



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Monitoreo y Evaluación de la integridad estructural del puente Mezcala-Periodo 2022

Miguel Anaya Díaz
Francisco Javier Carrión Viramontes
Juan Antonio Quintana Rodríguez
Luis Álvaro Martínez Trujano
Jorge Alberto Hernández Figueroa
Adriana Guadalupe Porres López
Héctor Miguel Gasca Zamora
Germán Michel Guzmán Acevedo
José Manuel Machorro López

Publicación Técnica No. 715
Querétaro, México.
2022

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte por el M. en C. Miguel Anaya Díaz, Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, M. en C. Luis Álvaro Martínez Trujano, Ing. Jorge Alberto Hernández Figueroa, M. en C. Adriana Guadalupe Porres López, Lic. Héctor Miguel Gasca Zamora, M. en C. Germán Michel Guzmán Acevedo y el Dr. José Manuel Machorro López.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna EI-05/22: "Monitoreo y evaluación de la integridad estructural del puente Mezcala – Periodo 2022".

Tabla de Contenido

	Página
Sinopsis.....	v
Abstract.....	vii
Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	3
2. Análisis Modal Operacional del Puente Mezcala.....	5
2.1 Sensores utilizados para el análisis modal.....	6
2.2 Procesamiento de las señales.....	7
3. Resultados y Seguimiento del Comportamiento Estructural del Puente Mezcala.....	11
3.2 Seguimiento de las fuerzas de tensión de los tirantes.....	32
3.3 Seguimiento de los efectos permanentes.....	34
Conclusiones.....	69
Bibliografía.....	71

Sinopsis

El puente Mezcala es una estructura atirantada ubicada en el estado de Guerrero. Dada su importancia económica para la región, el costo de inversión, sus características estructurales, su longitud y su ubicación en una zona de alta sismicidad, fue uno de los primeros puentes en instrumentarse para monitoreo continuo por el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes del Instituto Mexicano del Transporte.

El monitoreo de este puente inició en 2016 y, a partir de entonces y con la información obtenida, se han identificado las frecuencias naturales, formas modales y razón de amortiguamiento de los primeros veinte modos naturales de vibrar. Esta información se utiliza para calibrar y actualizar el modelo de elementos finitos y, con esto, evaluar el desempeño estructural del puente bajo distintos escenarios de carga, y para definir los valores de alarma para los parámetros de monitoreo e identificar cambios significativos.

En este trabajo se describe el proceso para analizar las señales del sistema de monitoreo y evaluar los parámetros modales de los primeros ocho modos naturales de vibración del puente y las respuestas dinámicas estructurales ocasionadas por cargas vivas y permanentes registradas durante el año 2022.

(Palabras clave: Monitoreo estructural, Puente Mezcala, Procesamiento y análisis de señales)

Abstract

The Mezcala Bridge is a cable-stayed structure located in the state of Guerrero. Given its economic importance for the region, the investment cost, its structural characteristics, its length, and because it is located in an area of high seismicity, it was one of the first bridges to be instrumented for continuous monitoring by the Center for Monitoring Bridges and Intelligent Structural Health of the Mexican Institute of Transportation.

The monitoring of Bridge began in 2016 and, since then and with the information obtained, the natural frequencies, modal shapes and damping ratio for the first twenty natural modes of vibrating have been identified. This information is used to calibrate and update the finite element model and, with this, evaluate the structural performance of the bridge under different load scenarios. In addition, alarm values have been established for the monitoring parameters to identify significant changes.

In this work, it is described the technique to process and analyze the structural health monitoring signals to track the behavior of the modal parameters of the first eight natural modes of vibration of the bridge and the monitoring of the bridge structural responses under the effects of the live and dead loads obtained during 2022.

(Key Words: Structural Health Monitoring, Mezcala Bridge, Signal Processing)

Introducción

Las estructuras civiles, especialmente aquellas de dimensiones considerables, son imprescindibles para el desarrollo y progreso de nuestra sociedad. En este sentido, tanto gobierno como particulares realizan importantes inversiones en construcción, inspección y mantenimiento o rehabilitación de obras civiles de ingeniería. No obstante, debido a la susceptibilidad que tienen las estructuras en general a presentar degradaciones en sus elementos estructurales causadas por daños o por la ocurrencia de eventos accidentales como sismos o vientos fuertes y, teniendo en cuenta su importancia económica y social para la población, se vuelve necesario realizar acciones de evaluación estructural que permitan garantizar su integridad y seguridad.

En los últimos años ha emergido el campo multidisciplinario del Monitoreo de la Integridad Estructural, el cual, involucra la instrumentación con sensores y el procesamiento de la información para el diagnóstico y la evaluación estructural. La implementación del monitoreo tiene por objetivos (Li, *et al.*, 2016): 1) validar la modificación de los parámetros de una estructura derivados de acciones de rehabilitación, 2) detectar cargas externas y predecir posibles deterioros de los elementos estructurales para evaluar la seguridad de la estructura, 3) proveer evidencia para la planeación de las acciones de inspección, rehabilitación y mantenimiento de la estructura, 4) utilizar la información para futuros estudios de ingeniería.

En el año 2016, el Instituto Mexicano del Transporte instrumentó e inició con el monitoreo en tiempo real del puente Mezcala con el objetivo de dar seguimiento y evaluar la integridad de la estructura. Las actividades que se han llevado a cabo desde la implementación del sistema de monitoreo han sido las de diseñar estrategias de monitoreo, desarrollar algoritmos para el procesamiento de la información e identificar los parámetros modales del puente, lo que ha permitido generar y calibrar modelos de elemento finito que son utilizados para simular escenarios críticos que permiten establecer niveles de alarma (Anaya *et al.*, 2018).

1. Antecedentes

El puente Mezcala (figura 1.1) es un puente de tipo atirantado que se localiza en el kilómetro 221 de la Autopista del Sol, que comunica a la ciudad de Cuernavaca con Acapulco. El puente tiene una longitud total de 911 m y su estructura está conformada por 6 claros que van desde los 39 m hasta los 311 m. El puente tiene 140 tirantes distribuidos en 12 semi-arpas. Debido a la importancia del puente Mezcala en la actividad económica del País, al costo y tipo de estructura, la longitud total y a su ubicación en una zona de alta actividad sísmica, se seleccionó como uno de los puentes para instrumentar y monitorear en tiempo real en el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CeMPEI) del Instituto Mexicano del Transporte.

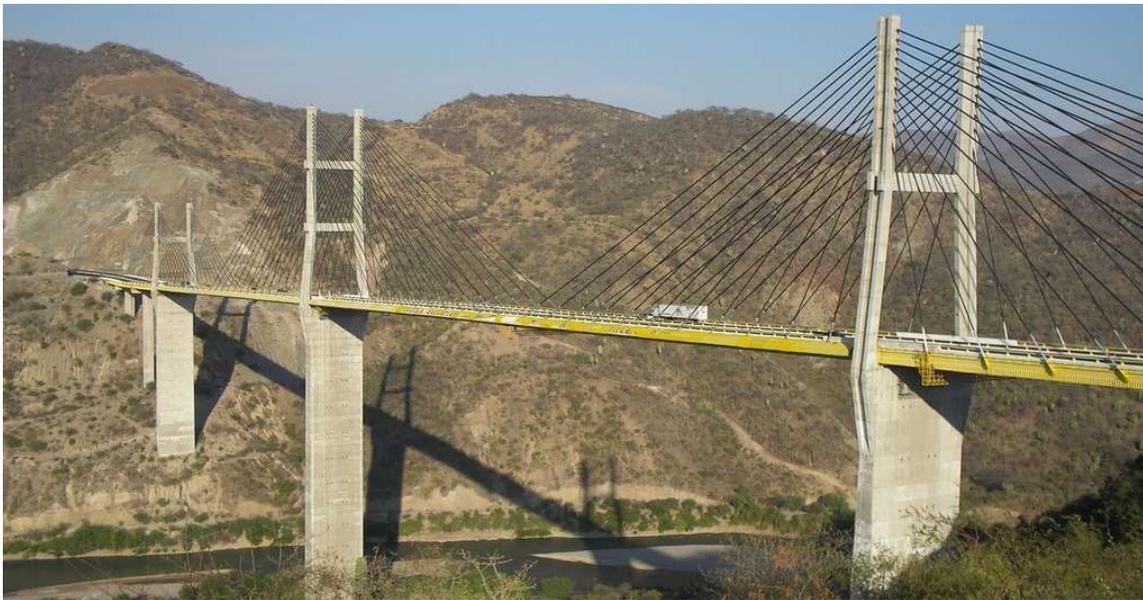


Figura 1.1 Puente Mezcala

Las actividades que se han llevado a cabo, desde la implementación del sistema de monitoreo, han sido las de dar seguimiento al comportamiento del puente ante cargas vivas vehiculares, ciclos térmicos, excitaciones por viento y sismo, así como la caracterización del comportamiento dinámico del puente a través de la identificación de sus modos naturales de vibración.

Lo anterior permite contar con la información para calibrar un modelo de elementos finitos del puente, con el cual se puede simular escenarios de carga críticos con los que se evalúa su seguridad estructural.

La instrumentación que conforma al módulo de sensores y equipos de adquisición y preprocesamiento de datos consta de 36 acelerómetros, 16 inclinómetros, 10 extensómetros de concreto, 48 extensómetros de acero y 11 sensores de temperatura. Cada uno de estos sensores fueron instalados en posiciones estratégicas de acuerdo con las variables o parámetros de interés, por ejemplo, para el caso de los acelerómetros, éstos se ubicaron en algunos de los tirantes para determinar las frecuencias naturales de vibración y obtener una medición indirecta de la fuerza de tensión de los tirantes (Carrión, 2007). En lo que respecta a los extensómetros, éstos se instalaron en la parte inferior de las traveses longitudinales del puente, tanto para el lado aguas arriba (Sensores A-EA) como para el lado aguas abajo (Sensores B-EA). La instrumentación anteriormente descrita se muestra en la figura 1.2.

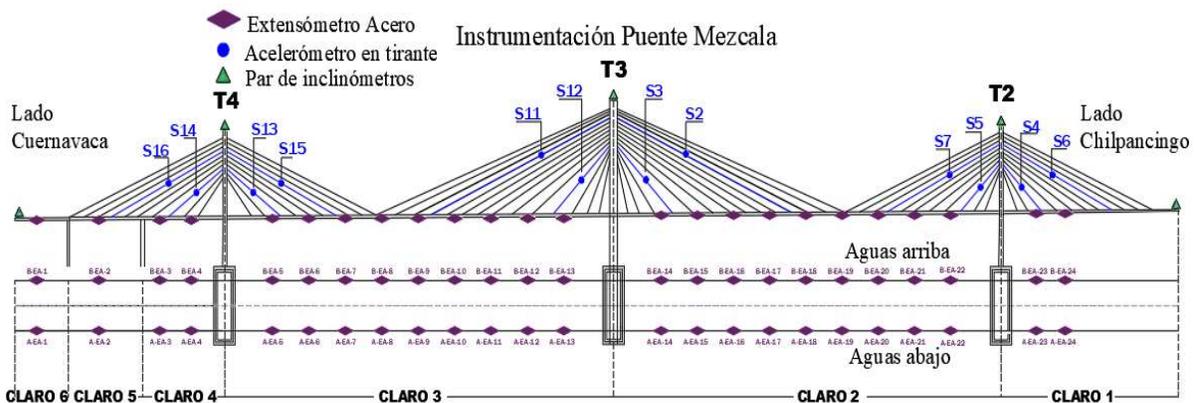


Figura 1.2 Sistema de Monitoreo Estructural del Puente Mezcala

Para adquirir la información de cada uno de los sensores es necesario un sistema de adquisición de datos, con una computadora y un interrogador para controlar la frecuencia de adquisición y el tamaño de los archivos, con lo cual se puede visualizar la información en tiempo real y adquirir el valor de cada sensor en intervalos iguales de tiempo. Una vez instalado, este equipo tiene capacidad para interrogar 16 canales utilizando un multiplexor.

Toda la información obtenida a través del sistema de monitoreo es enviada por medio de la red de internet satelital a los servidores del CeMPEI en donde es organizada y analizada.

2. Análisis Modal Operacional del Puente Mezcala

Para identificar y caracterizar el comportamiento estructural del puente es necesario primero establecer una referencia del estado actual de la estructura. En este sentido, se han desarrollado técnicas de procesamiento de las señales dinámicas, típicamente utilizando acelerómetros o extensómetros, que permiten estimar los parámetros modales (frecuencias naturales, formas modales y factores de amortiguamiento) de una estructura (James *et al.*, 1994), (Peeters y De Roeck, 1999). Para realizar el monitoreo la estructura debe excitarse a través de pruebas controladas (pruebas de impacto, imposición de desplazamiento, etc.) o mediante acciones naturales o de servicio (viento, sismo, tráfico vehicular, etc.), donde estas últimas han sido más utilizadas por su practicidad y bajo costo, ya que como su nombre lo indica, la estructura será excitada por acciones naturales de vibración y, por ende, no es necesario cerrar o restringir la operación normal de la estructura. Sin embargo, debido a la misma naturaleza aleatoria de las fuerzas de excitación y a las bajas amplitudes de éstas, es necesario refinar y profundizar en las técnicas de procesamiento de las señales obtenidas a partir de las pruebas de vibración ambiental.

La técnica implementada para estimar y dar seguimiento a los parámetros modales del puente Mezcala es la Descomposición Mejorada en el Dominio de la Frecuencia (EFDD) (Brincker, 2001). Un esquema del proceso de análisis de las señales se muestra en la figura 2.1.

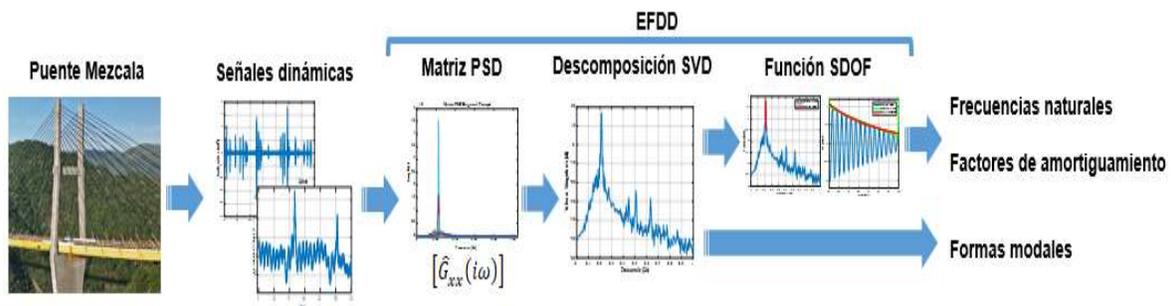


Figura 2.1 Esquema de la técnica EFDD

En la técnica EFDD, el primer paso es estimar la matriz de Densidad Espectral de Potencia (PSD), la cual se define como la relación que existe entre las fuerzas desconocidas $f(t)$ y las respuestas $x(t)$, y puede expresarse como:

$$[\hat{G}_{xx}(i\omega)] = [\bar{H}(i\omega)][\hat{G}_{ff}(i\omega)][H(i\omega)]^T \quad (1)$$

Donde la matriz $\hat{G}_{xx}(i\omega)$ es de tamaño $m \times m$, siendo m el número de sensores, la matriz $\hat{G}_{ff}(i\omega)$ es de tamaño $r \times r$, siendo r el número de entradas y $H(i\omega)$ es la matriz FRF.

En el caso en el que las funciones de excitación sean ruido blanco y que el amortiguamiento del sistema sea ligero, la matriz PSD puede descomponerse en un conjunto de funciones auto densidad espectral, cada una correspondiente a un sistema de un solo grado de libertad (SDOF) mediante:

$$[\hat{G}_{xx}(i\omega)] = [U_i] [S_i] [U_i]^H \quad (2)$$

Donde la matriz $[U_i] = [u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}]$ es una matriz unitaria de vectores singulares, y $[S_i]$ es una matriz diagonal de valores singulares. En el caso de que solo un modo sea dominante en determinada frecuencia i , el vector singular será una estimación cercana a la forma modal:

$$\hat{\phi} = u_{i1} \quad (3)$$

El siguiente paso consiste en estimar la función de auto densidad espectral correspondiente a un sistema SDOF, para obtener esta función, se comparan los valores de los vectores singulares cercanos al pico con respecto a la forma modal $\hat{\phi}$. Mientras se encuentren vectores singulares con un valor MAC elevado, entonces los correspondientes valores singulares forman parte de la función SDOF. Una vez obtenidos los valores singulares que forman parte de la SDOF, estos son convertidos al dominio del tiempo a través de la transformada inversa de Fourier (IFFT), donde la frecuencia natural y el amortiguamiento son estimados mediante una regresión lineal de mínimos cuadrados.

2.1 Sensores utilizados para el análisis modal

El monitoreo de los parámetros modales del puente Mezcala fue realizado utilizando la información de los extensómetros colocados en las vigas principales entre la torre 2 y torre 4, como se muestra en la figura 2.2, por lo que solamente pudieron identificarse modos verticales de flexión y torsión del tablero. Desafortunadamente, se han presentado problemas con el sistema de energización del monitoreo del puente y solo se ha

podido registrar la información de los meses de enero, febrero, marzo y abril del 2022. A partir del mantenimiento realizado al sistema de monitoreo en éste mismo año, fue posible recuperar algunos de los sensores de deformación que no se habían podido analizar. Por lo anterior, para la presente investigación, se analizó la información de los 40 extensómetros instalados en los dos claros más grandes del puente.

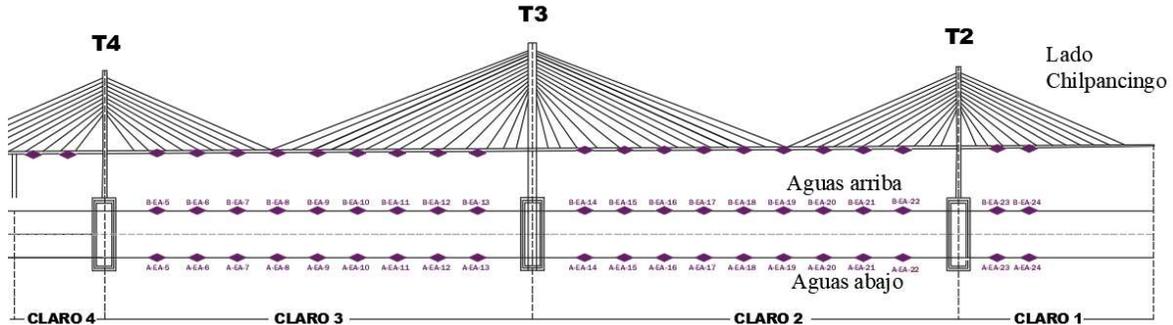


Figura 2.2 Instrumentación utilizada para el análisis modal

2.2 Procesamiento de las señales

Las señales analizadas corresponden a bloques de datos de 2 minutos de duración, adquiriendo a una frecuencia de 62.50 Hz. Con el objetivo de disminuir los efectos (frecuencias bajas) producidos por el paso de los vehículos, se aplicó un filtro tipo *Butterworth* para alta frecuencia de orden 2, con una frecuencia de corte de 0.10 Hz. En la figura 2.3. se muestra una señal típica de un extensómetro tras el filtrado.

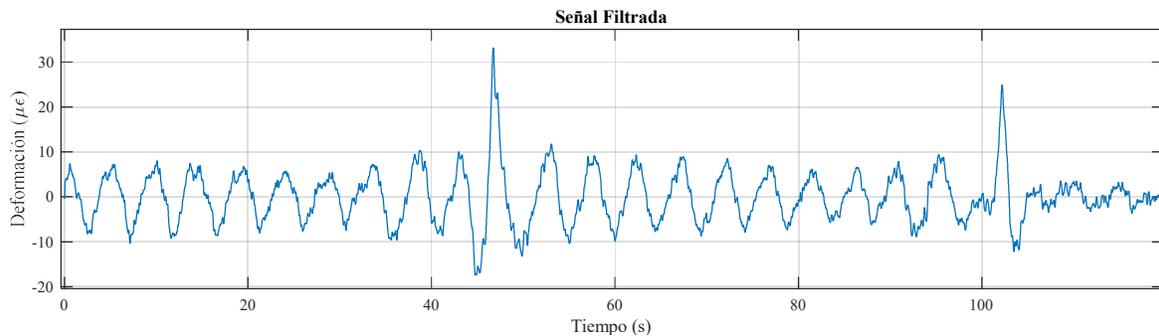


Figura 2.3 Señal típica de deformación

Tras el filtrado de las señales, se procedió a calcular la matriz PSD $[\hat{G}_{xx}(i\omega)]$, a través de correlación de cada señal en el dominio de la frecuencia. Para calcular la FFT de cada señal fueron utilizados 32,768 puntos, los cuales equivalen a la potencia de 2 más cercana al doble de datos del sensor (15,000 datos) con el objetivo de evitar efectos de convolución circular. En total, la matriz PSD de cada bloque de datos tiene un tamaño de 34 x 34

en cada punto de frecuencia. La diagonal principal de la matriz PSD consta de las auto-correlaciones de todos los sensores, mientras que los elementos fuera de la diagonal representan todas las correlaciones cruzadas de los sensores. Al descomponer la matriz PSD en cada punto de frecuencia mediante la técnica SVD, fueron obtenidos los valores y vectores singulares. El espectro obtenido de valores singulares se muestra en la figura 2.4.

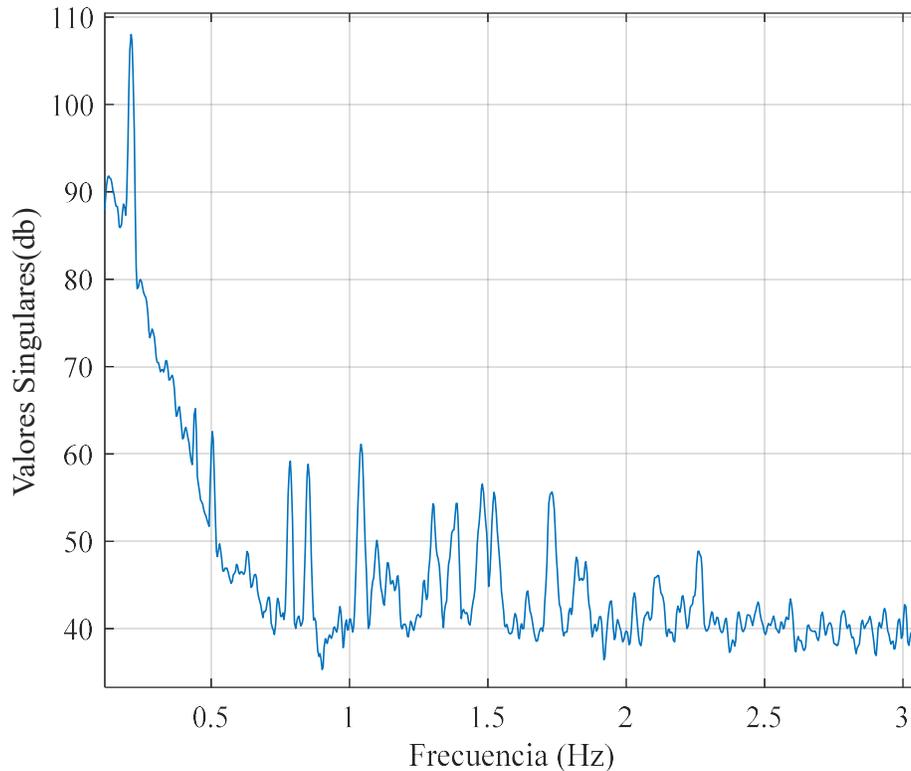


Figura 2.4 Espectro de valores singulares

Una vez generado el espectro de la figura 2.4, se pueden apreciar los picos que corresponden a los modos naturales de vibración del puente, donde la mayor densidad de éstos, se concentra en un rango de frecuencias de 0 a 3.5 Hz. En total fueron identificados 20 picos en un rango de 0 a 3 Hz.

Para estimar el valor de la frecuencia natural y el amortiguamiento de cada modo, una vez identificados los picos del espectro, se procedió a calcular las funciones SDOF del sistema y a transformar al dominio del tiempo la parte de los picos del espectro asociados a la función SDOF, mediante la transformada inversa de Fourier (IFFT).

Para identificar la parte del pico asociada a la función SDOF fue utilizado el criterio MAC, donde se comparó el vector singular correspondiente al pico, con los vectores correspondientes a las frecuencias aledañas.

Si el valor MAC de un vector aledaño superó el 70% de correlación, este se consideró parte de la función SDOF. Al identificar estos valores, se procedió a poner en ceros todos los demás valores que no fueran parte de la función SDOF y aplicar la IFFT. En la figura 2.5 se muestra, con línea de color rojo, la parte del espectro utilizada para calcular la función SDOF correspondiente al primer pico.

