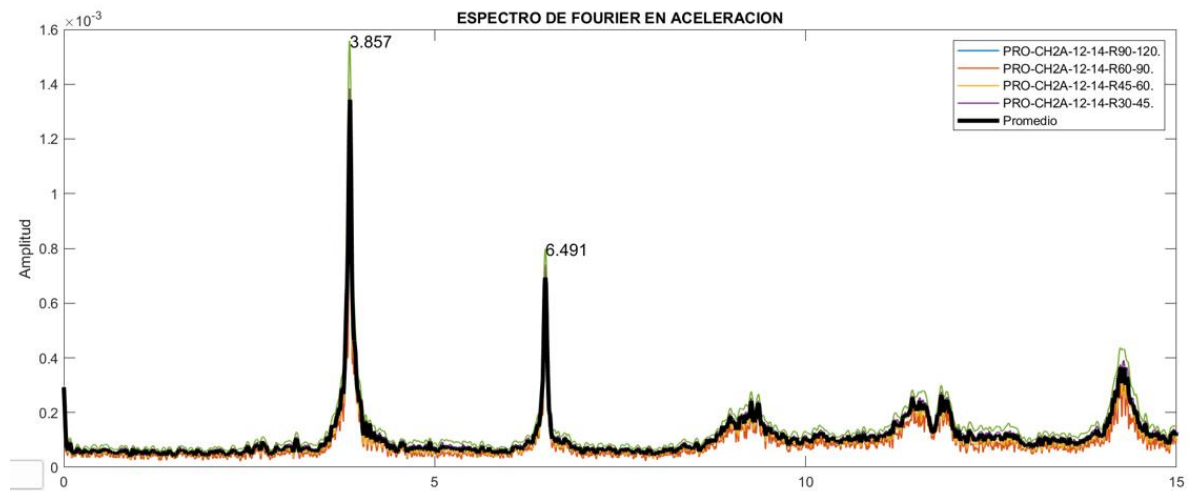
Fuente: Propia

## Anexo 133. Registro de frecuencias en CH2 A, 10:14



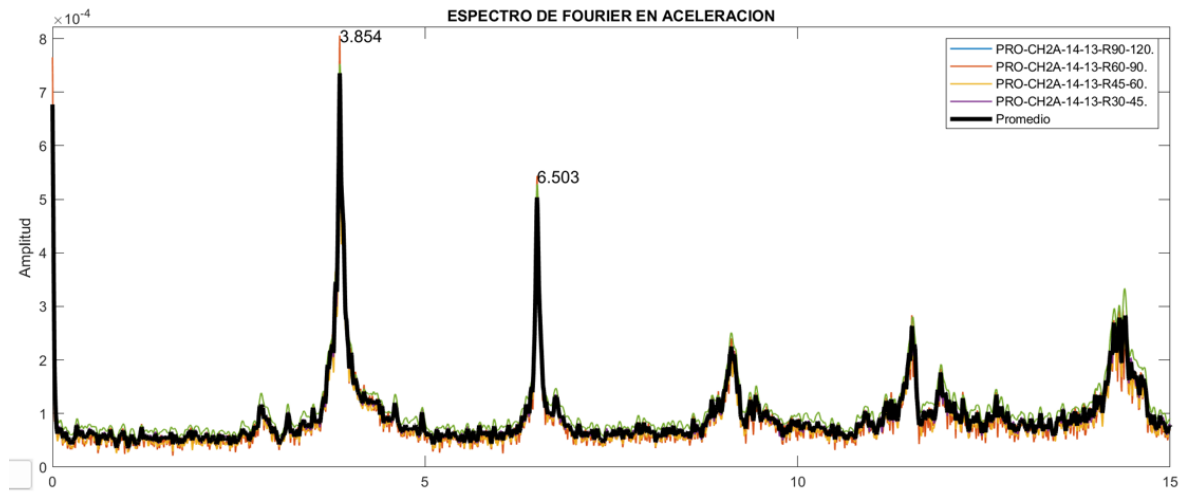
Fuente: Propia

## Anexo 134. Registro de frecuencias en CH2 A, 12:14



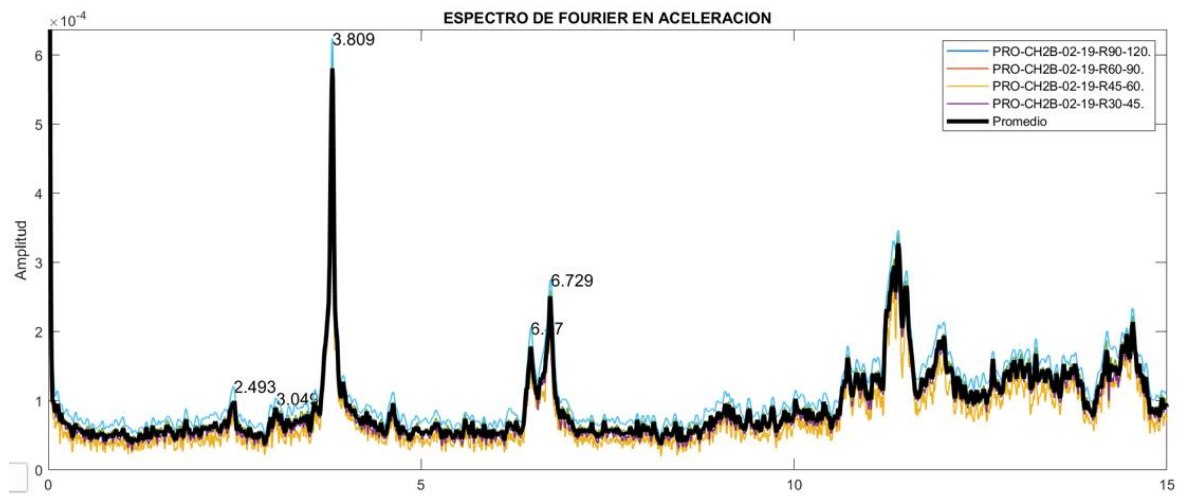
Fuente: Propia

Anexo 135. Registro de frecuencias en CH2 A, 14:13