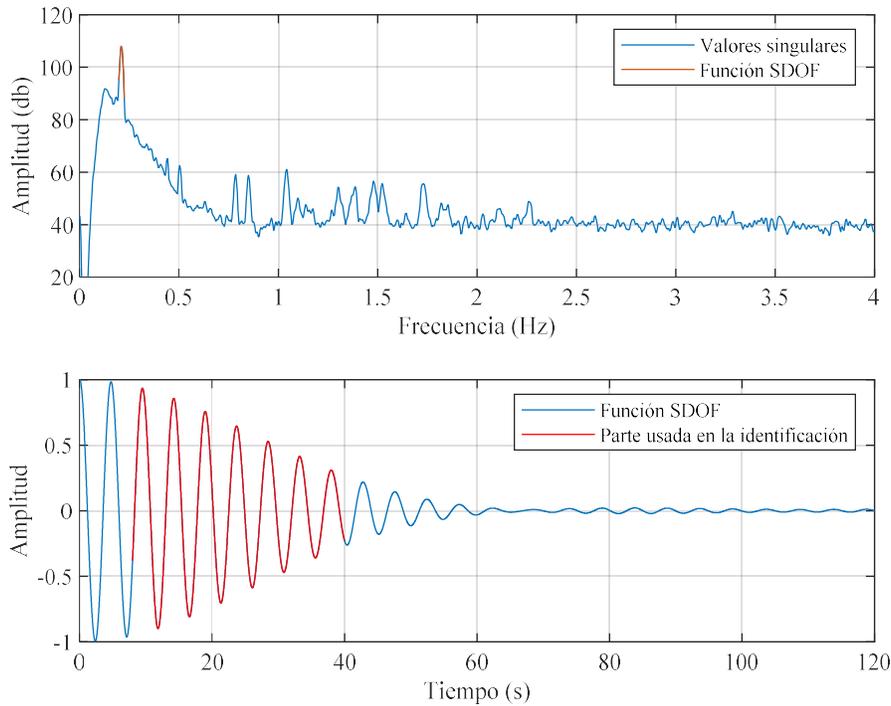


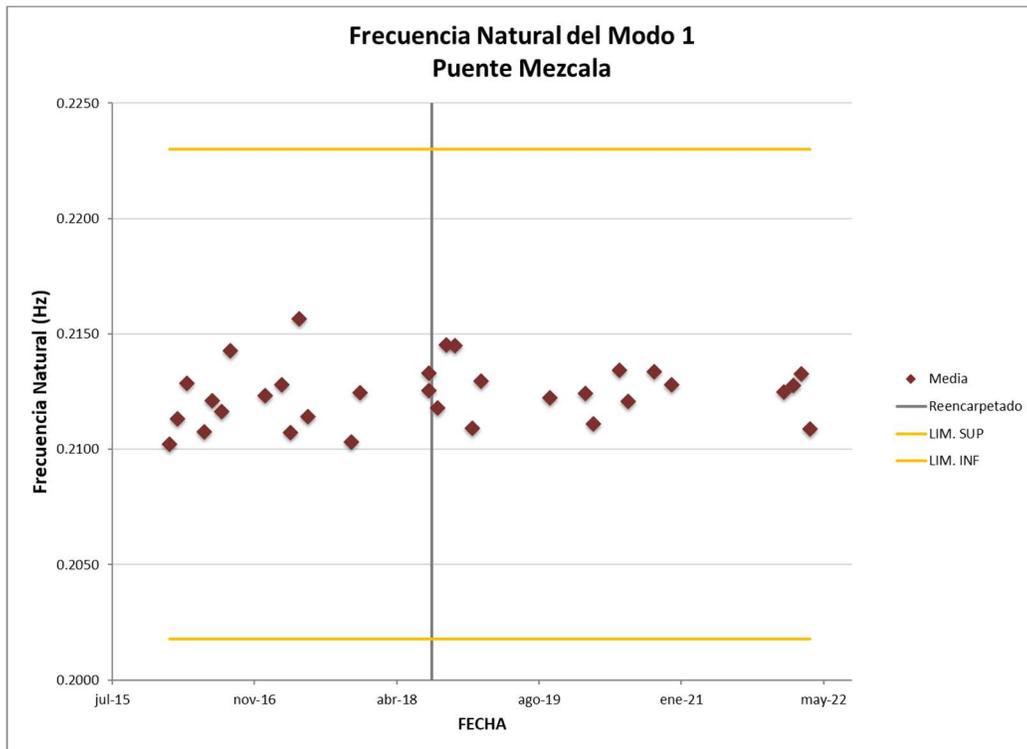
Figura 2.5 Obtención de la función SDOF

Tras utilizar la IFFT se obtuvo la función SDOF del sistema, la cual exhibe una sola componente de frecuencia y un decaimiento asociado al factor de amortiguamiento. Para el valor de los parámetros modales, se utilizó la transformada Hilbert en una zona donde se puede apreciar un decaimiento logarítmico, es decir, se dejó fuera de la identificación la parte inicial y final de la función SDOF, con el fin de evitar los efectos de ruido de la señal. Con la función obtenida fueron estimados los valores de la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento mediante una regresión de mínimos cuadrados. Este procedimiento fue aplicado a cada uno de los primeros 8 picos del espectro de valores singulares a través de un proceso automatizado programado en MATLAB.

3. Resultados y Seguimiento del Comportamiento Estructural del Puente Mezcala

Del análisis modal utilizando las señales provenientes del sistema de monitoreo bajo condiciones de vibración ambiental, se monitorearon los valores de las primeras ocho frecuencias naturales del puente Mezcala, las cuales se encuentran en un rango de 0.20 a 1.00 Hz, esto debido a que desde el 2016, se ha dado seguimiento a estos modos en particular.

En las figuras 3.1 a 3.8, se muestran los seguimientos realizados a dichos valores. Como se puede apreciar en las gráficas, las variaciones de las frecuencias no excedieron los límites máximos, los cuales se establecieron como un 5% de variación con respecto al valor promedio.



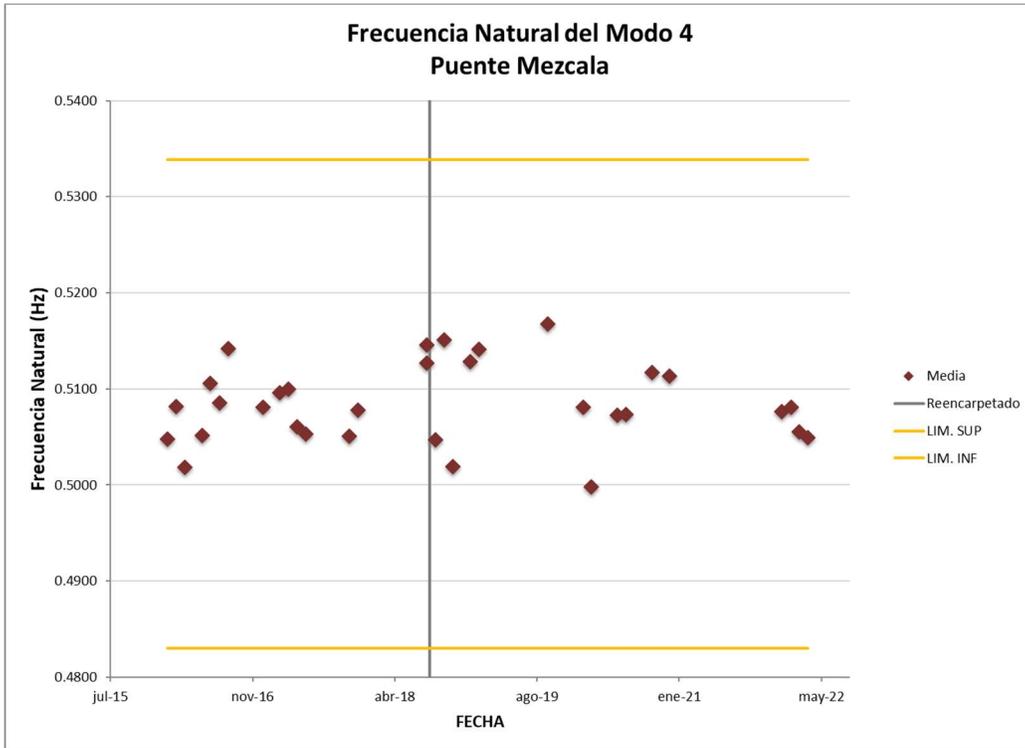


Figura 3.4 Seguimiento de la frecuencia natural del modo 4

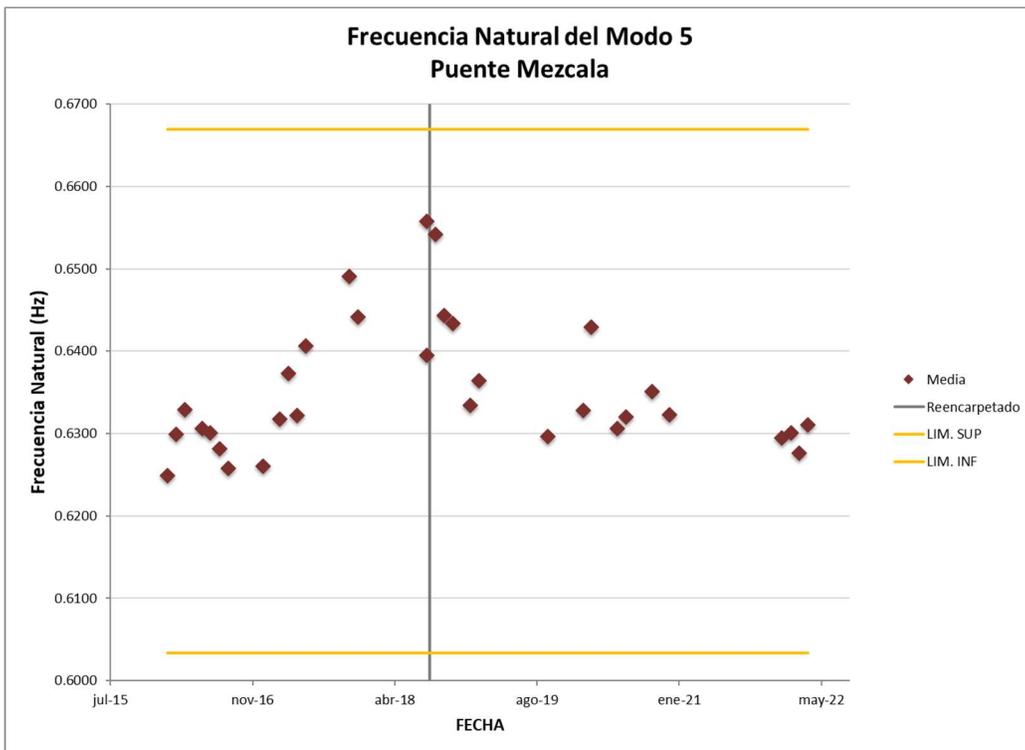


Figura 3.5 Seguimiento de la frecuencia natural del modo 5

Tabla 3.1 Valores promedio de los parámetros modales del puente Mezcala

No. Modo	Frecuencia Natural (Hz)	Factor de Amortiguamiento (%)
1	0.2122	1.7916
2	0.4227	0.5686
3	0.4432	0.4545
4	0.5087	0.5644
5	0.6323	0.5079
6	0.7414	0.5180
7	0.7911	0.6616
8	0.8560	0.6118
9	1.0497	0.7617
10	1.1041	0.7562
11	1.1504	0.9216
12	1.3028	0.5529
13	1.3946	0.4108
14	1.4875	1.2855
15	1.7402	0.5294
16	1.8437	1.1633
17	2.1156	0.8364
18	2.2650	0.7971
19	2.5372	0.5983
20	2.7911	0.3932

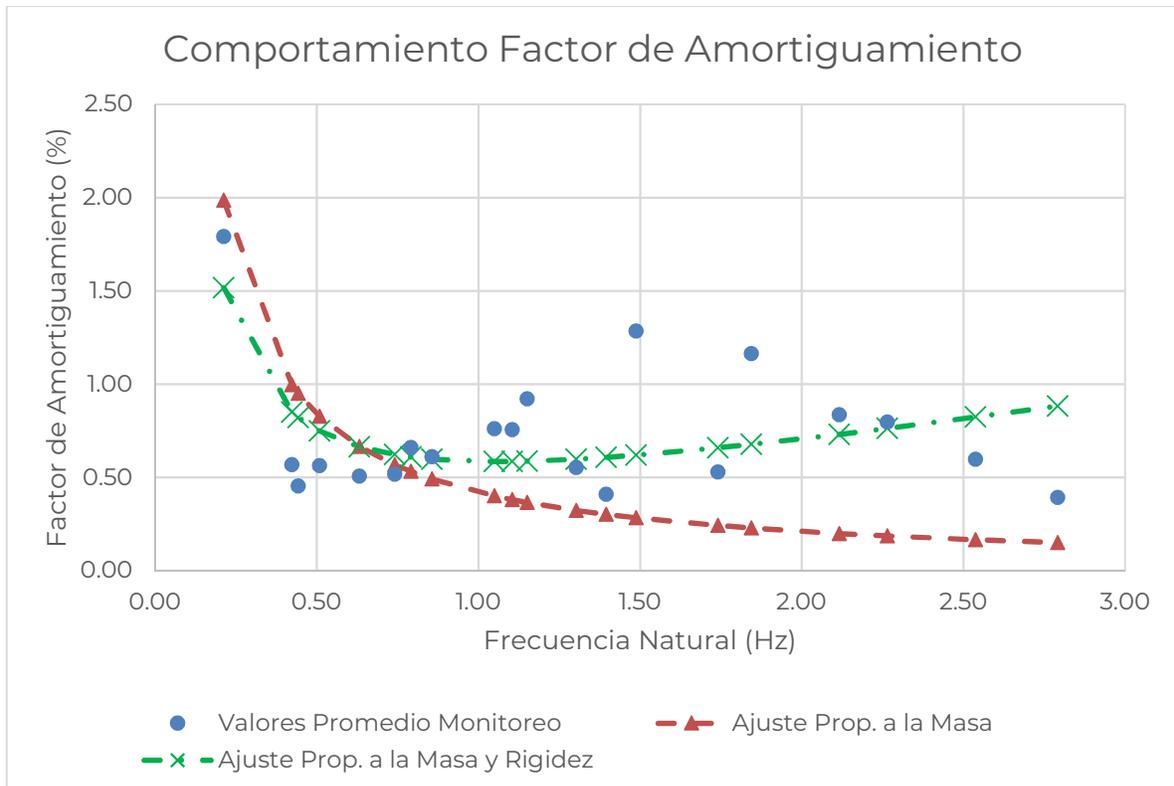


Figura 3.9 Comportamiento de los valores del factor de amortiguamiento

Las formas modales de los modos de vibrar monitoreados del puente Mezcala se muestran en las figuras 3.10 a 3.30, en ellas, las líneas negras punteadas representan la posición de las torres del puente. Debido a que la información analizada es proveniente de sensores de deformación, las formas modales obtenidas representan las deformaciones en las vigas del puente producto de la flexión. Del monitoreo realizado, se ha encontrado que las formas modales presentan porcentajes de variación considerablemente bajos, sin embargo, como se mencionó anteriormente, a partir del mantenimiento realizado al sistema de monitoreo en el año de 2022, fue posible recuperar algunos de los sensores de deformación de los que no se había podido obtener información. Por lo anterior, para la presente investigación, se analizó la información de los 40 extensómetros instalados en los dos claros más grandes del puente. De las formas modales monitoreadas, se destaca la siguiente información de cada modo:

- **Modo 1:** En este modo, los claros principales del puente se mueven verticalmente formando una curvatura simple, pero desfasados entre sí, es decir, mientras un claro se mueve hacia arriba, el otro se mueve simultáneamente hacia abajo. Se puede observar en la figura 3.10, que la mayor amplitud se presenta al centro del claro 3 del lado

aguas arriba y es considerablemente mayor con respecto al del lado aguas abajo y a la amplitud que se presenta en el claro 2.

- **Modo 2:** Este modo tiene la misma forma del modo 1, sin embargo, existe un desfase entre los sensores aguas abajo con respecto a los de aguas arriba, por lo que se puede decir que es un modo de carácter torsional como se muestra en la figura 3.11.
- **Modo 3:** En este modo, ambos claros principales del puente se mueven verticalmente, en fase, formando una curvatura simple, como se muestra en la figura 3.12.
- **Modo 4:** En este modo, ambos claros principales del puente se mueven verticalmente, en fase, formando una doble curvatura. Se puede observar en la figura 3.13, que la mayor amplitud se presenta al centro del claro 3 del lado aguas arriba y es considerablemente mayor con respecto al del lado aguas abajo y a las que se presentan en el claro 2.
- **Modo 5:** En este modo, ambos claros principales del puente se mueven verticalmente, fuera de fase, formando una doble curvatura. Se puede observar en la figura 3.14, que la mayor amplitud se presenta al centro del claro 3 del lado aguas arriba y es considerablemente mayor con respecto al del lado aguas abajo y a las que se presentan en el claro 2.
- **Modo 6:** Este modo tiene la misma forma del modo 3, sin embargo, existe un desfase entre los sensores aguas abajo con respecto a los de aguas arriba, por lo que se puede decir que es un modo de carácter torsional como se muestra en la figura 3.15.
- **Modo 7:** En este modo, ambos claros principales del puente se mueven verticalmente, fuera de fase, formando una triple curvatura. Se puede observar en la figura 3.16, que la mayor amplitud se presenta al centro del claro 3 en el lado aguas arriba y es considerablemente mayor con respecto al del lado aguas abajo y a las que se presentan en el claro 2.
- **Modo 8:** En este modo, ambos claros principales del puente se mueven verticalmente, en fase, formando una triple curvatura como se muestra en la figura 3.17.
- **Modo 9:** En este modo, ambos claros principales del puente se mueven verticalmente, en fase, formando una cuádruple curvatura. Se puede observar en la figura 3.18, que la mayor amplitud se presenta al centro del claro 3 en el lado aguas arriba y es considerablemente mayor con respecto al del lado aguas abajo y a las que se presentan en el claro 2.
- **Modo 10:** En este modo, ambos claros principales del puente se mueven verticalmente, fuera de fase, formando una cuádruple curvatura. Se puede observar en la figura 3.19, que la mayor amplitud se presenta al centro del claro 3 del lado aguas arriba y es

considerablemente mayor con respecto al del lado aguas abajo y a las que se presentan en el claro 2.

- **Modo 11:** En este modo, ambos claros principales del puente se mueven verticalmente, fuera de fase, formando una cuádruple curvatura. Se puede observar en la figura 3.20, que las amplitudes del claro 3 son considerablemente mayores a las del claro 2.
- **Modo 12:** En este modo, ambos claros principales del puente se mueven verticalmente, fuera de fase, formando una quíntuple curvatura. Se puede observar en la figura 3.21, que la mayor amplitud se presenta al centro del claro 3 del lado aguas arriba y es considerablemente mayor con respecto al del lado aguas abajo, pero similar a las del claro 2.
- **Modo 13:** En este modo, ambos claros principales del puente se mueven verticalmente, en fase, formando una quíntuple curvatura. Se puede observar en la figura 3.22, que la mayor amplitud se presenta al centro del claro 3 del lado aguas abajo y es considerablemente mayor con respecto al del lado aguas abajo, pero similar a las del claro 2.
- **Modo 14:** En este modo, ambos claros principales del puente se mueven verticalmente, en fase, formando una quíntuple curvatura. Se puede observar en la figura 3.23, que las amplitudes del claro 3 son considerablemente mayores a las del claro 2.
- **Modo 15:** En este modo, ambos claros principales del puente se mueven verticalmente, en fase, formando una séxtuple curvatura. Se puede observar en la figura 3.24, que las amplitudes del claro 2 son considerablemente mayores a las del claro 3.
- **Modo 16:** En este modo, el claro 2 se mueve verticalmente formando una séxtuple curvatura, mientras que el claro 3 se mueve verticalmente formando una quíntuple curvatura; como se puede apreciar en la figura 3.25, las amplitudes del claro 3 son considerablemente mayores a las del claro 2.
- **Modo 17:** En este modo, el claro 2 se mueve verticalmente formando una séptuple curvatura, mientras que el claro 3 se mueve verticalmente formando una séxtuple curvatura; como se puede apreciar en la figura 3.26, las amplitudes del claro 2 son considerablemente mayores a las del claro 3.
- **Modo 18:** En este modo, el claro 2 se mueve verticalmente formando una séptuple curvatura, mientras que el claro 3 se mueve verticalmente formando una séxtuple curvatura; como se puede apreciar en la figura 3.27, las amplitudes del claro 3 son considerablemente mayores a las del claro 2.
- **Modo 19:** En este modo, ambos claros principales del puente se mueven verticalmente, en fase, formando una óctuple curvatura. Se

puede observar en la figura 3.28, que las amplitudes del claro 2 son similares a las del claro 3.

- **Modo 20:** En este modo, el claro 3 se mueve verticalmente formando una óctuple curvatura, mientras que el claro 2, como se muestra en la figura 3.29, presenta bajas amplitudes de deformación.

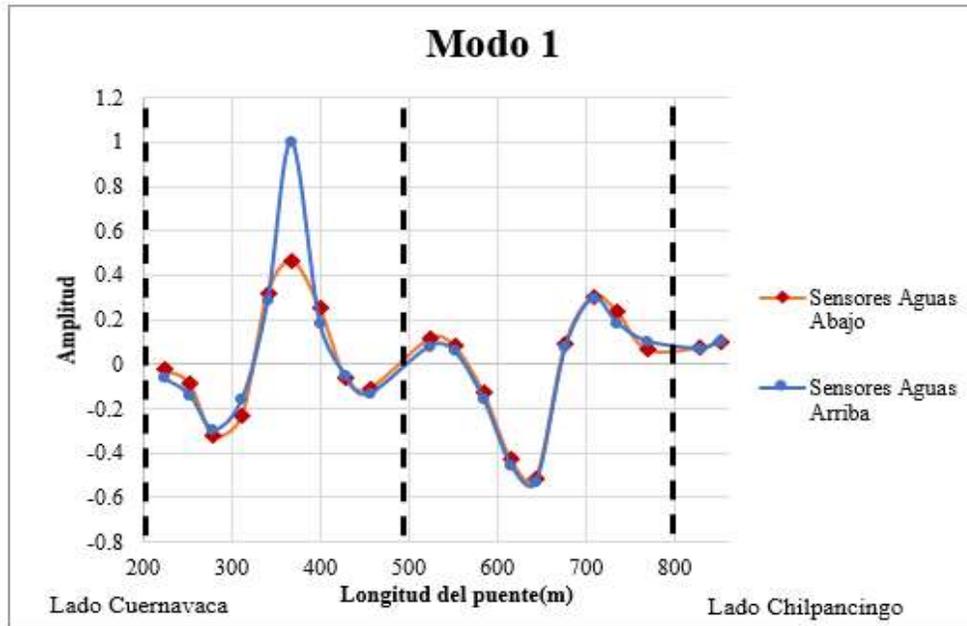


Figura 3.10 Forma modal del modo 1

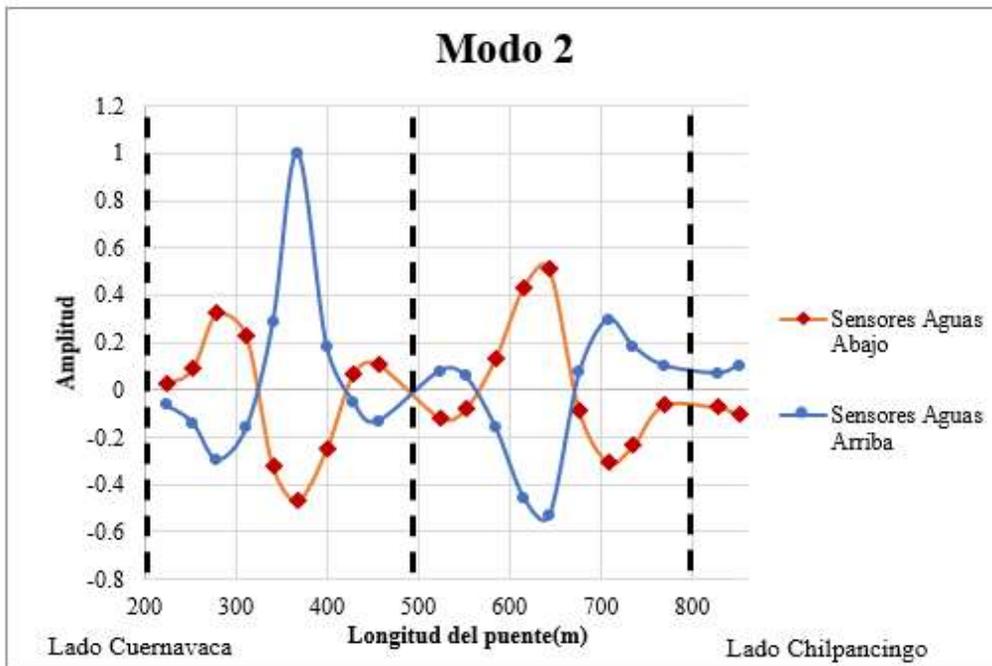


Figura 3.11 Forma modal del modo 2

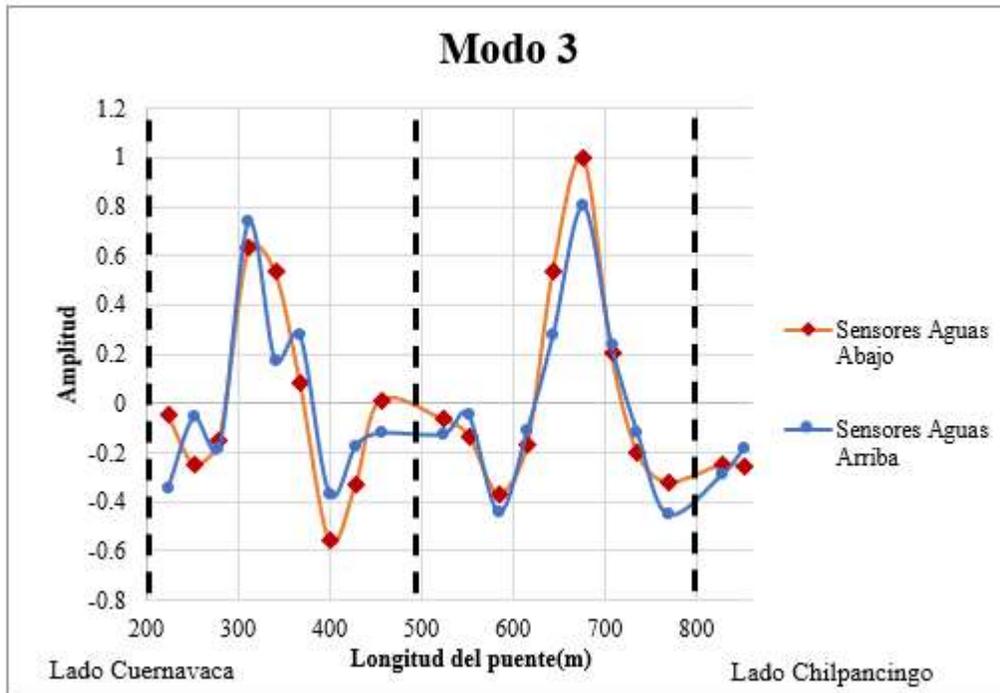


Figura 3.12 Forma modal del modo 3

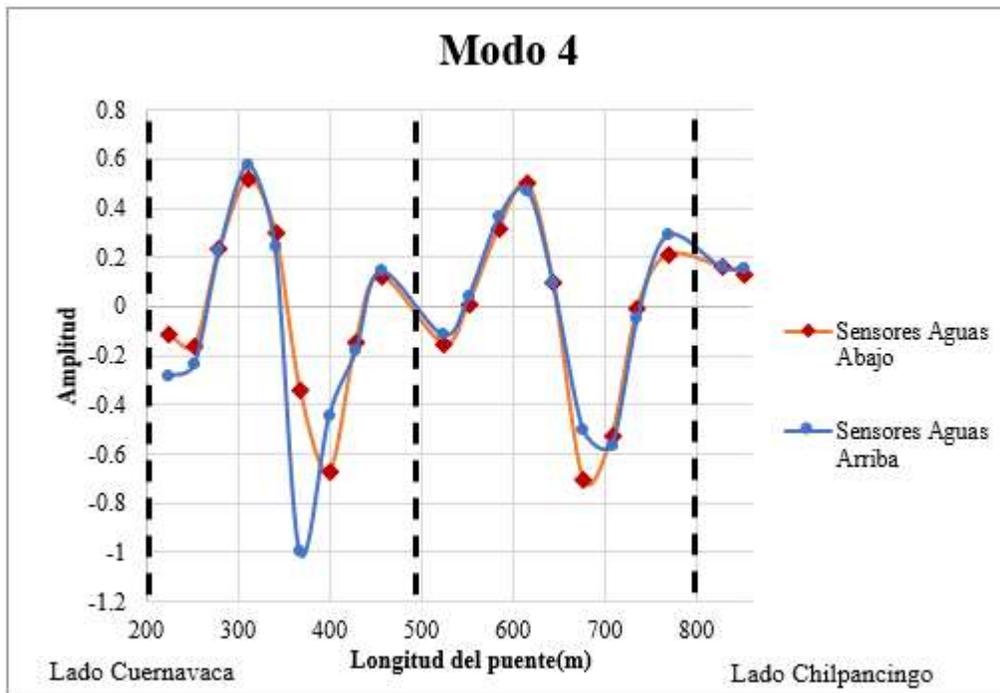


Figura 3.13 Forma modal del modo 4

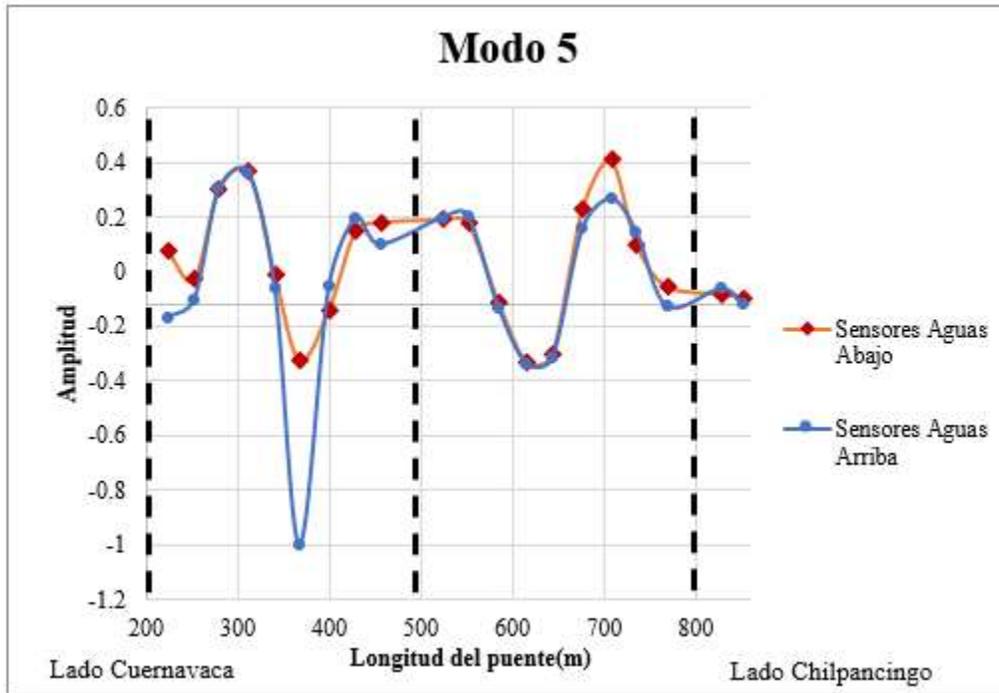


Figura 3.14 Forma modal del modo 5

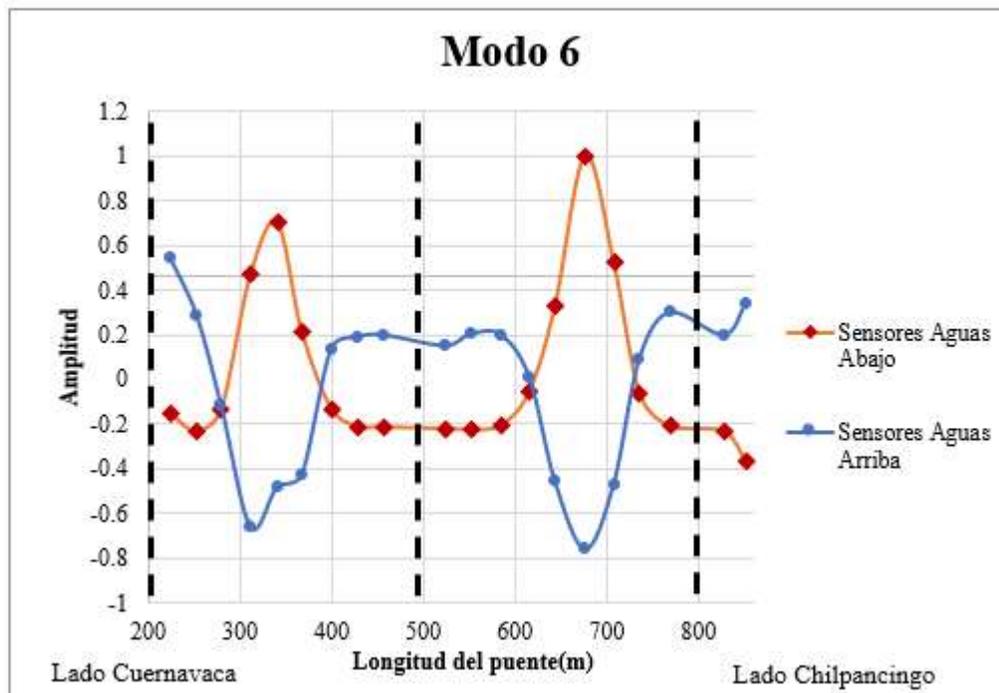


Figura 3.15 Forma modal del modo 6

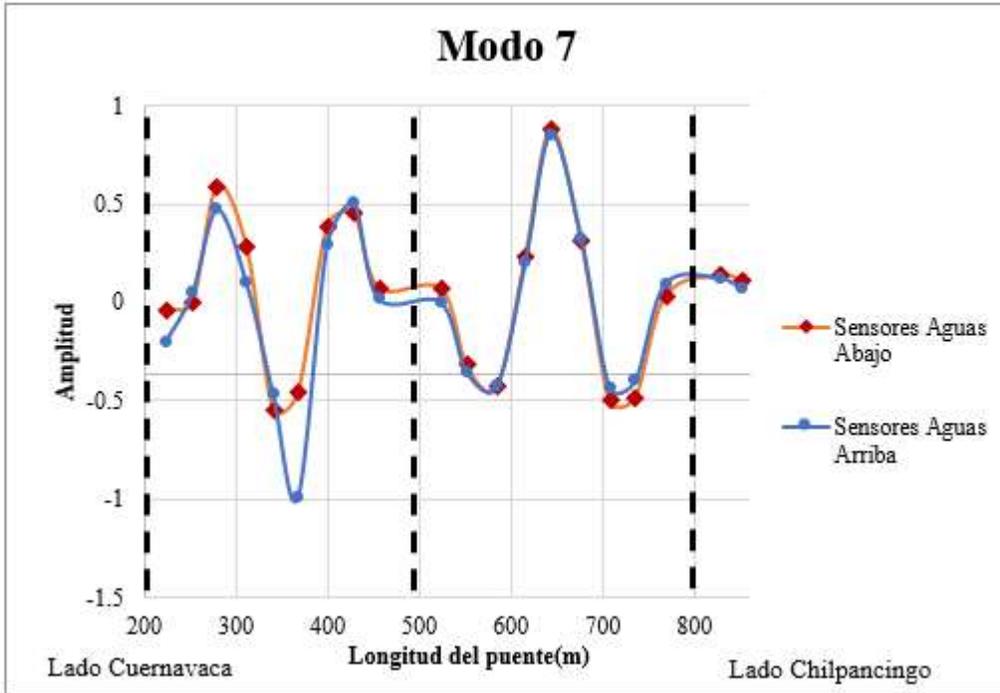


Figura 3.16 Forma modal del modo 7

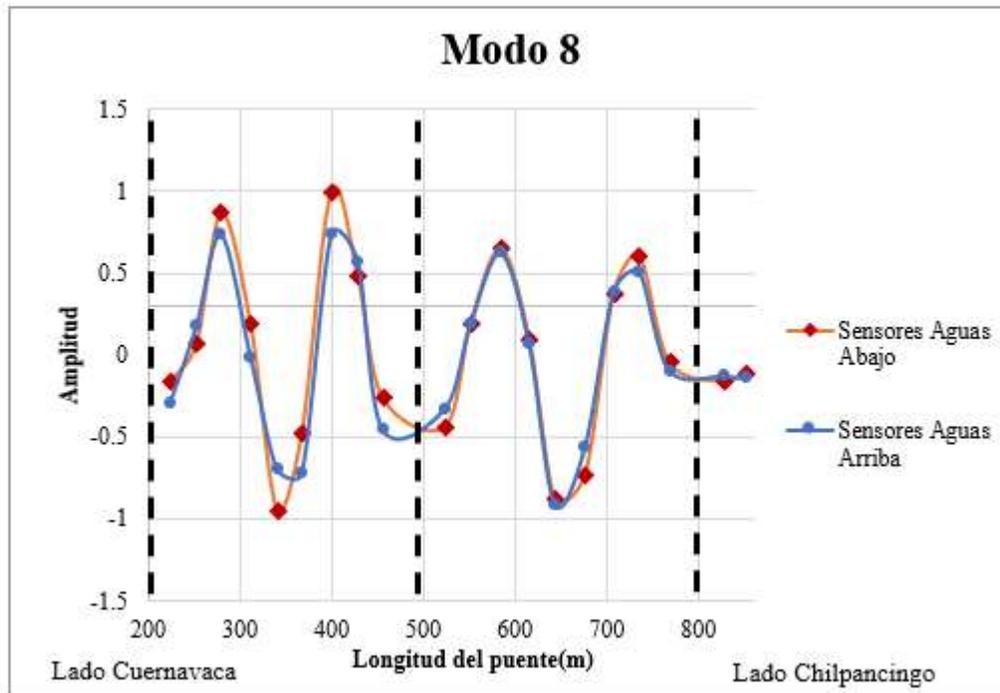


Figura 3.17 Forma modal del modo 8

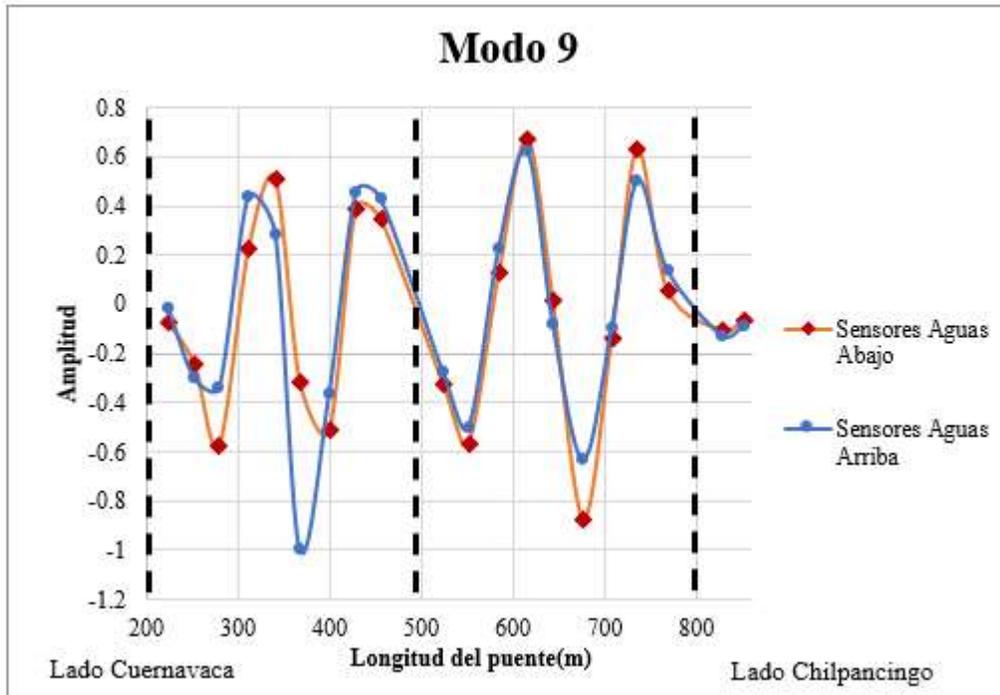


Figura 3.18 Forma modal del modo 9

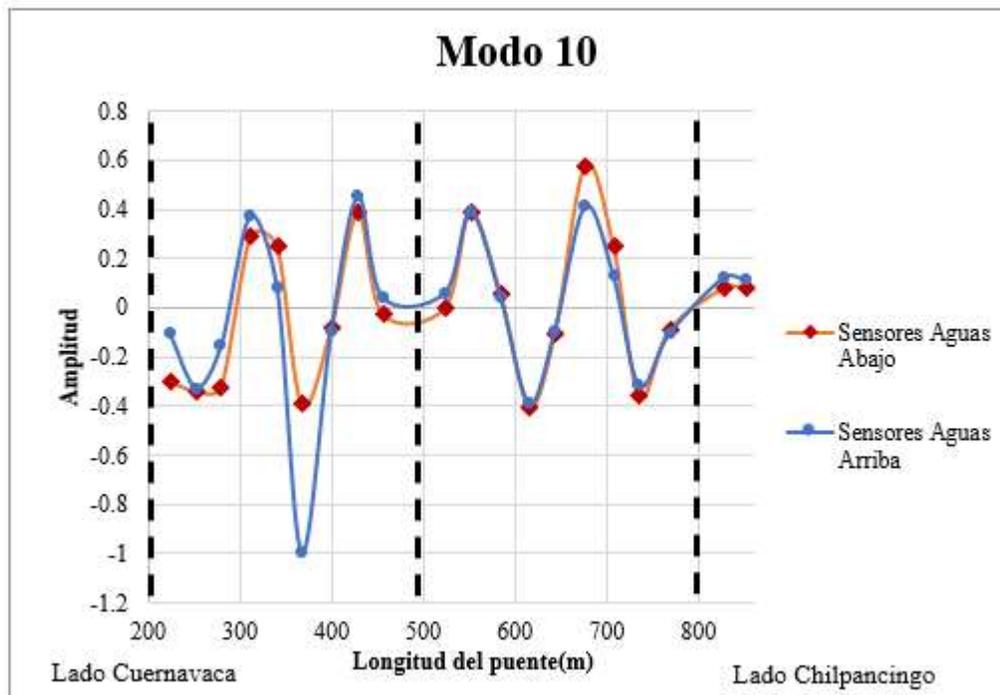


Figura 3.19 Forma modal del modo 10

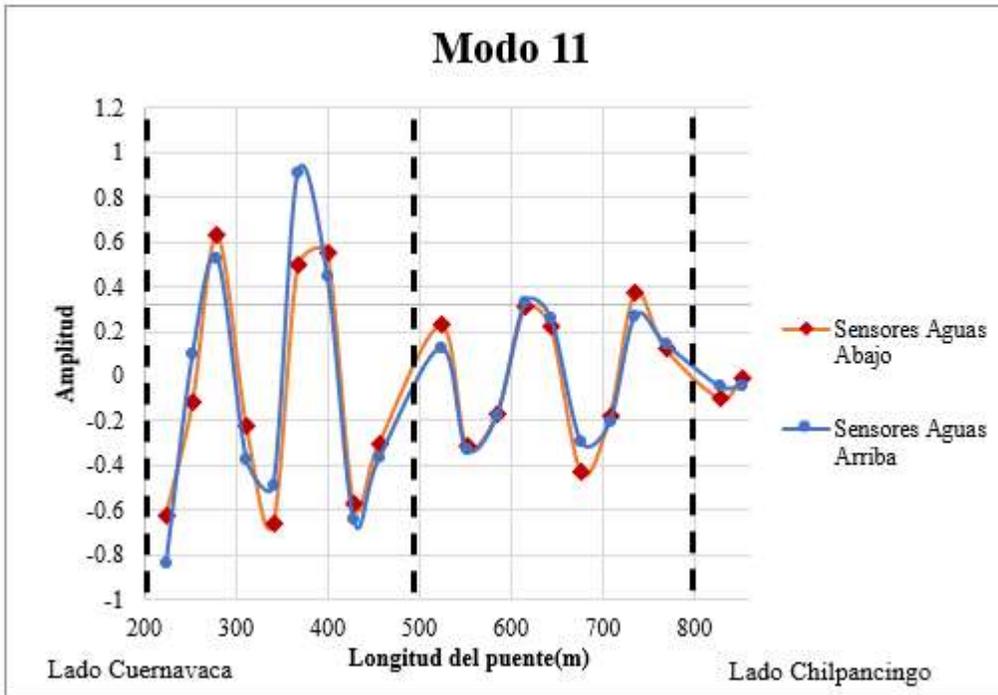


Figura 3.20 Forma modal del modo 11

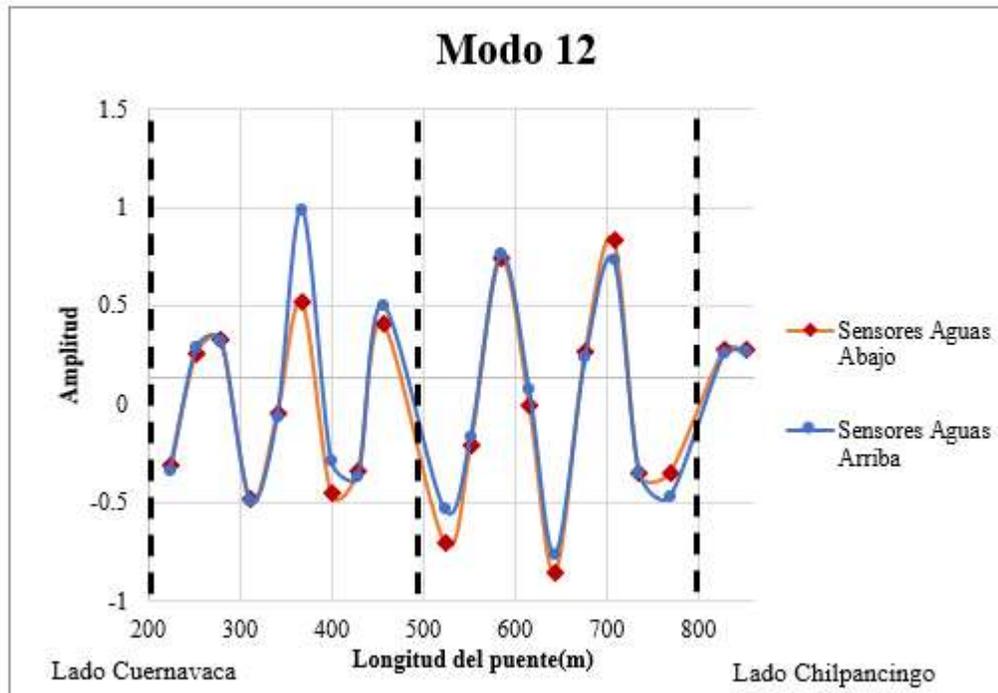


Figura 3.21 Forma modal del modo 12

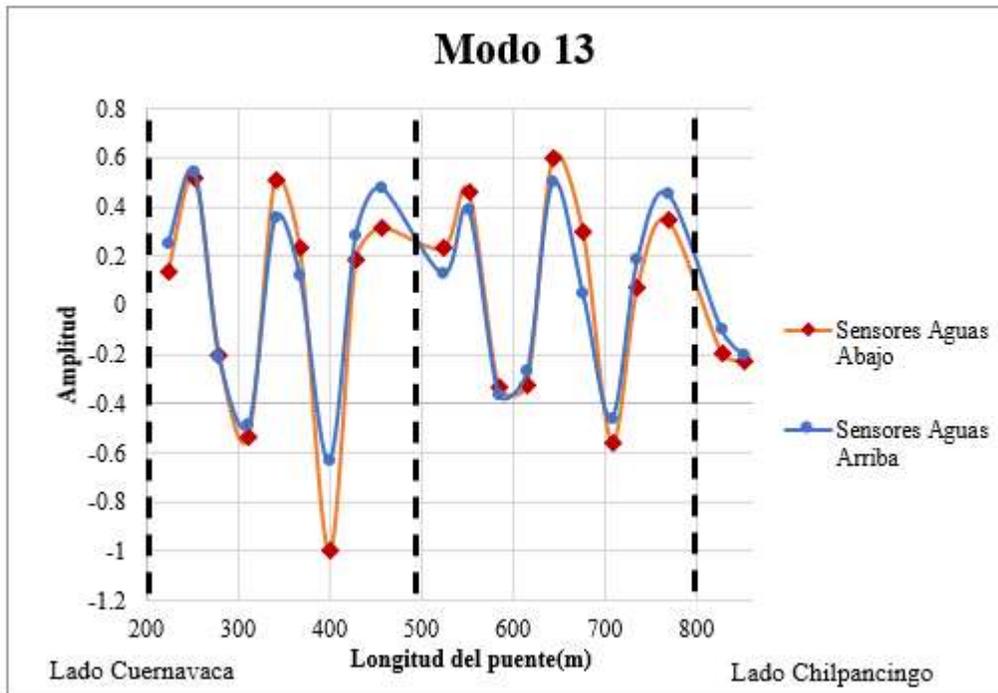


Figura 3.22 Forma modal del modo 13

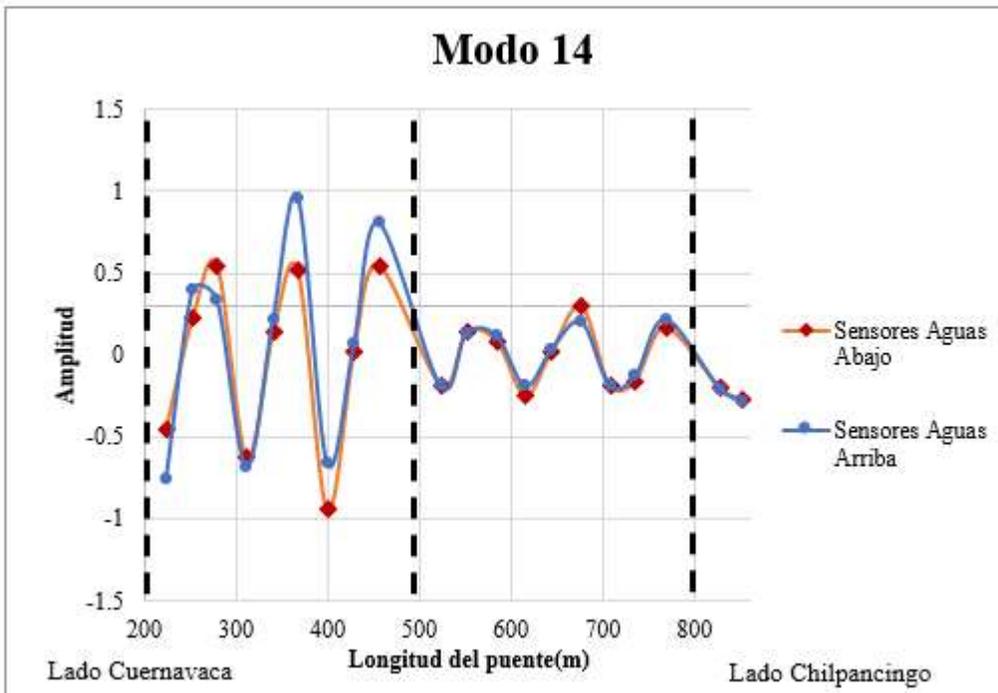


Figura 3.23 Forma modal del modo 14

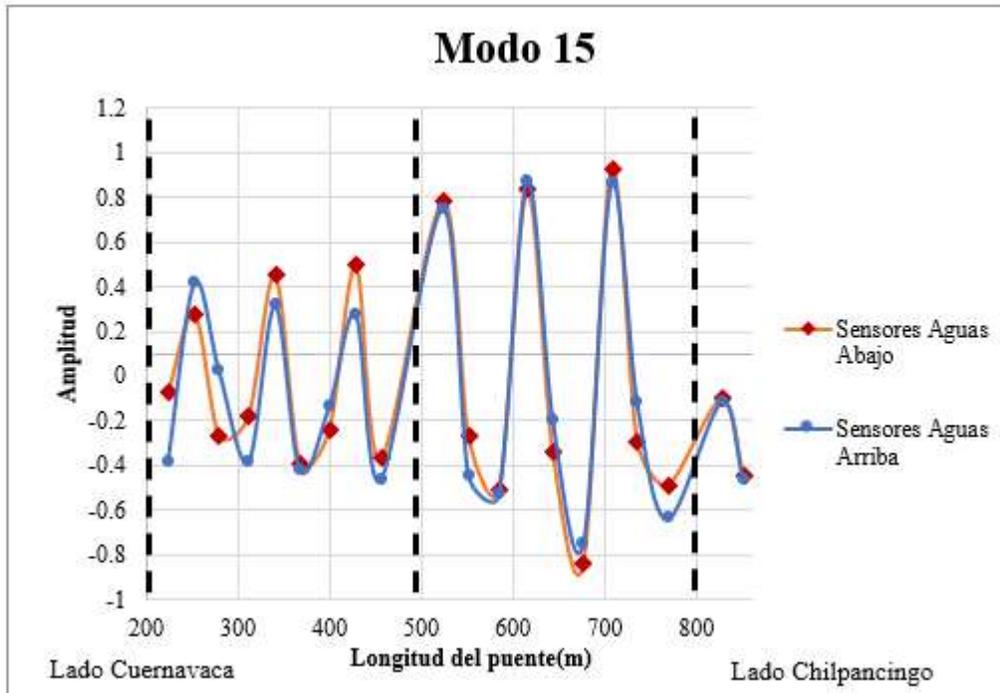


Figura 3.24 Forma modal del modo 15

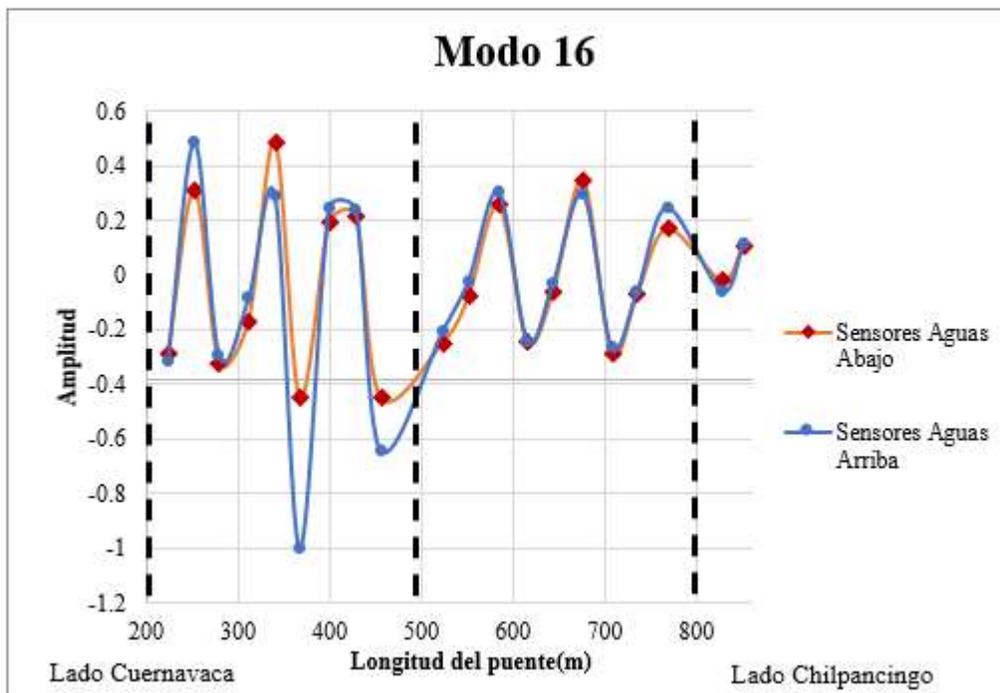


Figura 3.25 Forma modal del modo 16

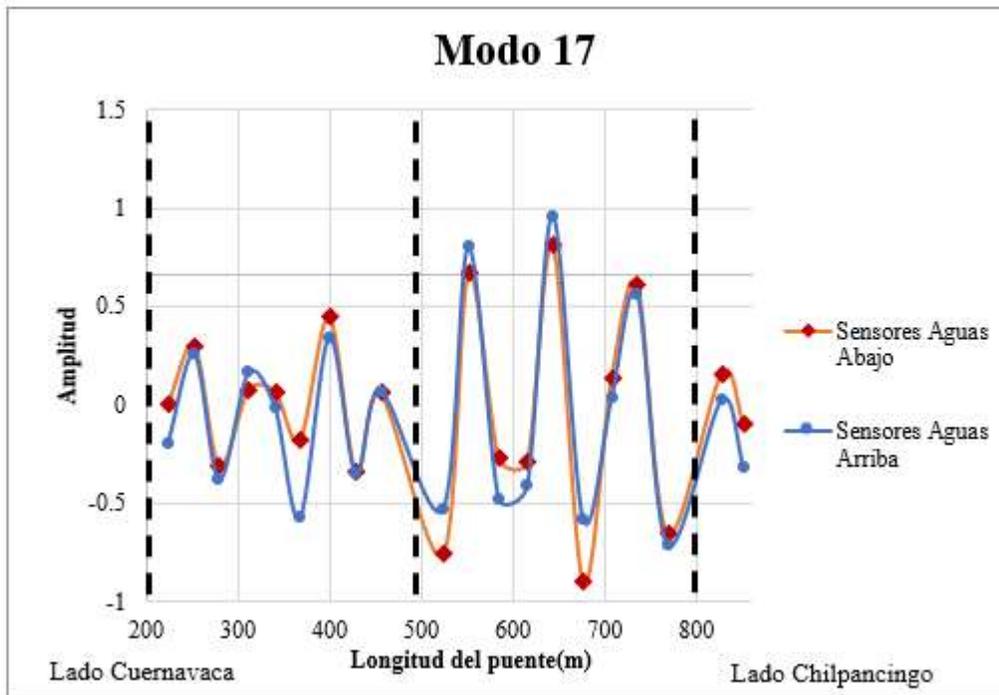


Figura 3.26 Forma modal del modo 17

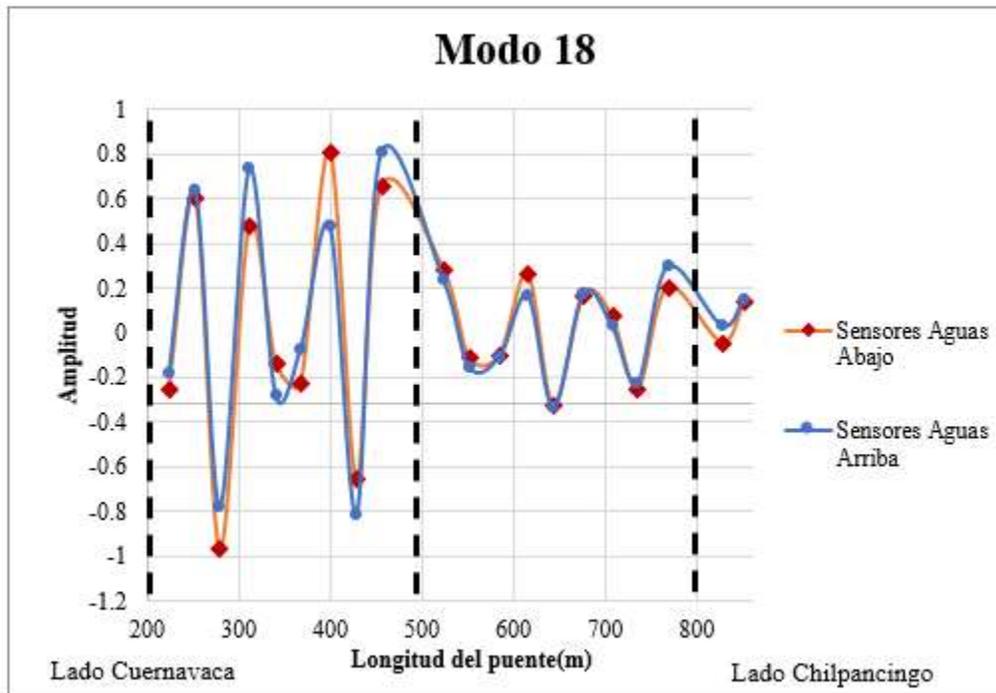


Figura 3.27 Forma modal del modo 18

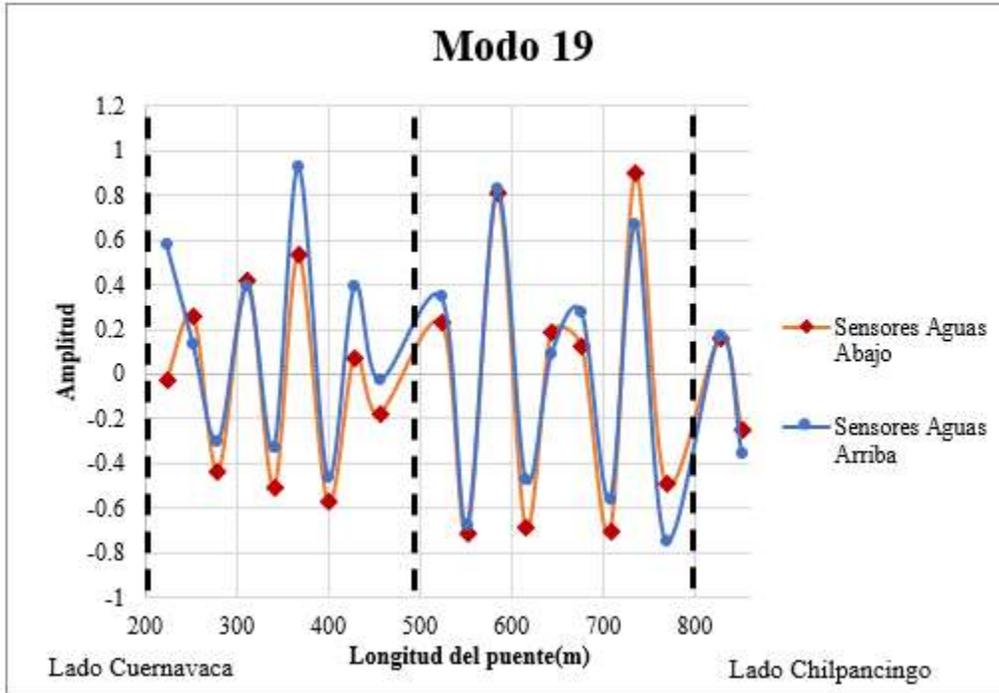


Figura 3.28 Forma modal del modo 19

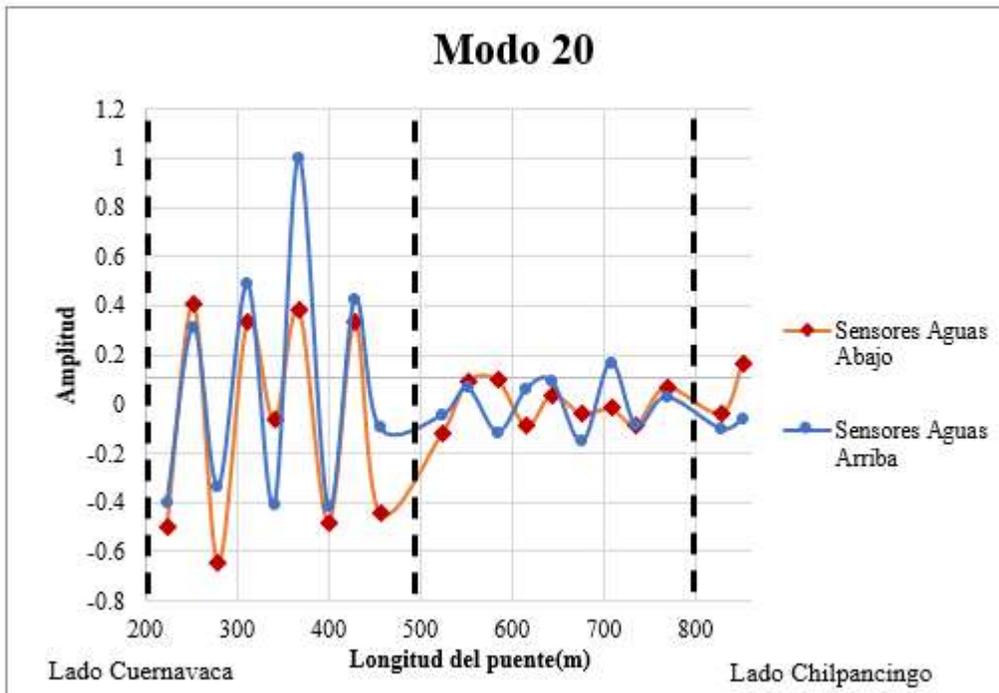


Figura 3.29 Forma modal del modo 20

Como resumen del análisis de las formas modales de deformación del puente Mezcala, podemos decir que las amplitudes de los lados aguas arriba y aguas abajo, presentan valores muy similares, excepto para el sensor ubicado al centro del claro 3, lado aguas arriba. Lo anterior sirve como un indicador para realizar una inspección visual de la zona para determinar y evaluar si es que existe daño estructural. Por otro lado, se destaca la cantidad considerable de modos de los cuales fue posible estimar sus formas modales, lo anterior radica principalmente en la considerable cantidad de sensores instalados en el puente y, por otra parte, al empleo de la técnica EFDD, con la cual, fue posible correlacionar y mejorar la estimación de los parámetros modales.