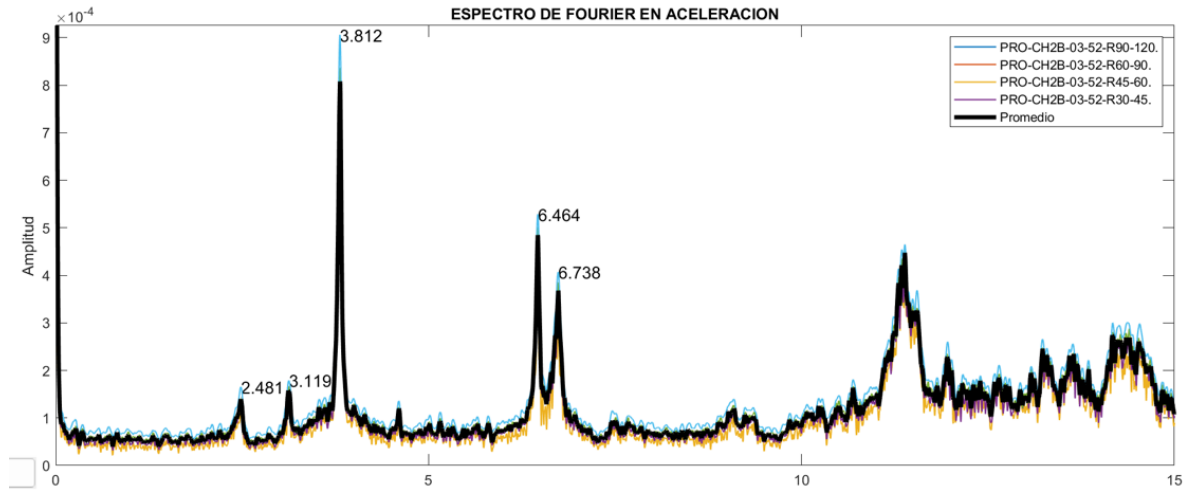
Fuente: Propia

Anexo 136. Registro de frecuencias en CH2 B, 02:19



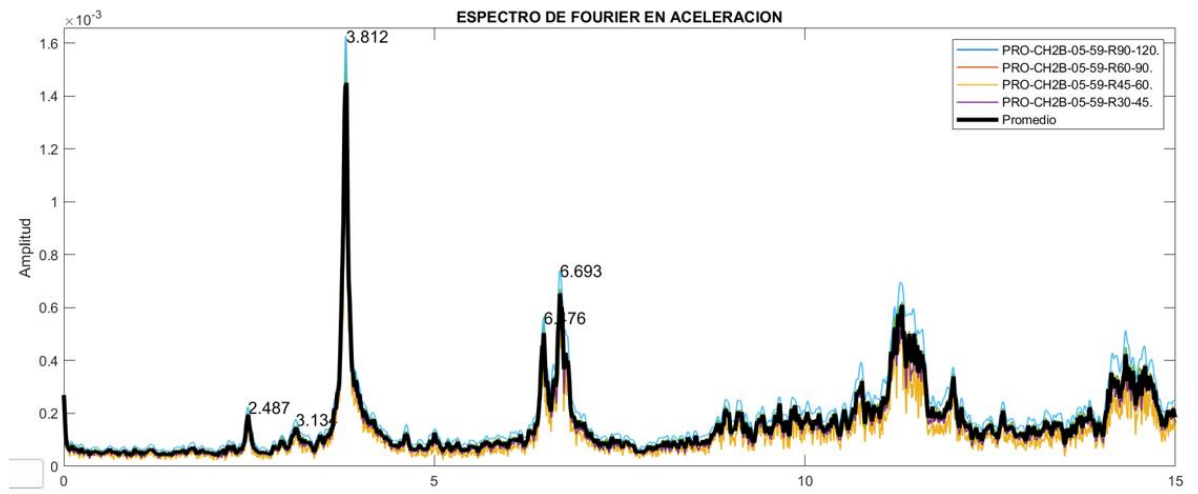
Fuente: Propia

Anexo 137. Registro de frecuencias en CH2 B, 03:52



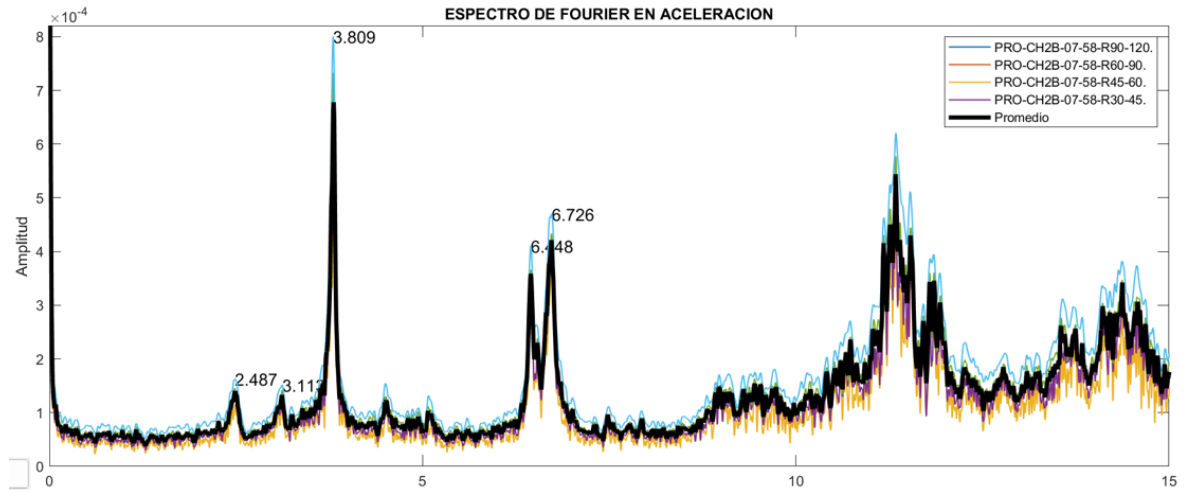
Fuente: Propia

Anexo 138. Registro de frecuencias en CH2 B, 05:59