3.1 Seguimiento de las respuestas bajo condiciones de carga viva vehicular

Además del monitoreo de los parámetros modales del puente, se ha dado seguimiento a las respuestas estructurales bajo condición de carga viva vehicular. Para ello, se han desarrollado programas de análisis que permiten identificar, para el caso de los extensómetros de las vigas, los picos en la señal asociados al paso de los vehículos; una vez identificado, el programa guarda las amplitudes máximas a tensión y a compresión producto del paso de los vehículos en una base de datos, de la cual, se realiza un análisis estadístico para calcular los valores promedio y los límites superiores e inferiores, los cuales se calcularon como el valor de la media \pm 2.5 desviaciones estándar.

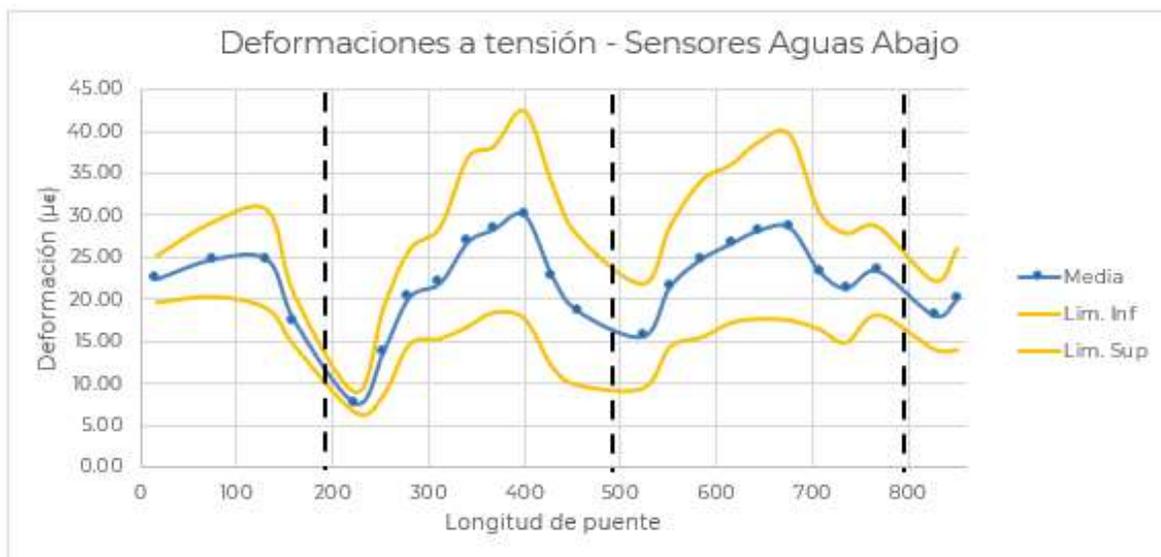


Figura 3.30 Deformaciones promedio a tensión de los sensores aguas abajo

En las figuras 3.30 y 3.31, se muestran los valores promedio de las deformaciones a tensión producto del paso de los vehículos sobre el puente para los sensores aguas arriba y aguas arriba respectivamente.

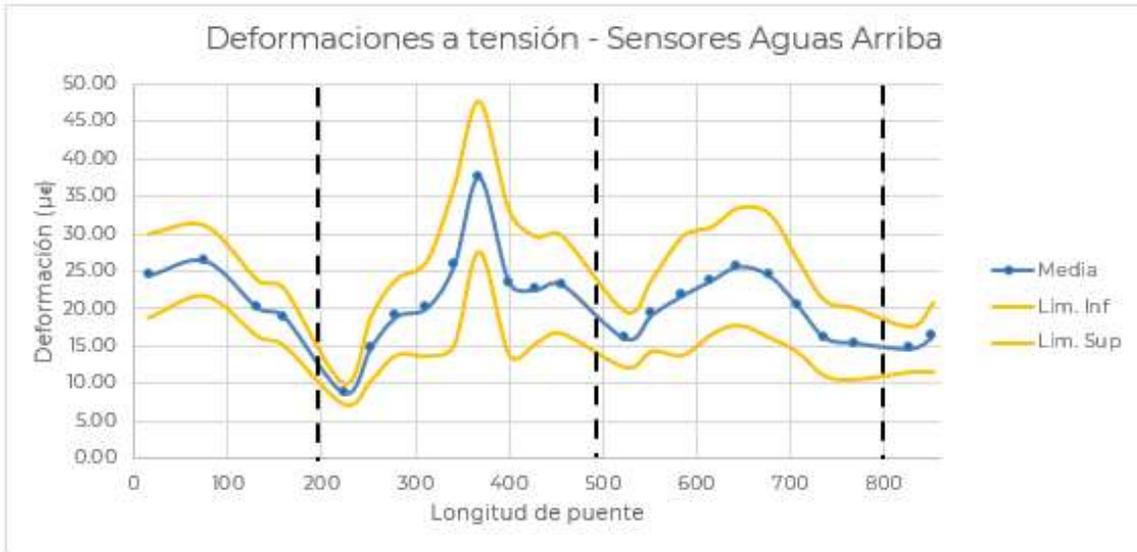


Figura 3.31 Deformaciones promedio a tensión de los sensores aguas arriba

Como se puede apreciar en los gráficos 3.30 y 3.31, las deformaciones por carga viva son mayores en el claro 3 aguas arriba, misma sección del puente que se encontró con mayores amplitudes en el análisis modal. Por otra parte, en las figuras 3.32 y 3.33, se muestran los valores promedio de las deformaciones a compresión producto del paso de los vehículos sobre el puente para los sensores aguas abajo y aguas arriba respectivamente.

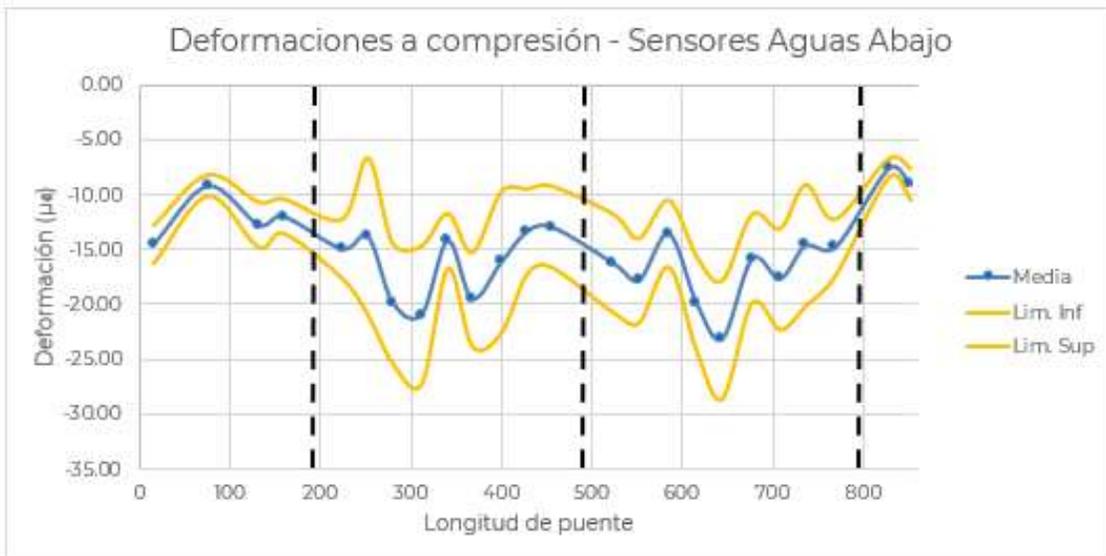


Figura 3.32 Deformaciones promedio a compresión de los sensores aguas abajo

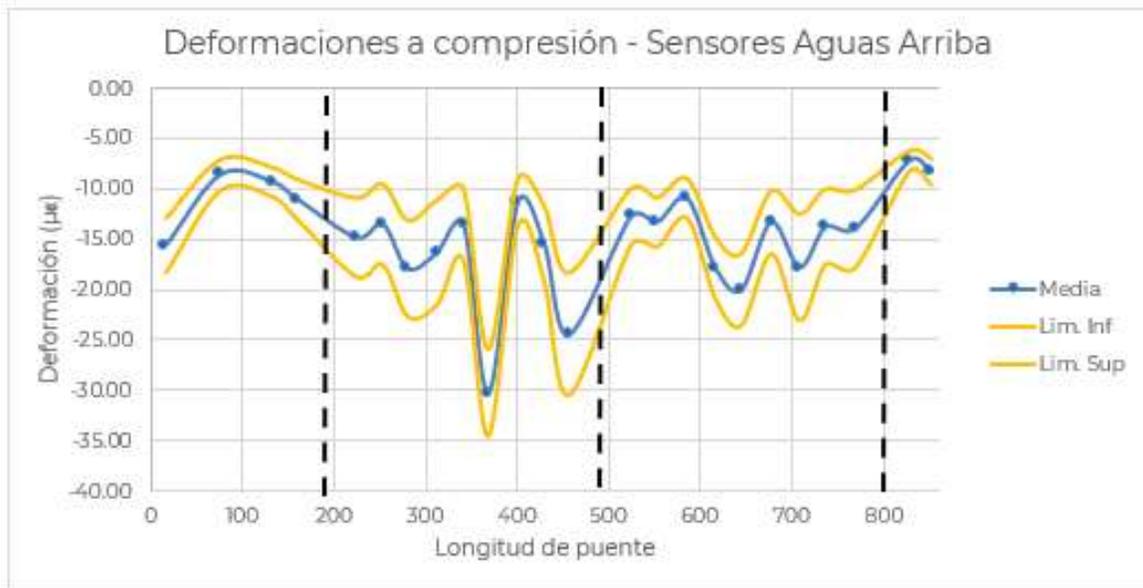


Figura 3.33 Deformaciones promedio a compresión de los sensores aguas arriba

3.2 Seguimiento de las fuerzas de tensión de los tirantes

Otros de los parámetros estructurales monitoreados del puente Mezcala son las fuerzas de tensión de algunos tirantes, los cuales, fueron instrumentados con acelerómetros uniaxiales ubicados al centro de cada uno de ellos. La señal de aceleración producto de excitación ambiental es procesada para obtener sus frecuencias naturales a través de la FFT, con éstas, se procede a calcular la fuerza de tensión del tirante (Carrión, 2007).

Este procedimiento se realiza para los bloques de datos obtenidos del sistema de monitoreo. Una vez obtenidas las fuerzas de tensión, éstas se promedian en periodos de 15 días de duración. En la figura 3.34 se muestra el seguimiento realizado a la tensión del tirante SA1-T7, el cual es el tirante 7 de la Semiarpa 1. Como se puede apreciar, la tensión en dicho tirante muestra un comportamiento constante con variaciones bajas. El valor de la línea punteada "FREYSSINET 2007", hace referencia al valor obtenido de un pesaje directo realizado por una empresa en el año 2007. Los límites de operación superior e inferior obedecen a los valores de la media de la tensión ± 2.5 desviaciones estándar. Finalmente, el valor de "Límite de Diseño" hace referencia al valor máximo de tensión permisible, el cual se obtiene como el 45% de la fuerza última de ruptura del tirante. En la figura 3.35, se muestran los valores promedio de las fuerzas de tensión de todos los tirantes monitoreados, tanto para aguas arriba como para aguas abajo.

Como se puede apreciar, las fuerzas de los tirantes para ambos cuerpos del puente son muy similares, excepto para los tirantes que se encuentran inmediatamente después de las pilas del lado Chilpancingo.

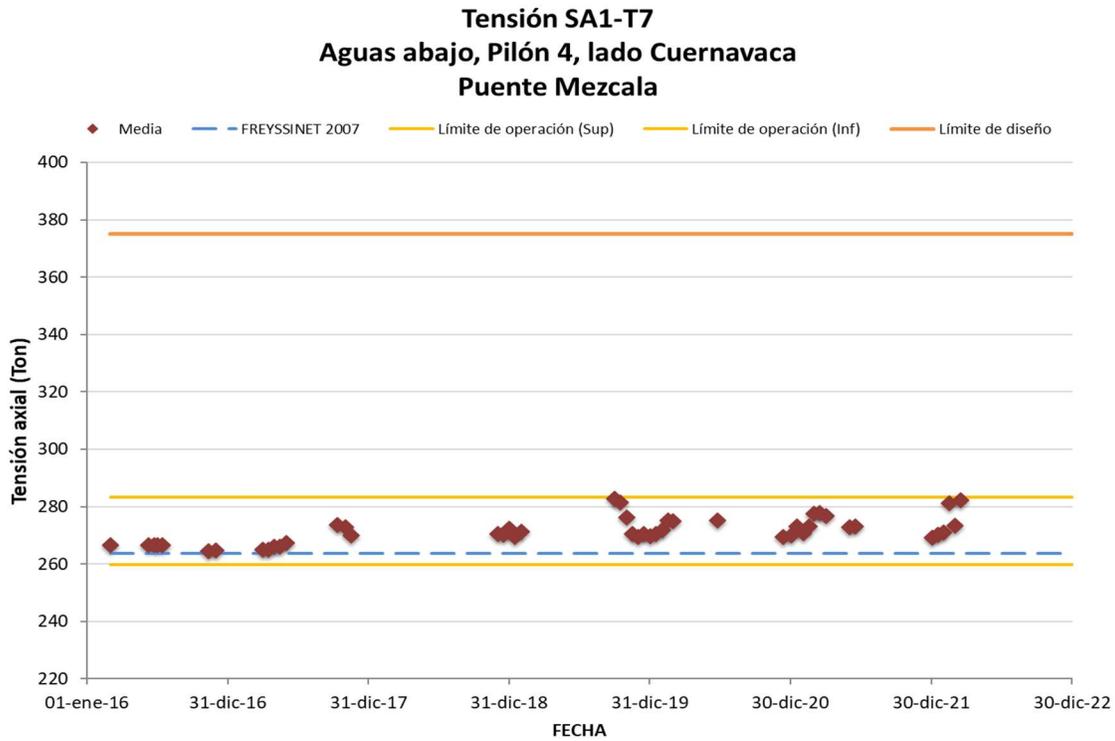


Figura 3.34 Seguimiento de la fuerza de tensión del tirante SA1-T7

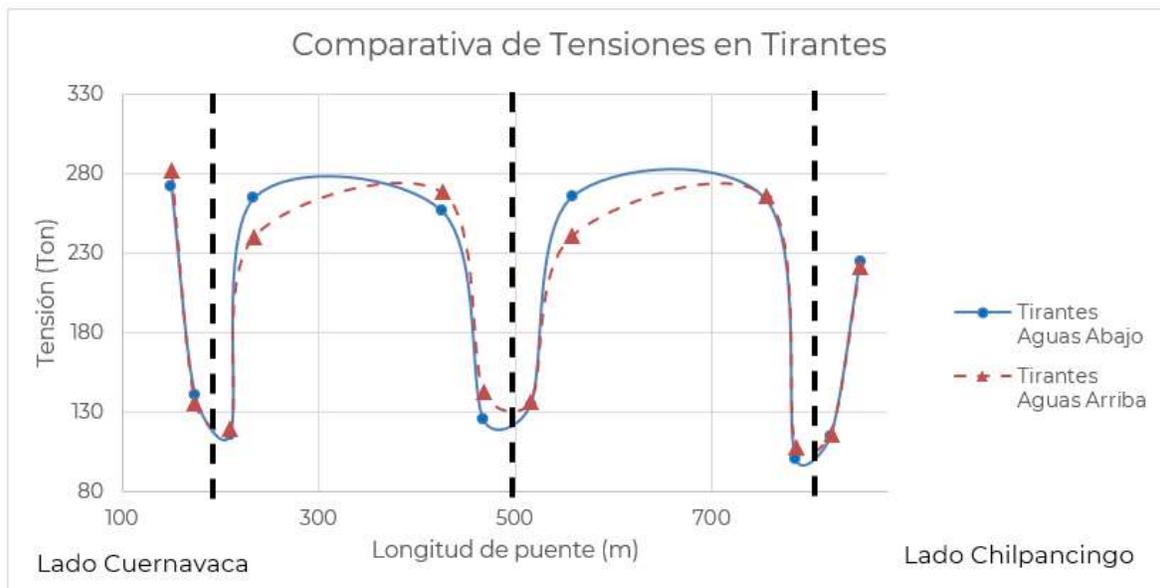


Figura 3.35 Comparativa de las tensiones de los tirantes de los dos cuerpos del puente

3.3 Seguimiento de los efectos permanentes

Finalmente, se presenta el seguimiento realizado a los efectos permanentes que actúan en el puente a través del monitoreo de la tendencia de cada sensor, la cual, es el valor de la media de la señal y ésta va cambiando en el tiempo, lo cual, es un índice del comportamiento del puente medido desde la fecha de instalación del sensor. Los efectos permanentes de los extensómetros se muestran en las figuras.3.36 a 3.83.

Como se puede apreciar en algunas gráficas, los datos aparecen intermitentes, esto debido a la pérdida de la información de los sensores producto de fallos en el sistema de monitoreo estructural, puntualmente, del sistema de energización y, por otro lado, a la ruptura de algunos lazos de fibra óptica. No obstante, los cambios en las tendencias se pueden apreciar muy claramente para la mayoría de los sensores.