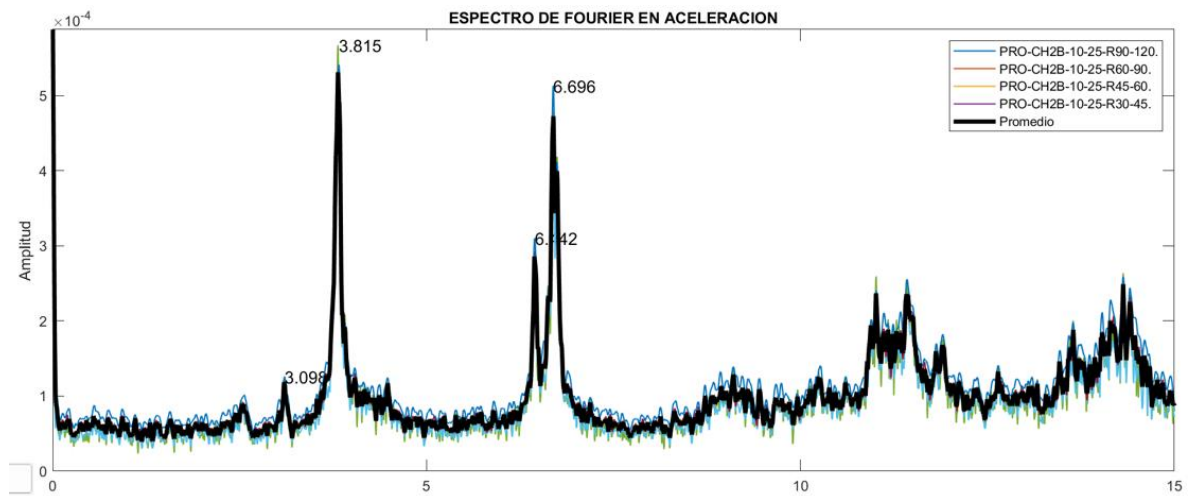
Fuente: Propia

## Anexo 139. Registro de frecuencias en CH2 B, 07:58



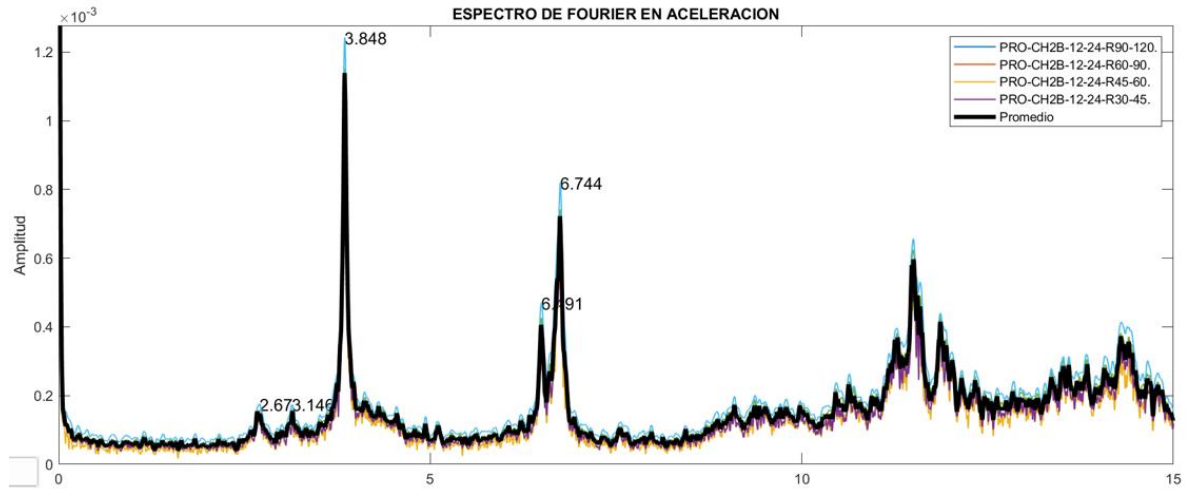
Fuente: Propia

## Anexo 140. Registro de frecuencias en CH2 B, 10:25



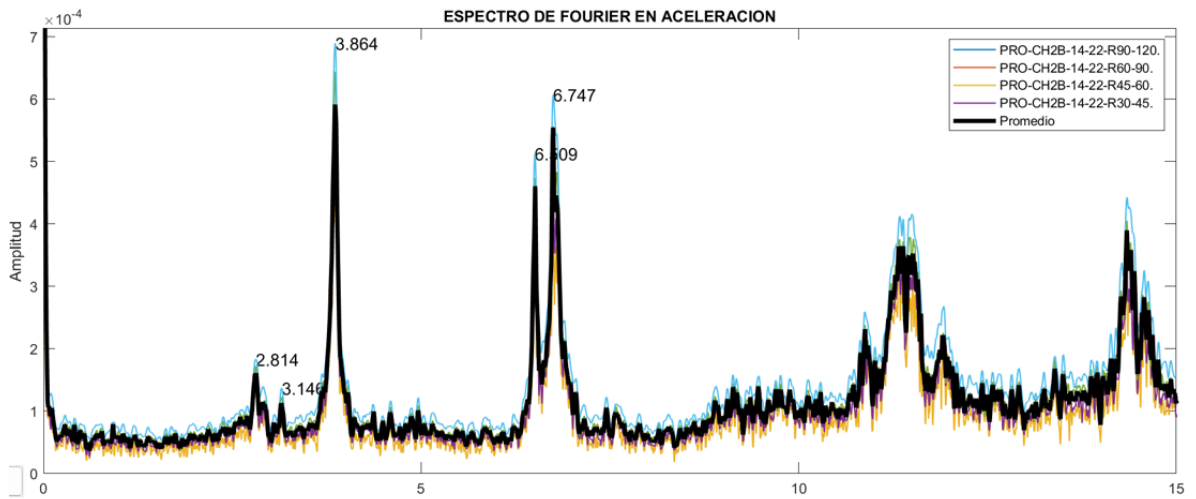
Fuente: Propia

Anexo 141. Registro de frecuencias en CH2 B, 12:24



Fuente: Propia

Anexo 142. Registro de frecuencias en CH2 B, 14:22



Fuente: Propia

Anexo 143. Recolección de datos



Fuente: Propia

Anexo 144. Recolección de datos



Fuente: Propia



## Anexo 145. Colocación del sensor



Fuente: Propia

## Anexo 146. Sensor GP2X



Fuente: Propia

Anexo 147. Puente río Abangares



Fuente: Propia