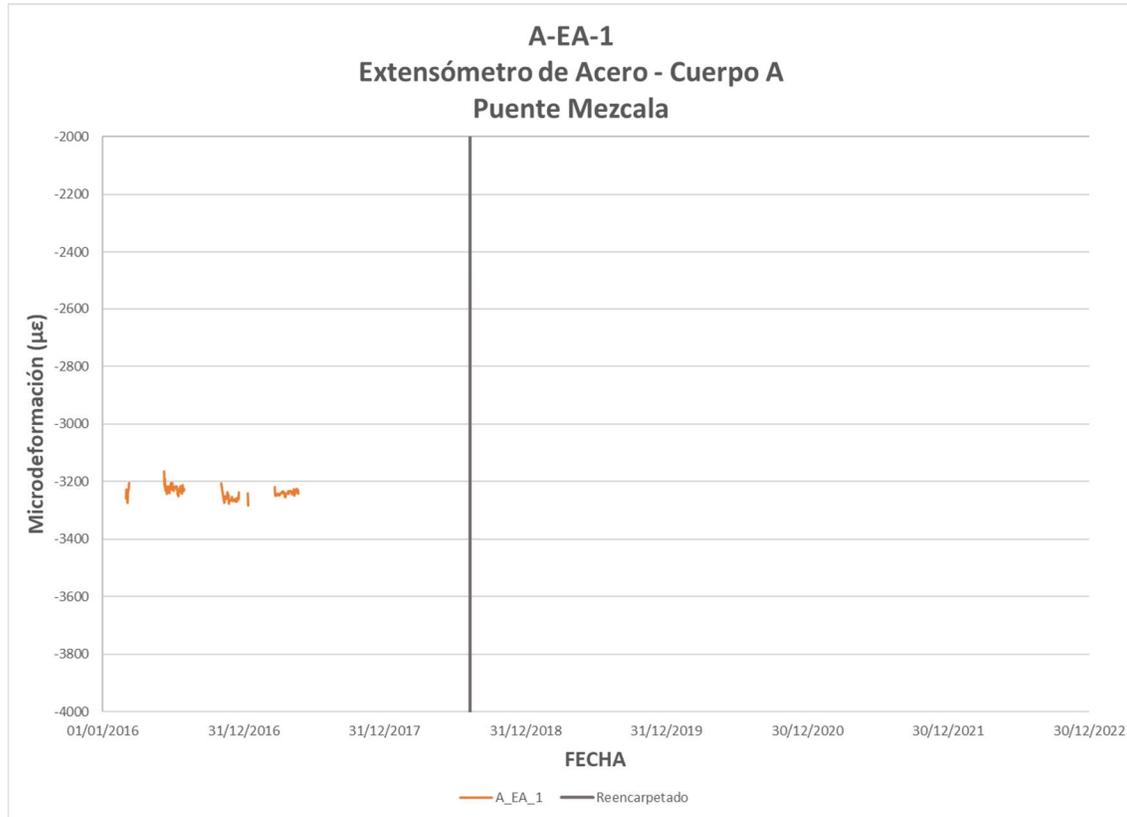


Figura 3.36 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-1

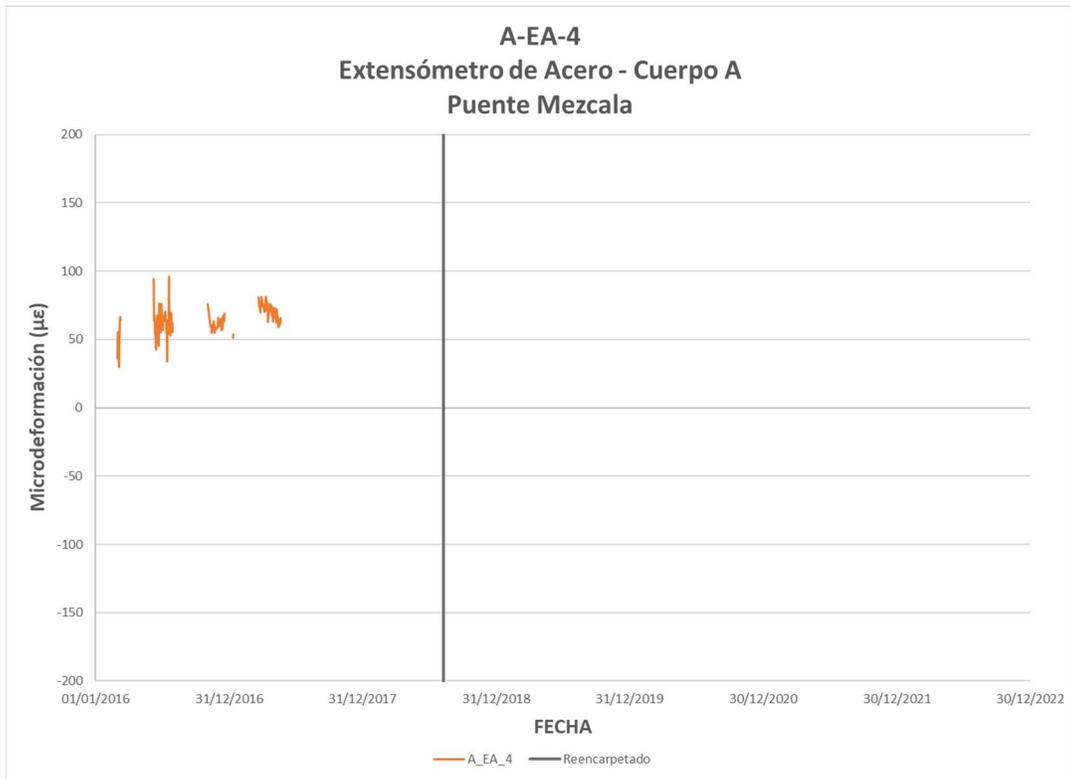


Figura 3.39 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-4

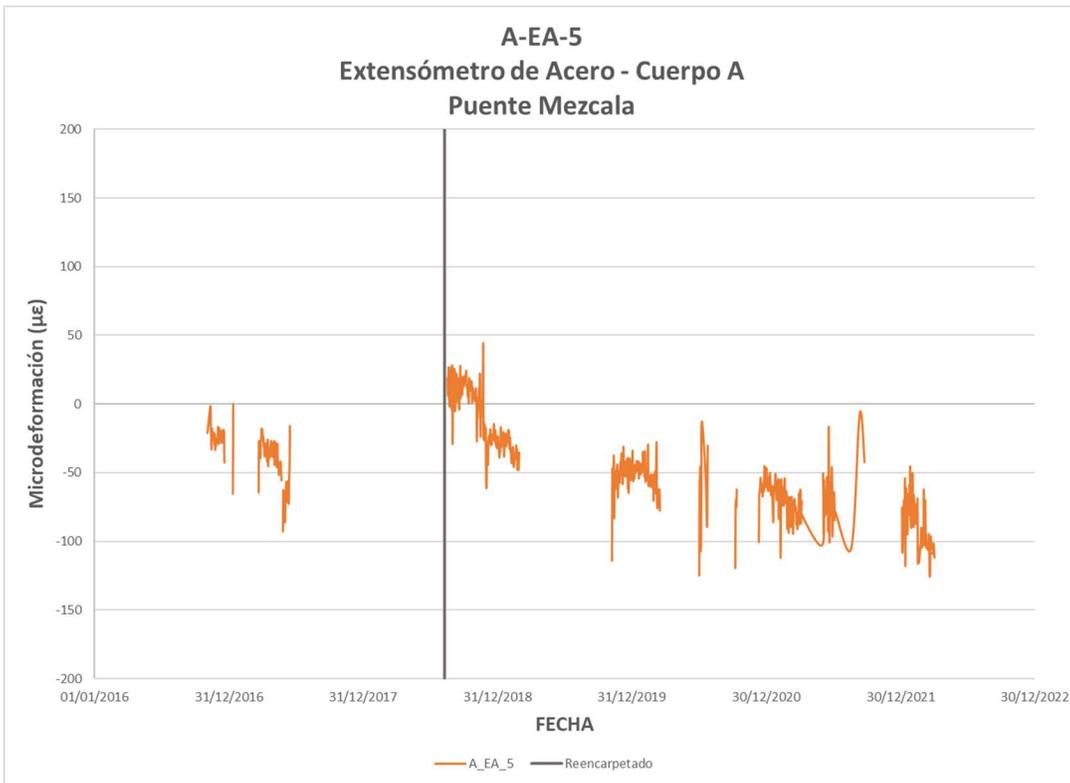


Figura 3.40 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-5

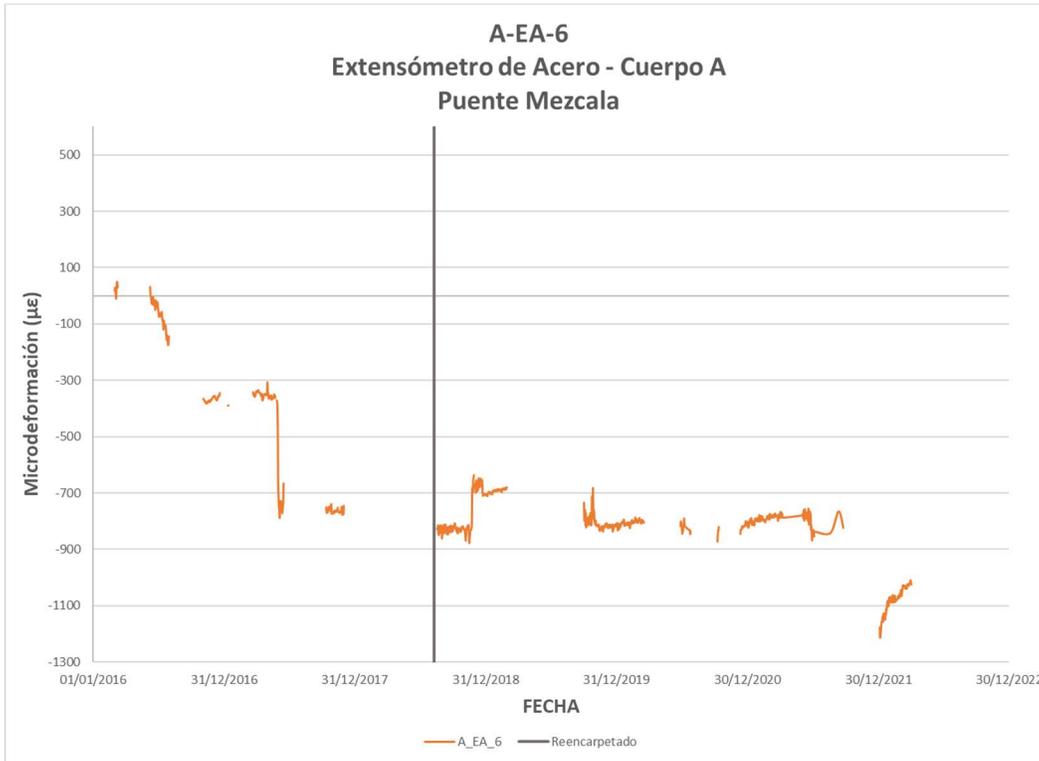


Figura 3.41 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-6

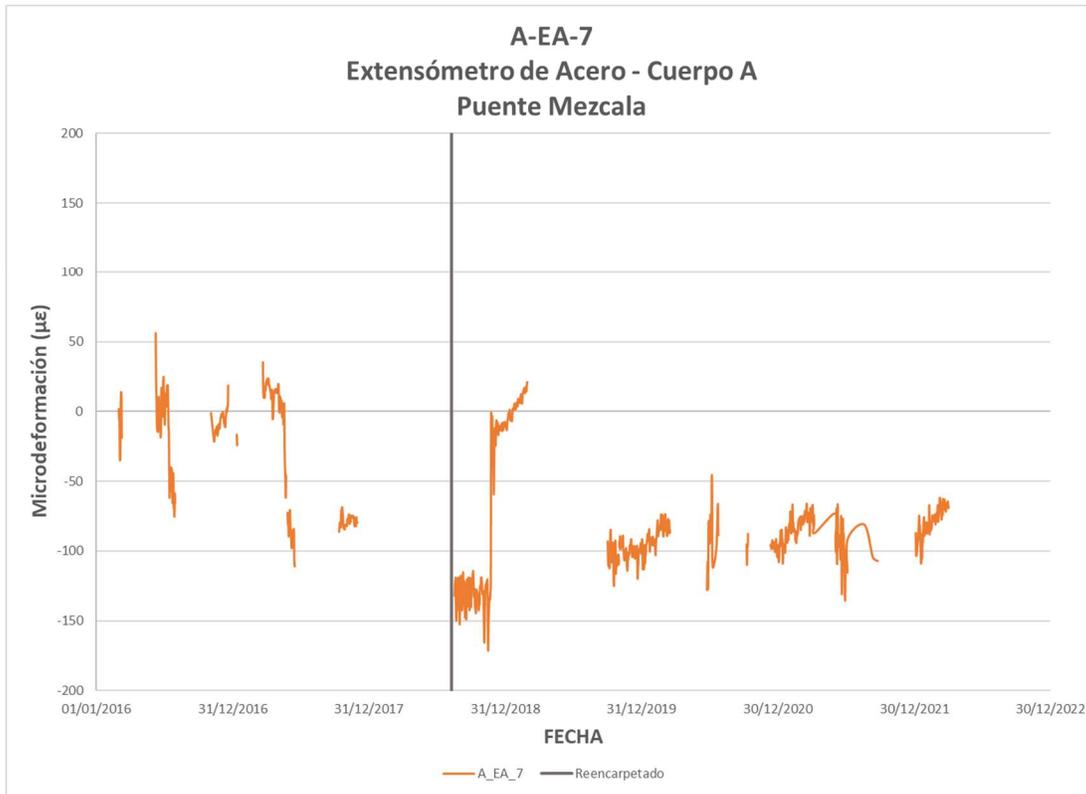


Figura 3.42 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-7

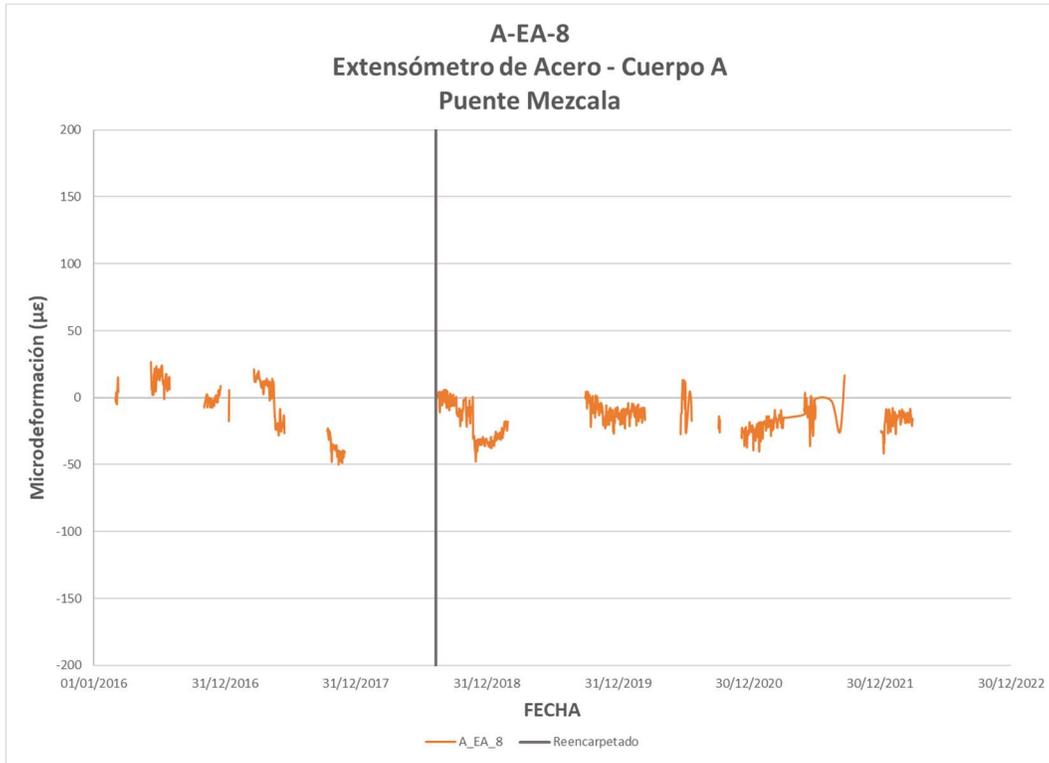


Figura 3.43 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-8

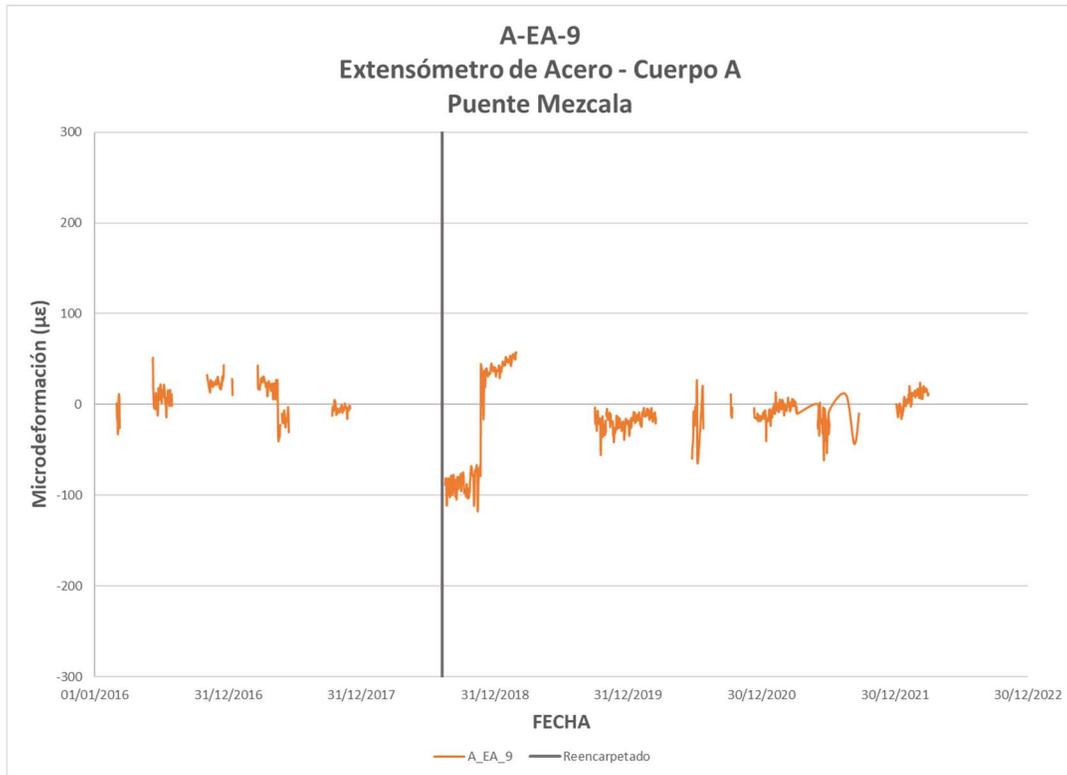


Figura 3.44 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-9

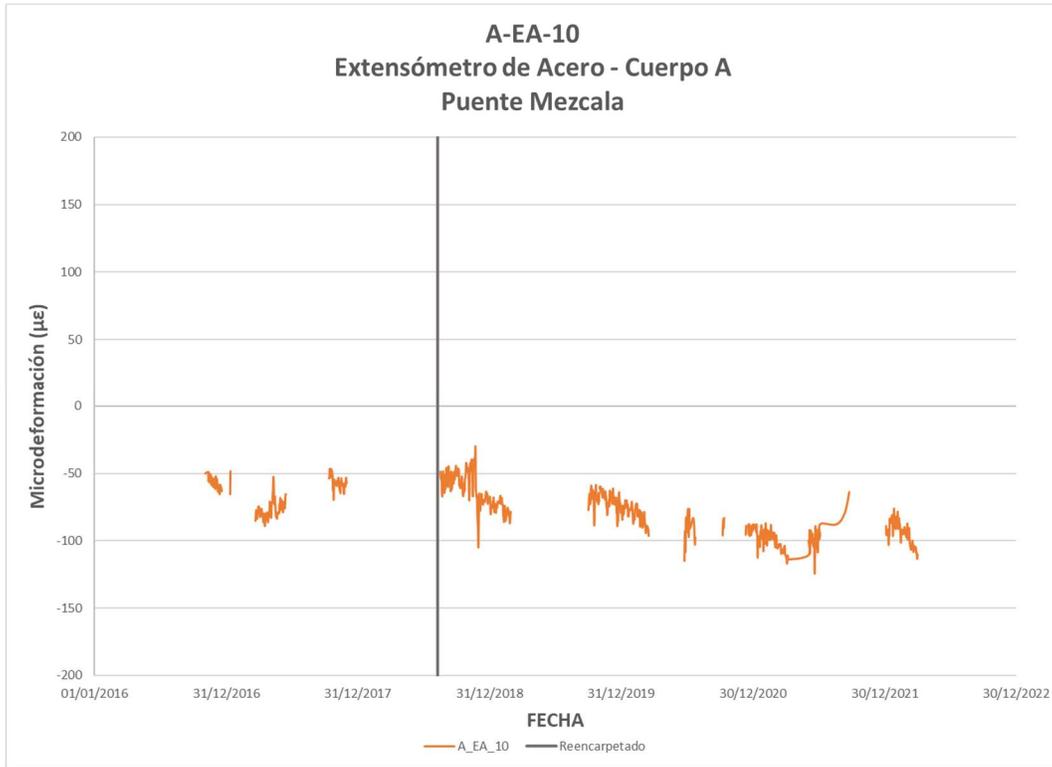


Figura 3.45 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-10

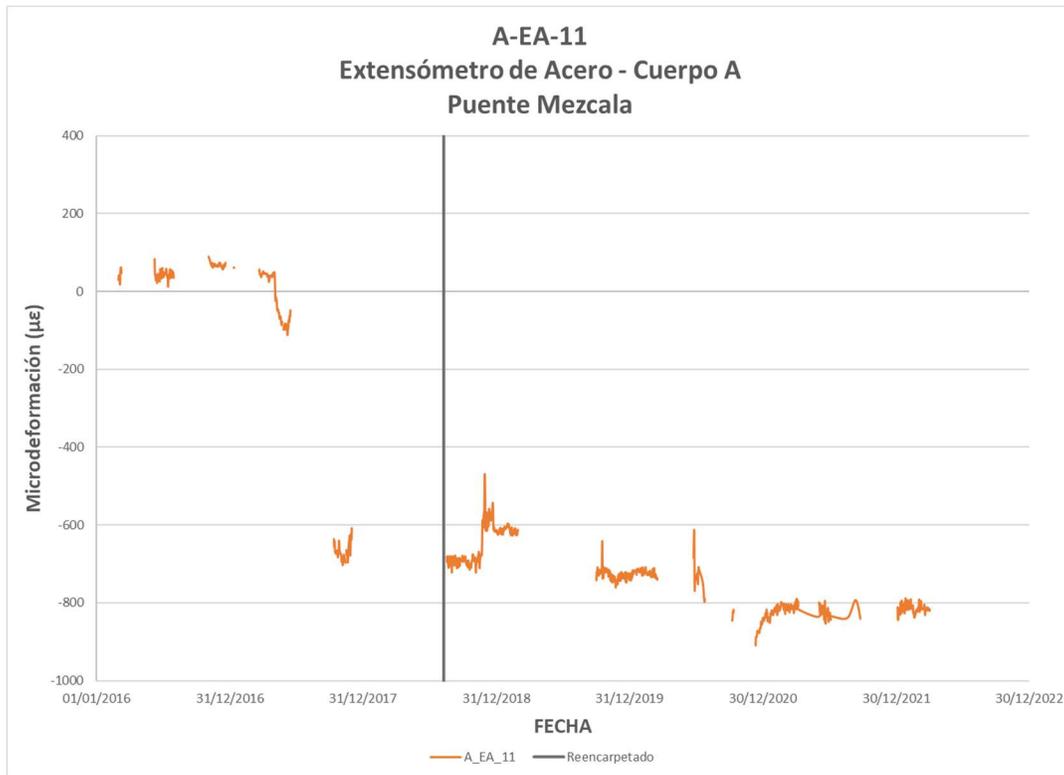


Figura 3.46 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-11

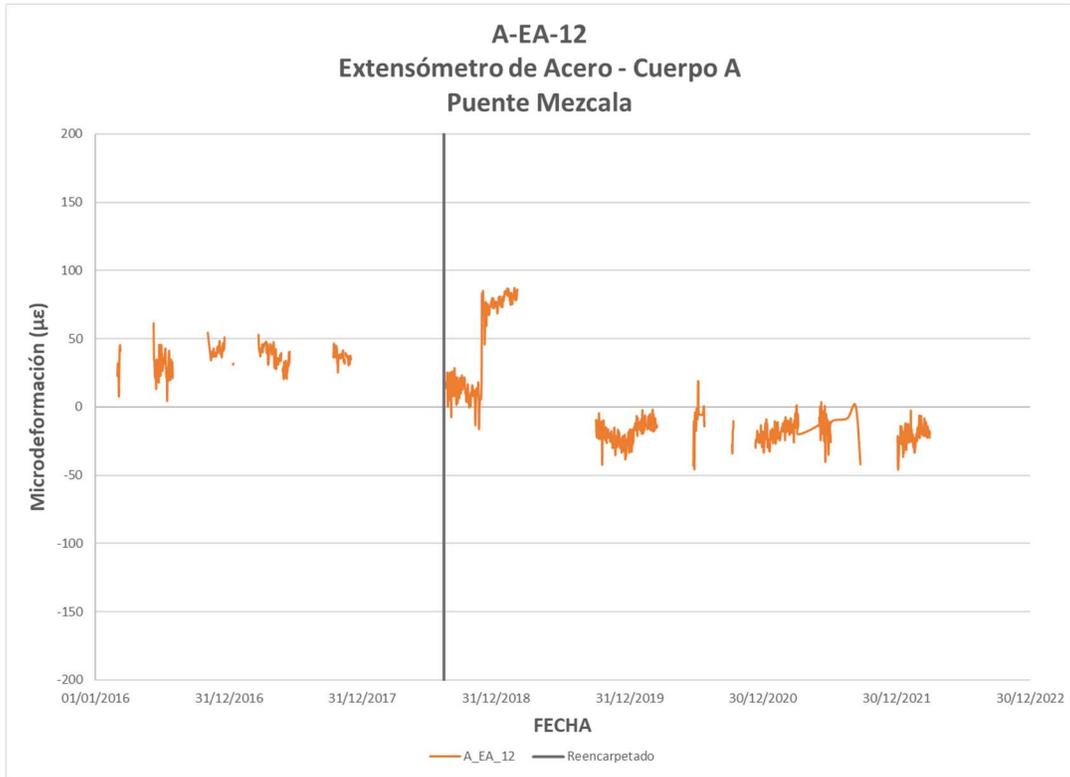


Figura 3.47 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-12

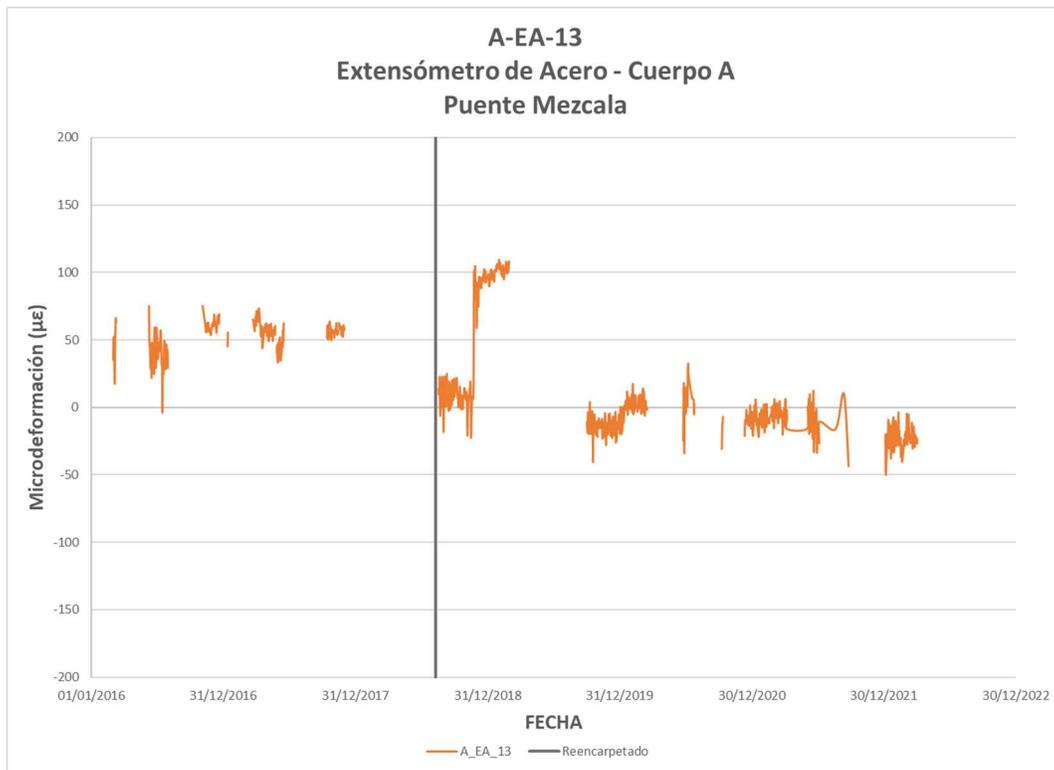


Figura 3.48 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-13

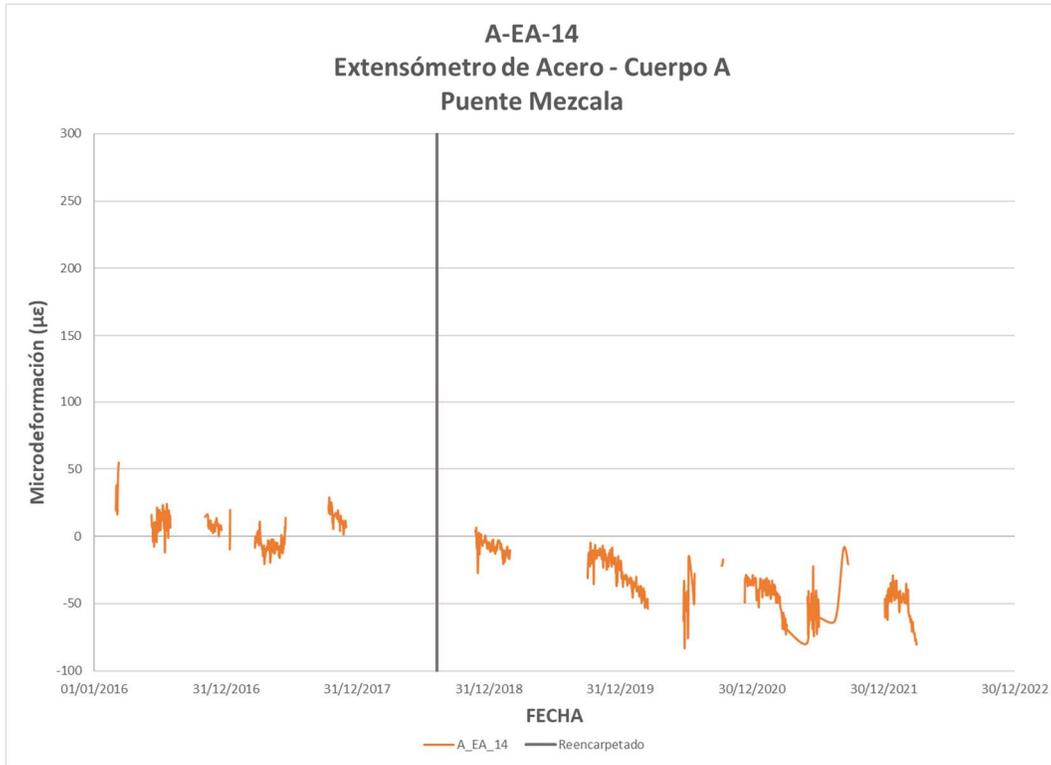


Figura 3.49 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-14

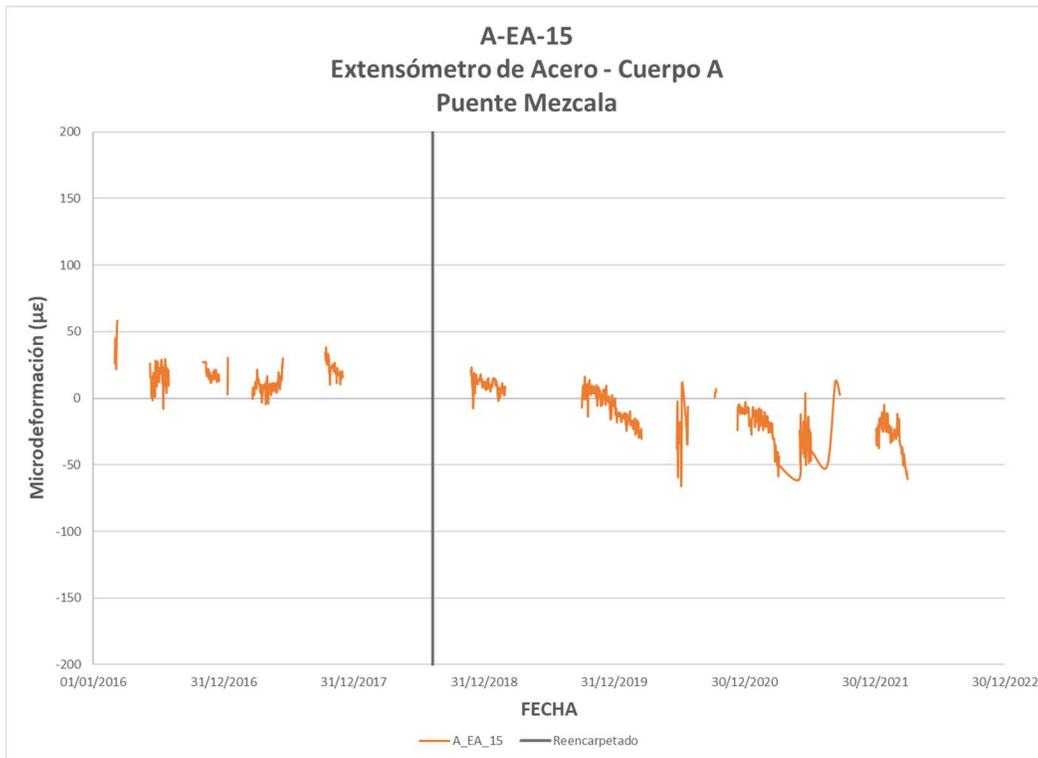


Figura 3.50 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-15

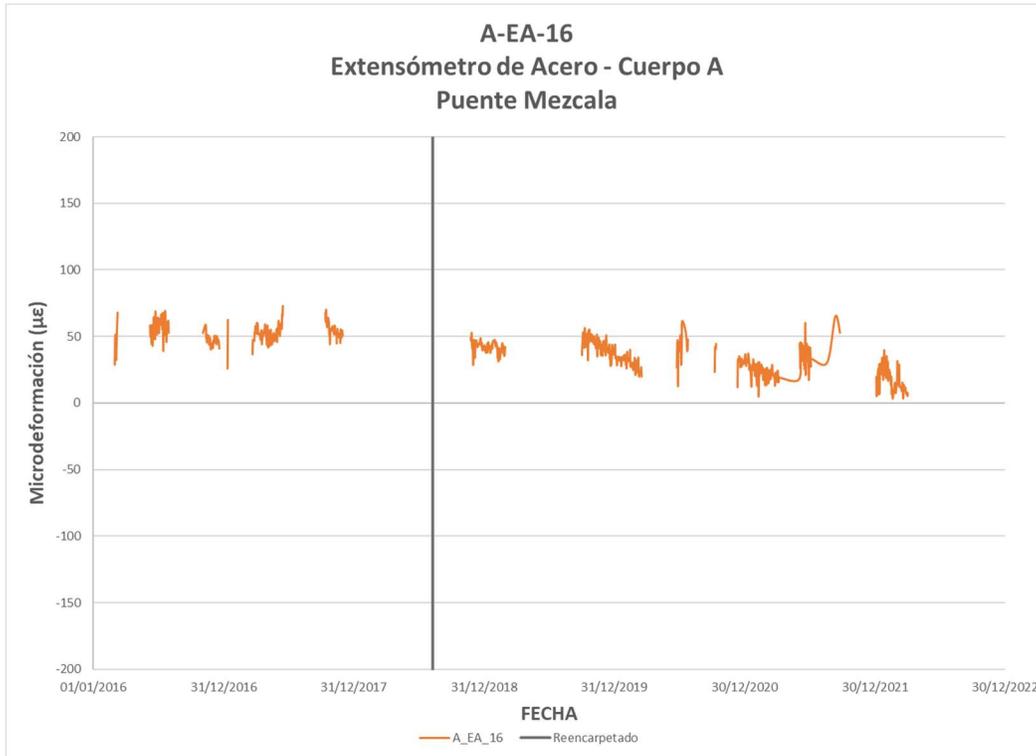


Figura 3.51 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-16

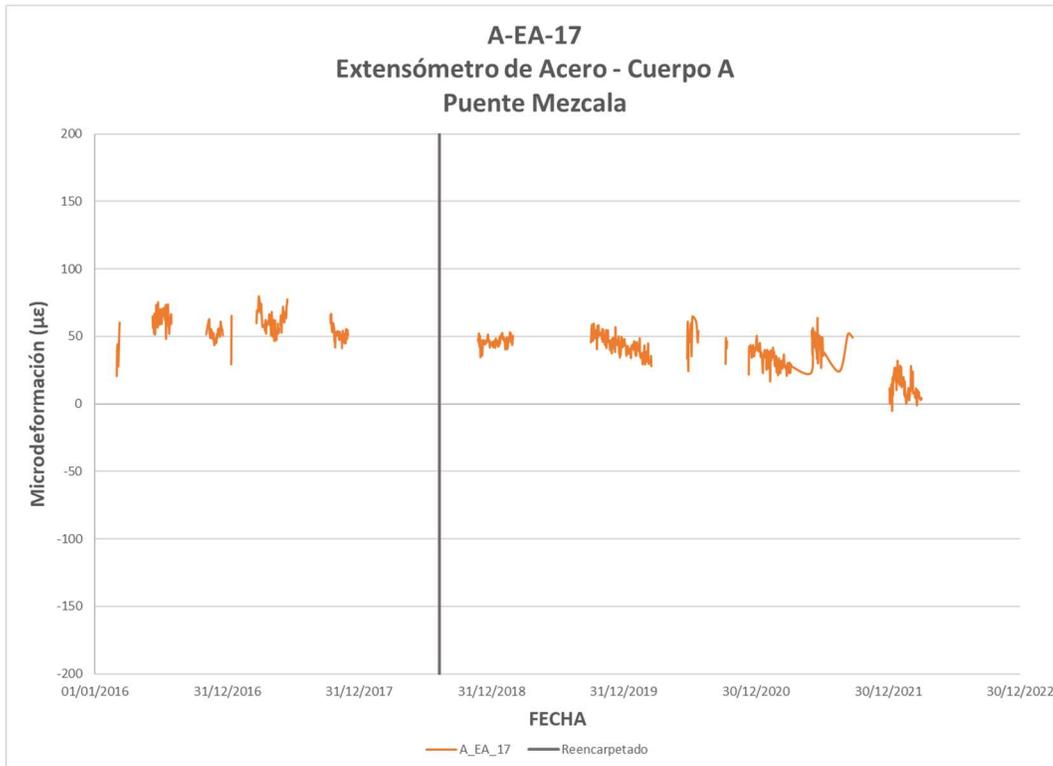


Figura 3.52 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-17

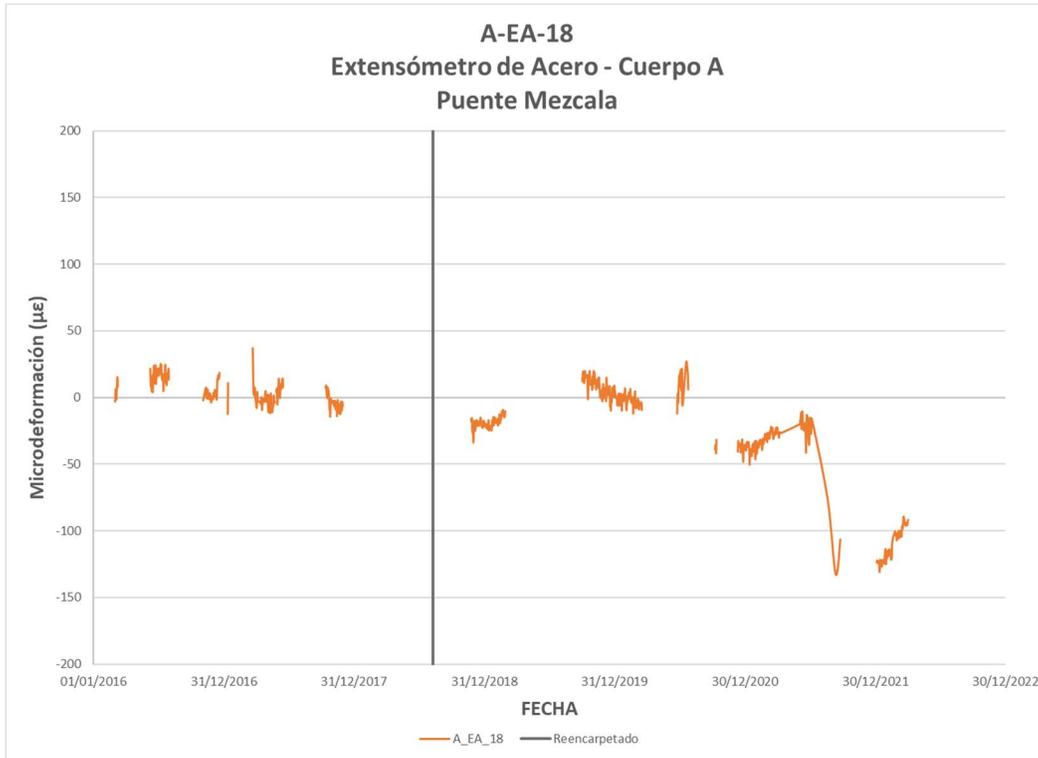


Figura 3.53 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-18

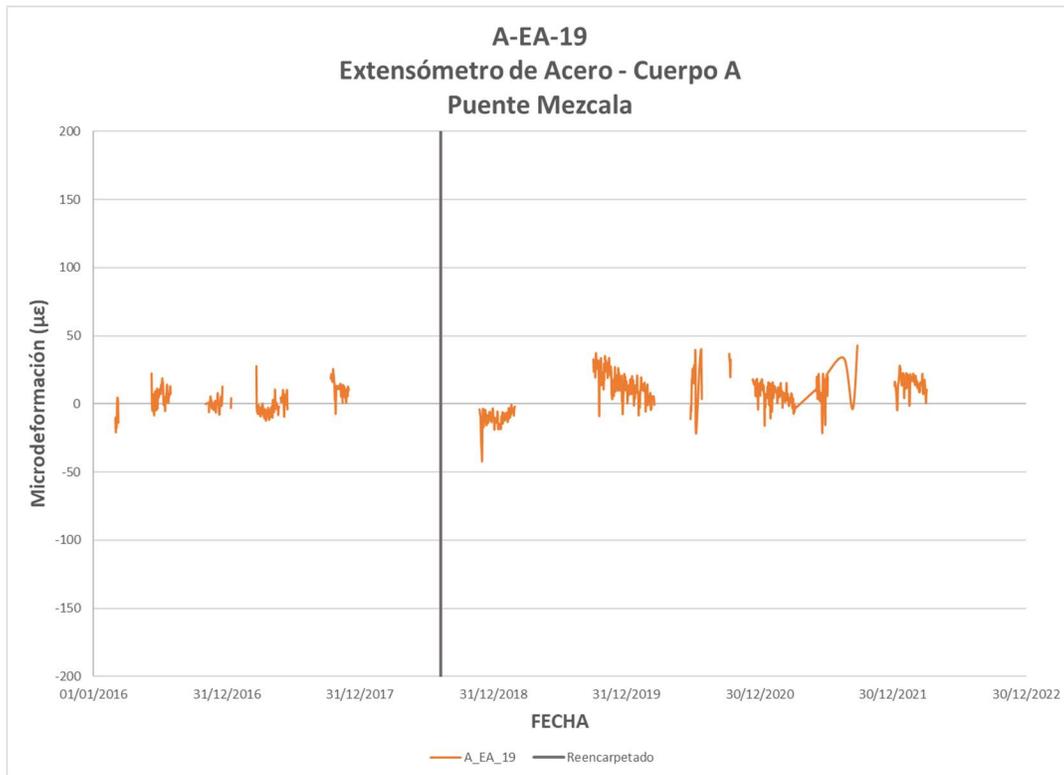


Figura 3.54 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-19

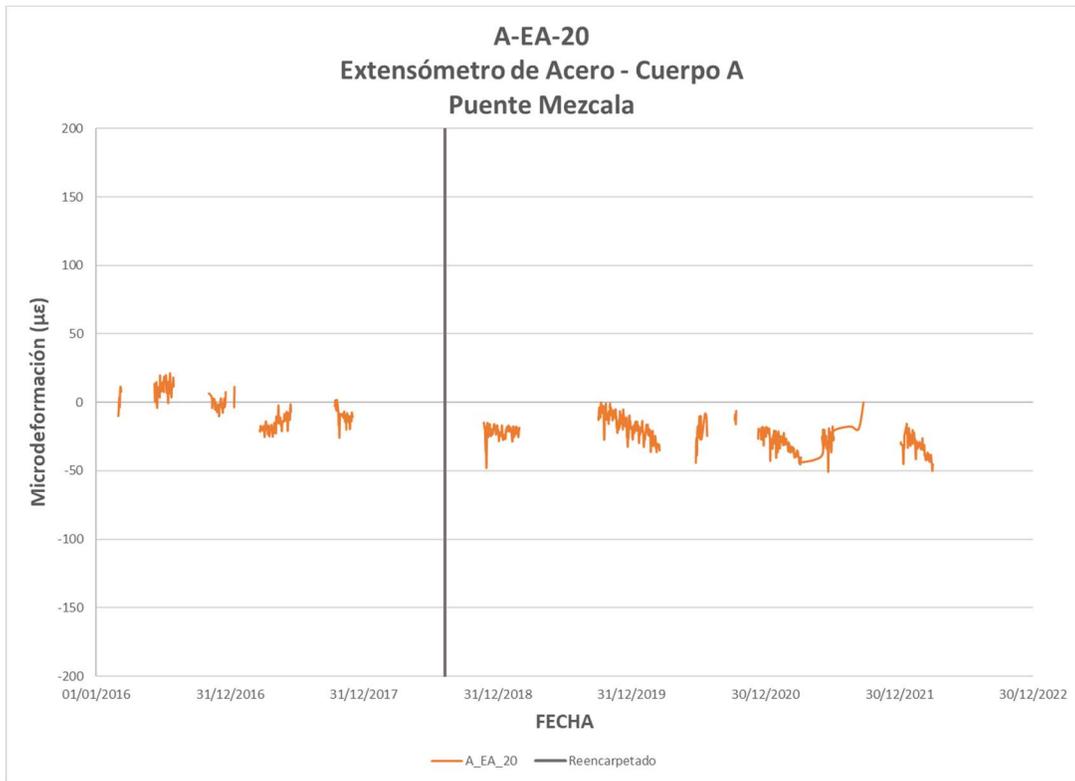


Figura 3.55 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-20

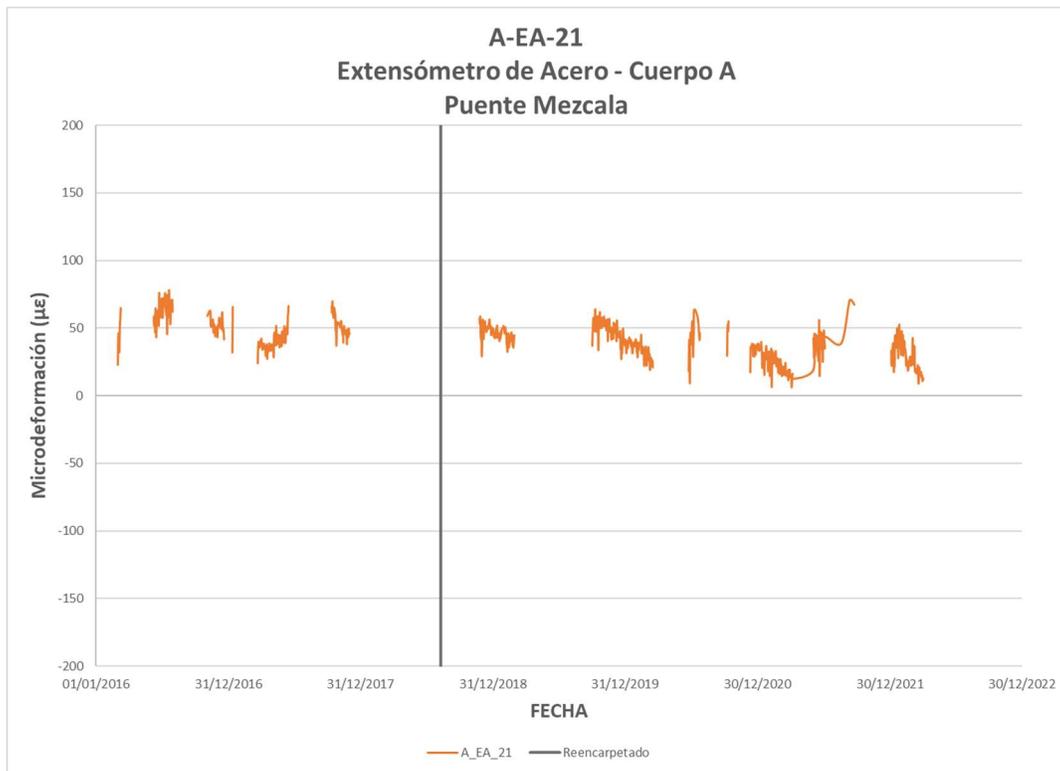


Figura 3.56 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-21

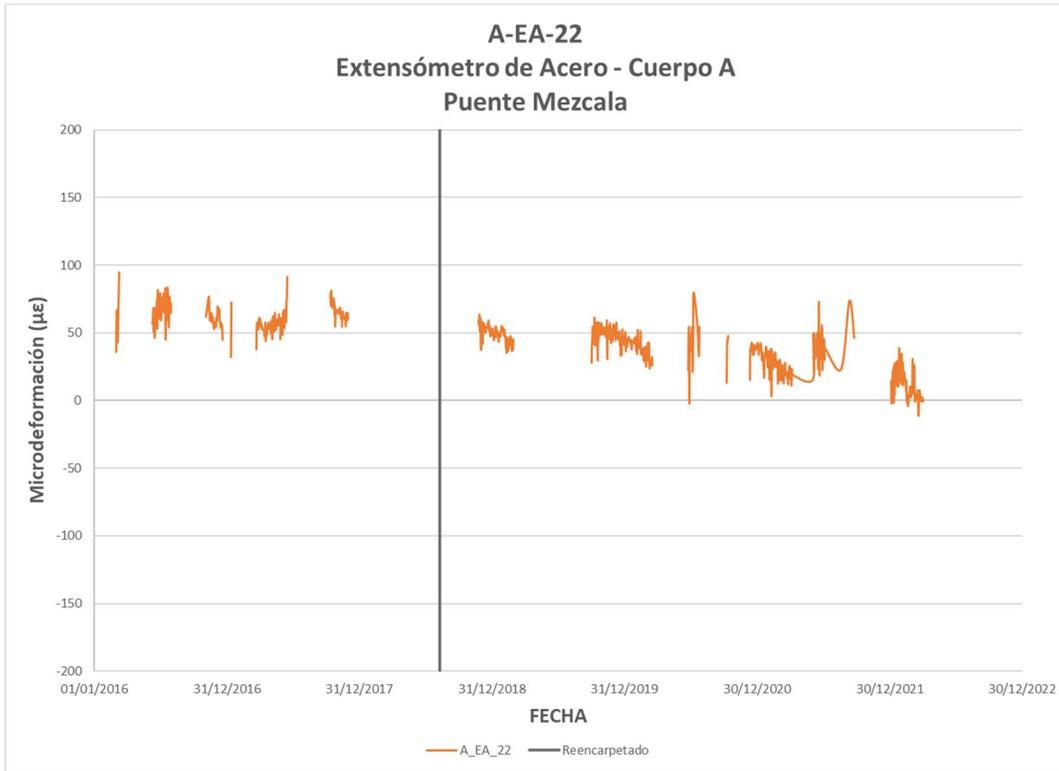


Figura 3.57 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-22

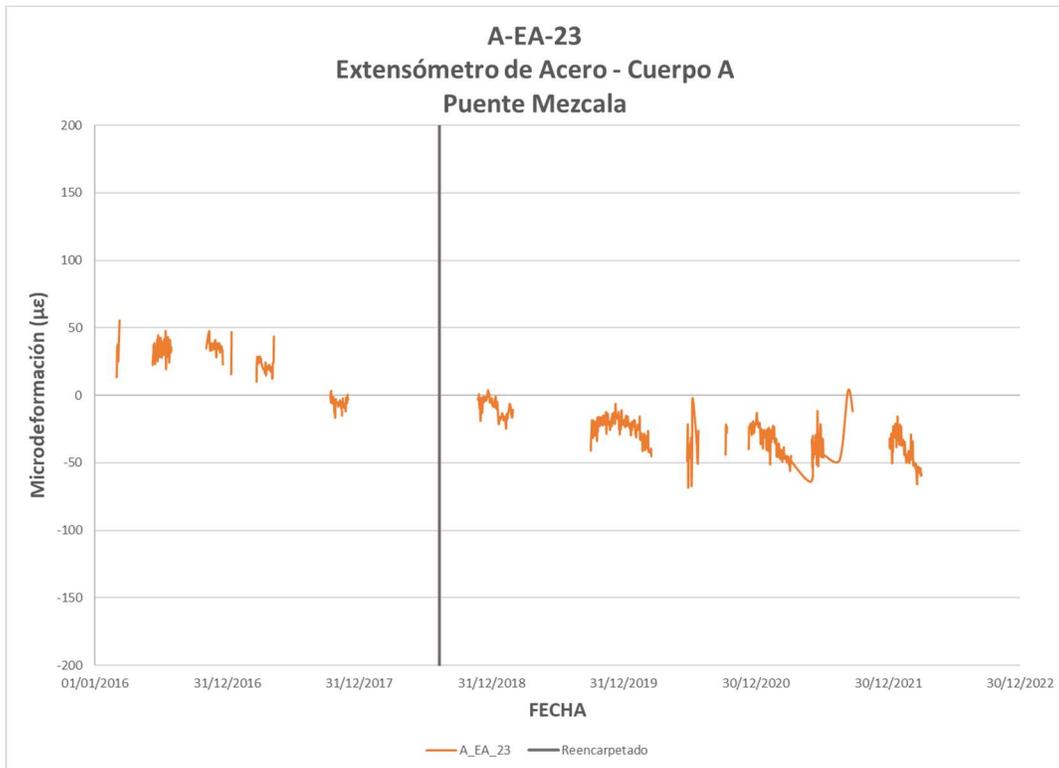


Figura 3.58 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-23

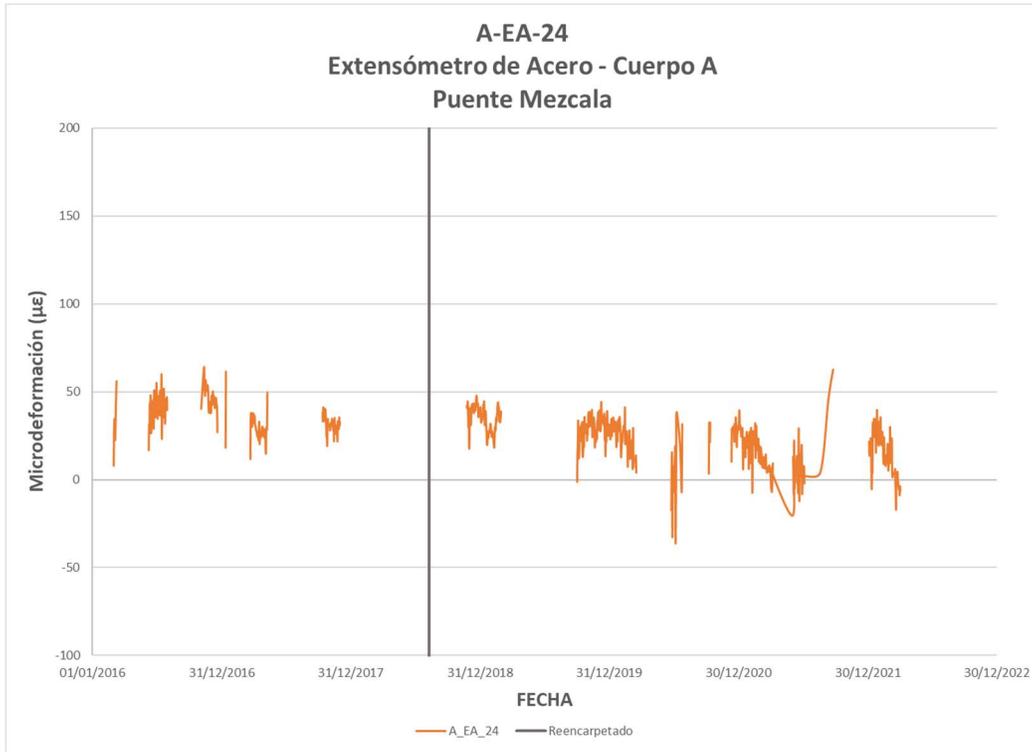


Figura 3.59 Seguimiento de la tendencia del extensómetro A-EA-24

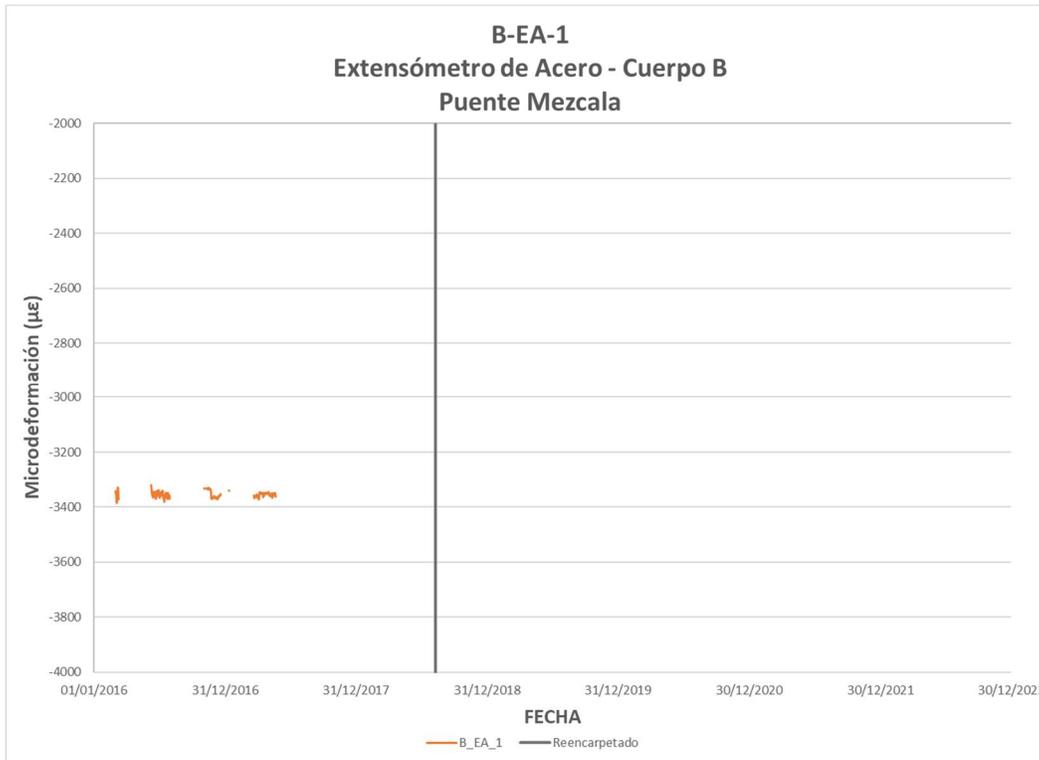


Figura 3.60 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-1

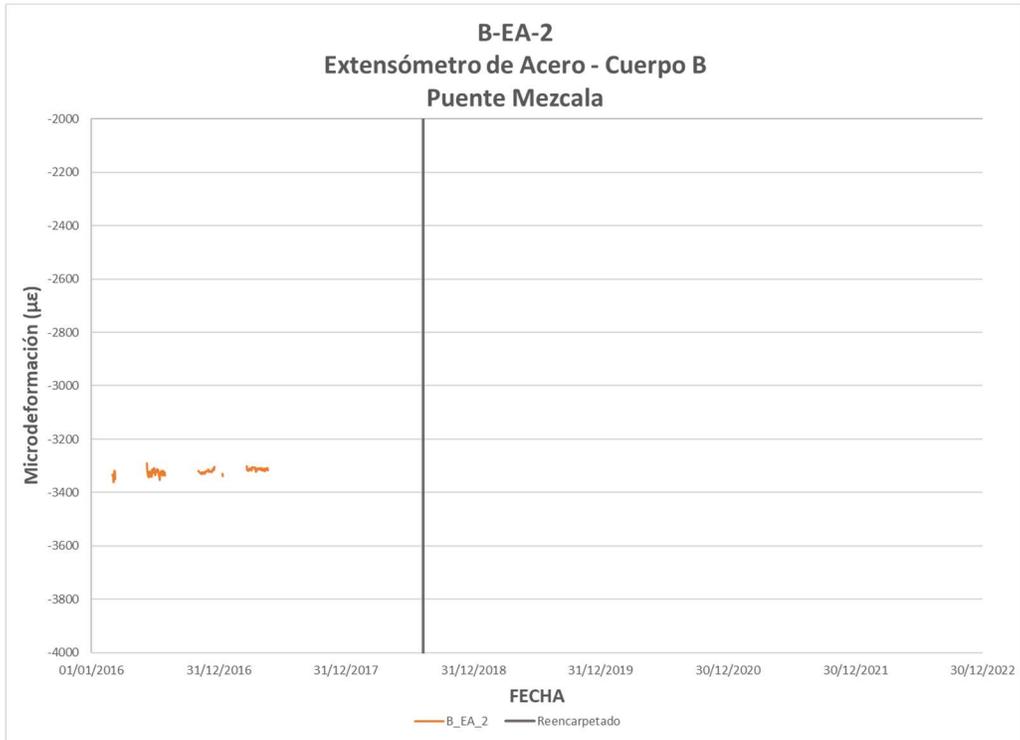


Figura 3.61 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-2

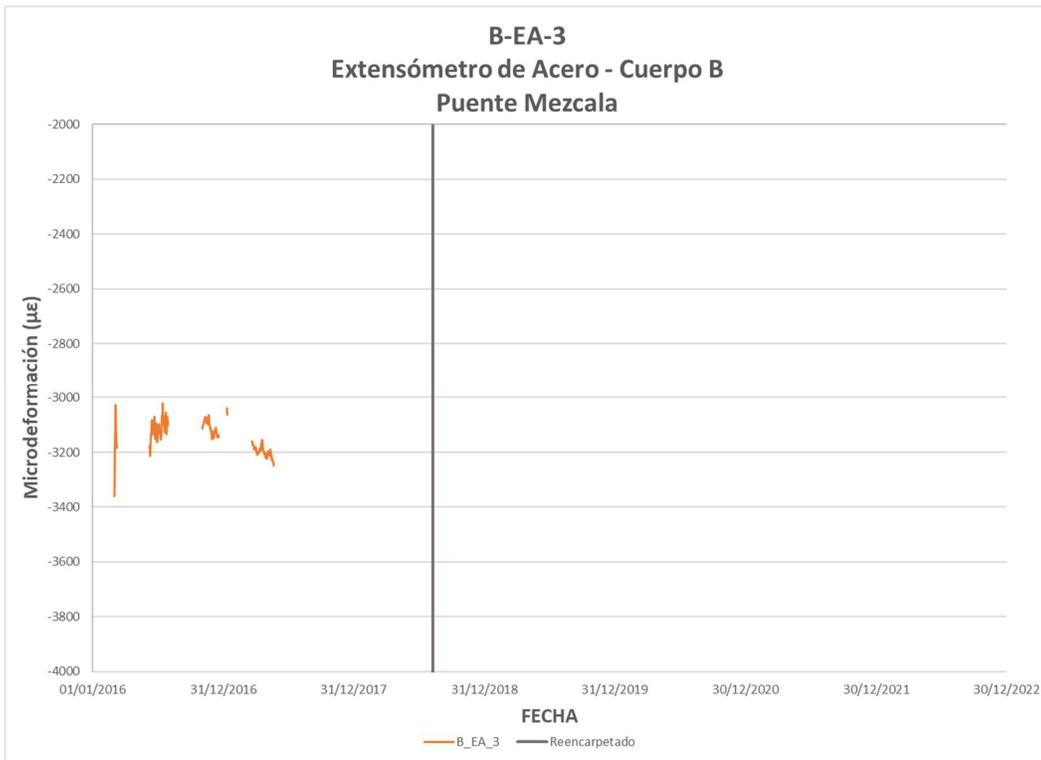


Figura 3.62 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-3

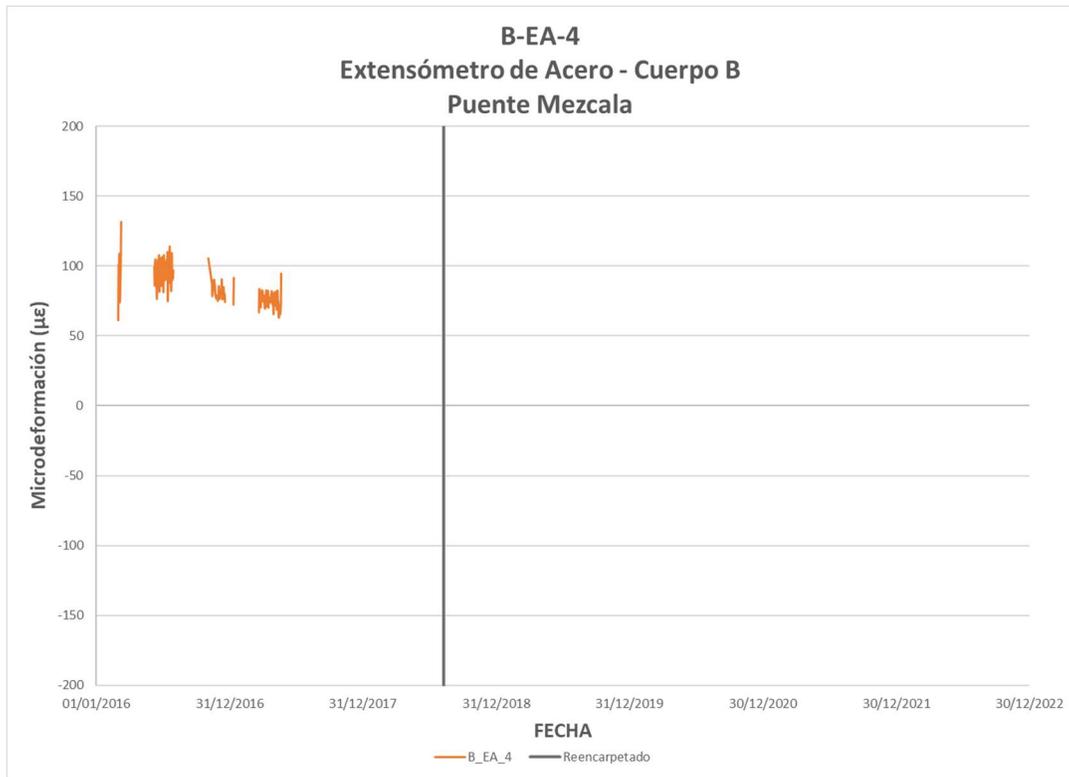


Figura 3.63 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-4

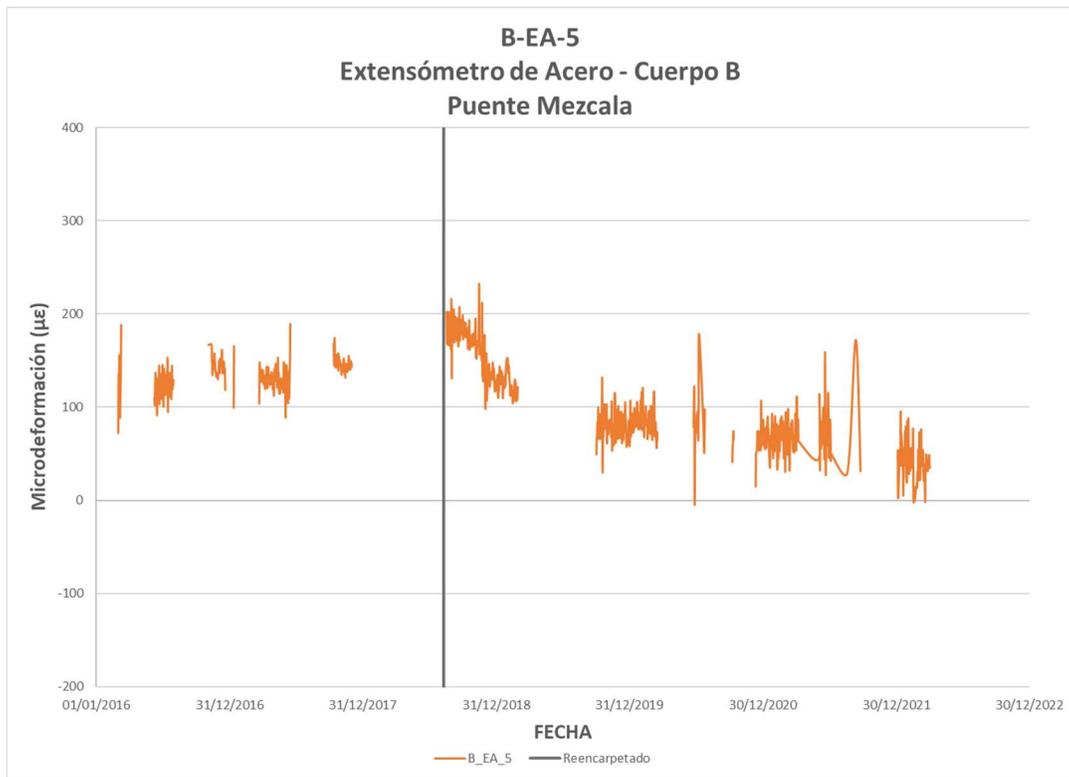


Figura 3.64 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-5

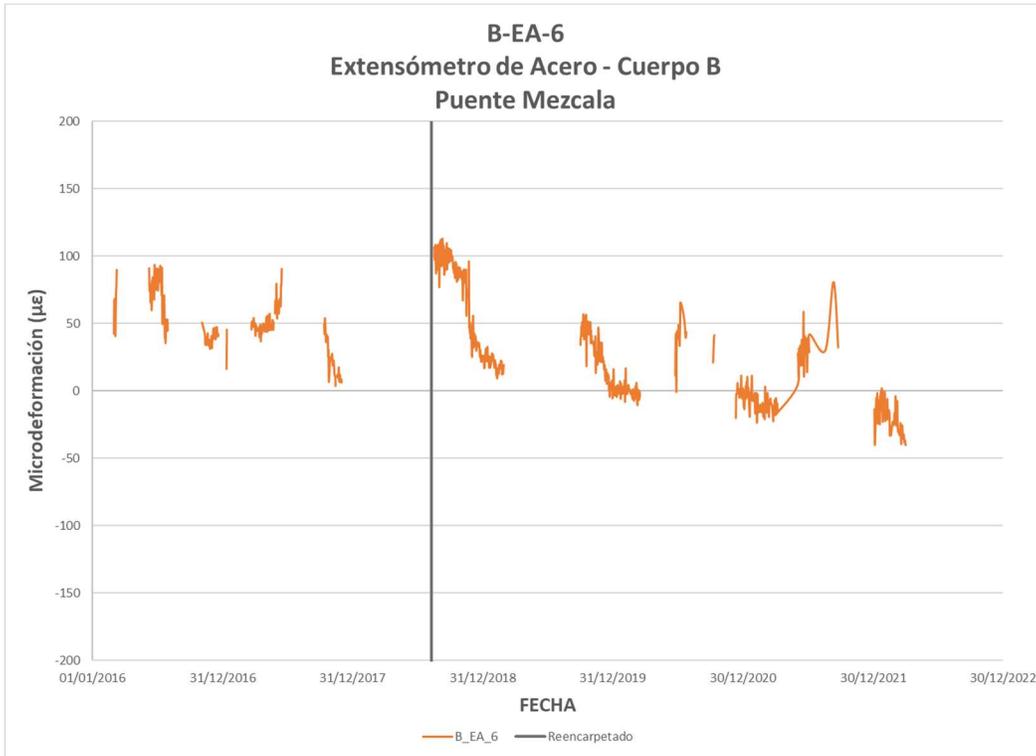


Figura 3.65 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-6

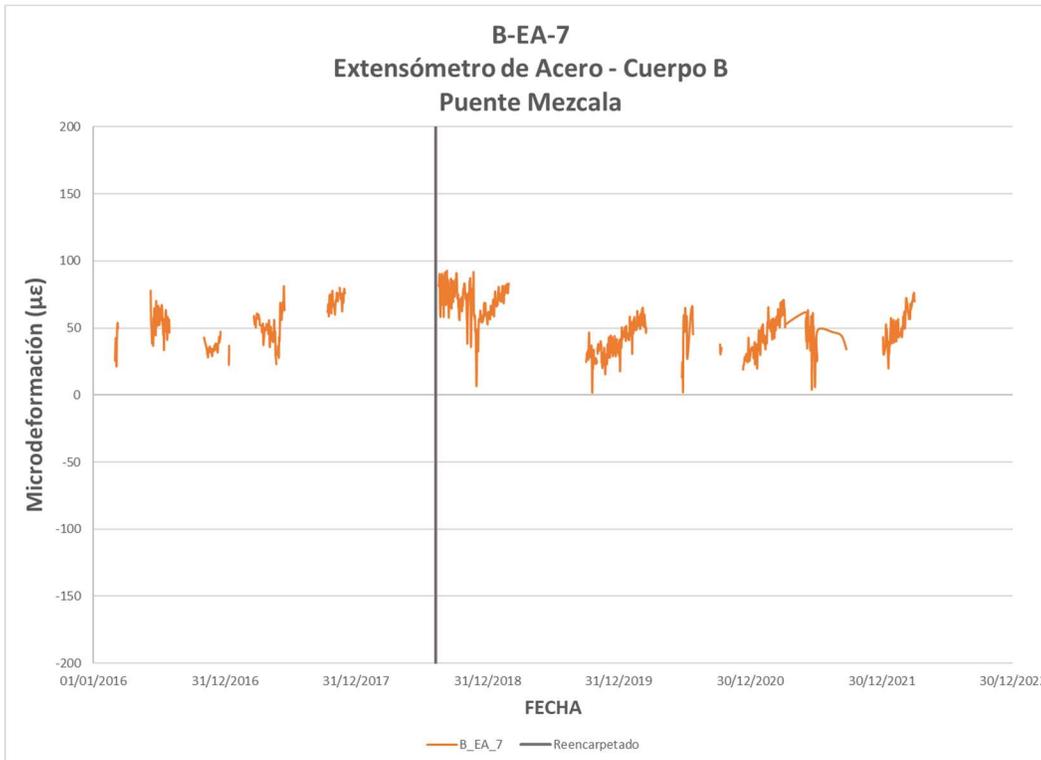


Figura 3.66 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-7

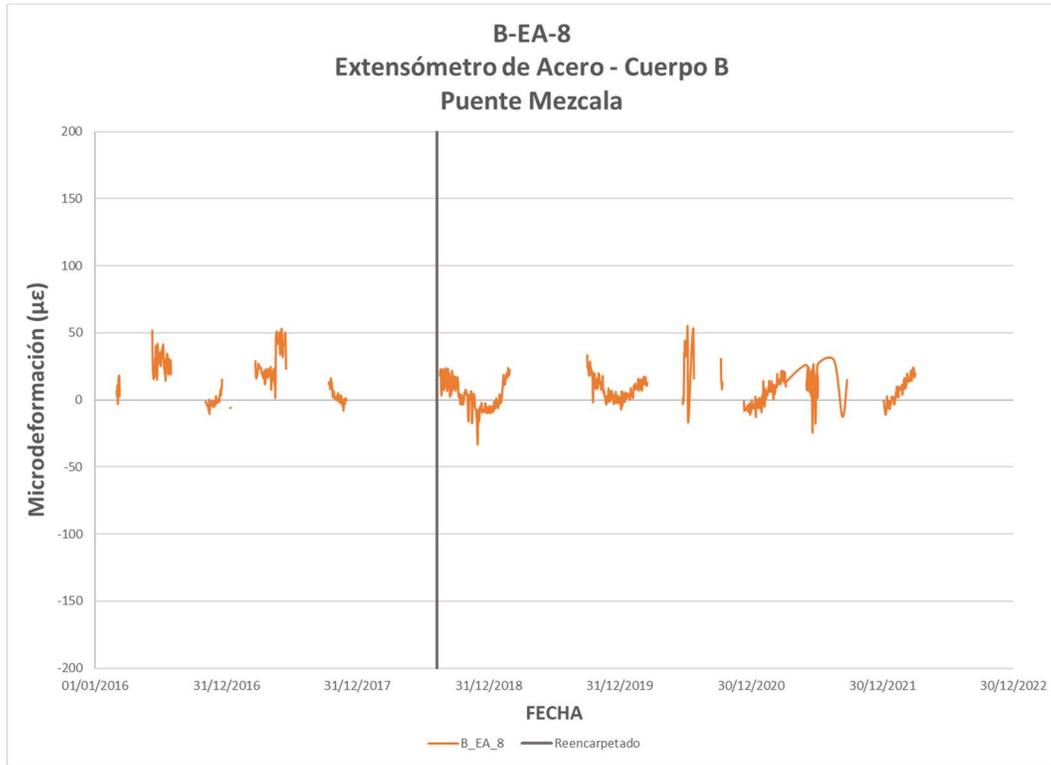


Figura 3.67 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-8

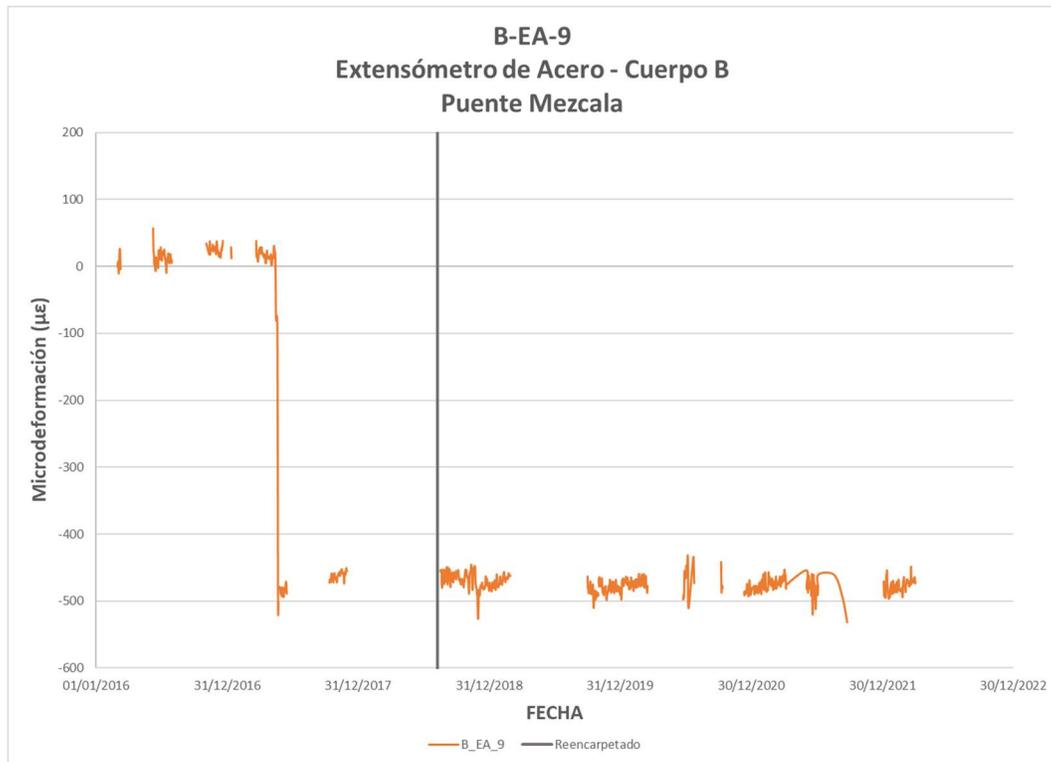


Figura 3.68 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-9

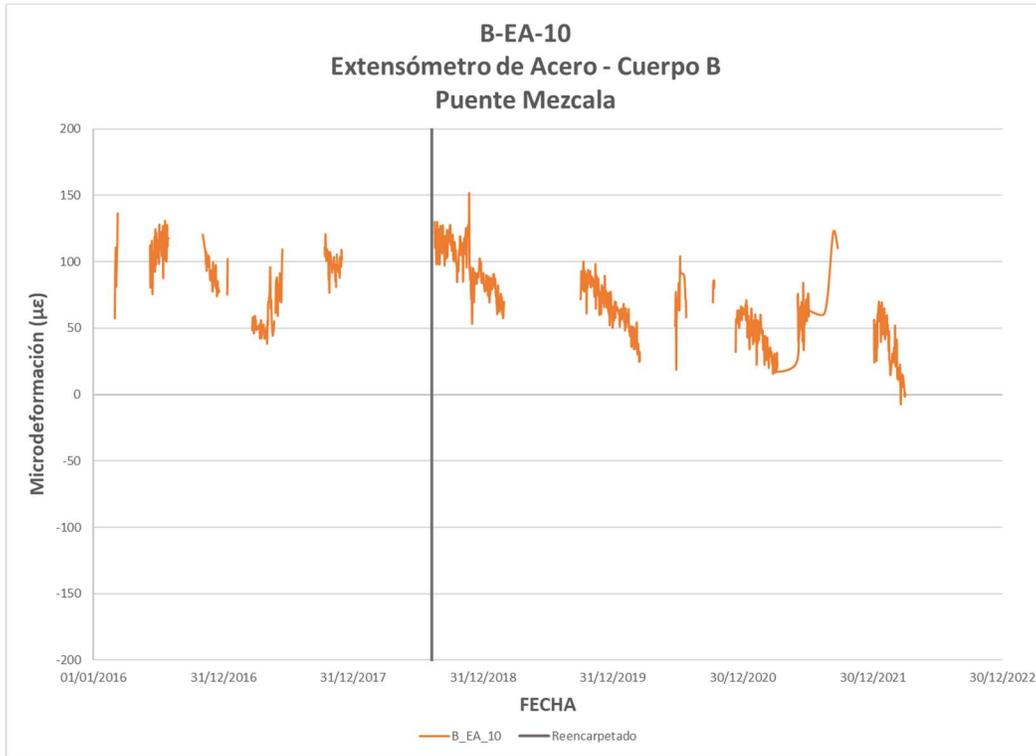


Figura 3.69 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-10

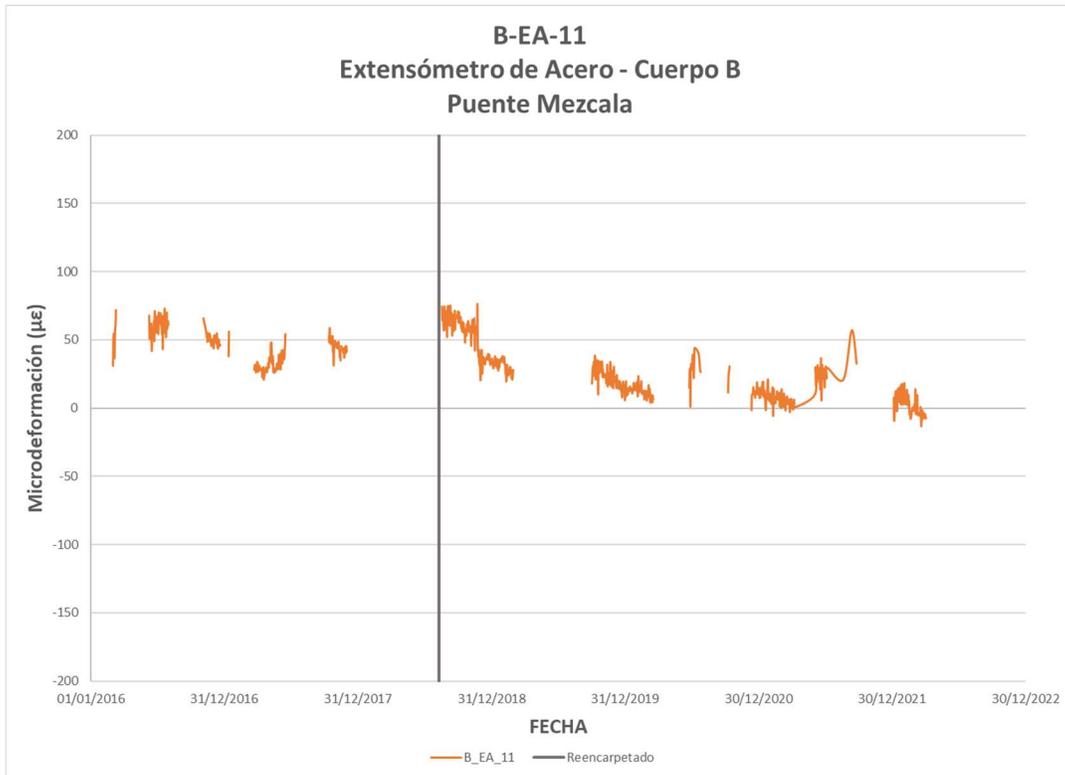


Figura 3.70 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-11

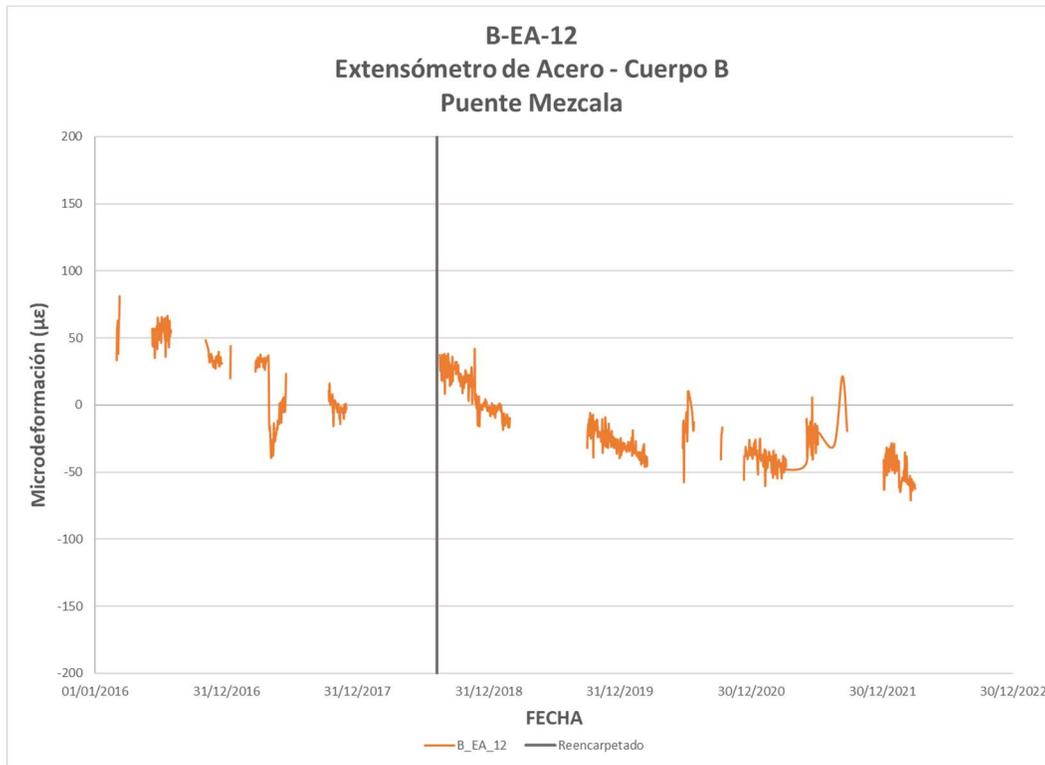


Figura 3.71 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-12

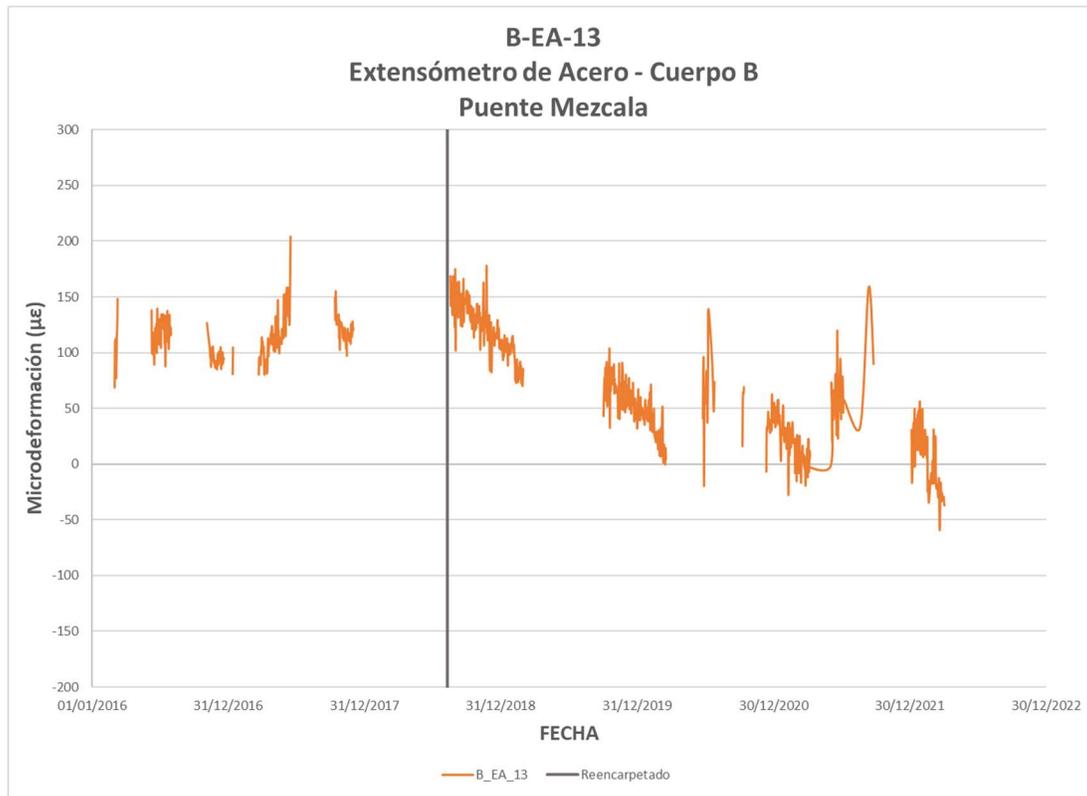


Figura 3.72 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-13



Figura 3.73 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-14

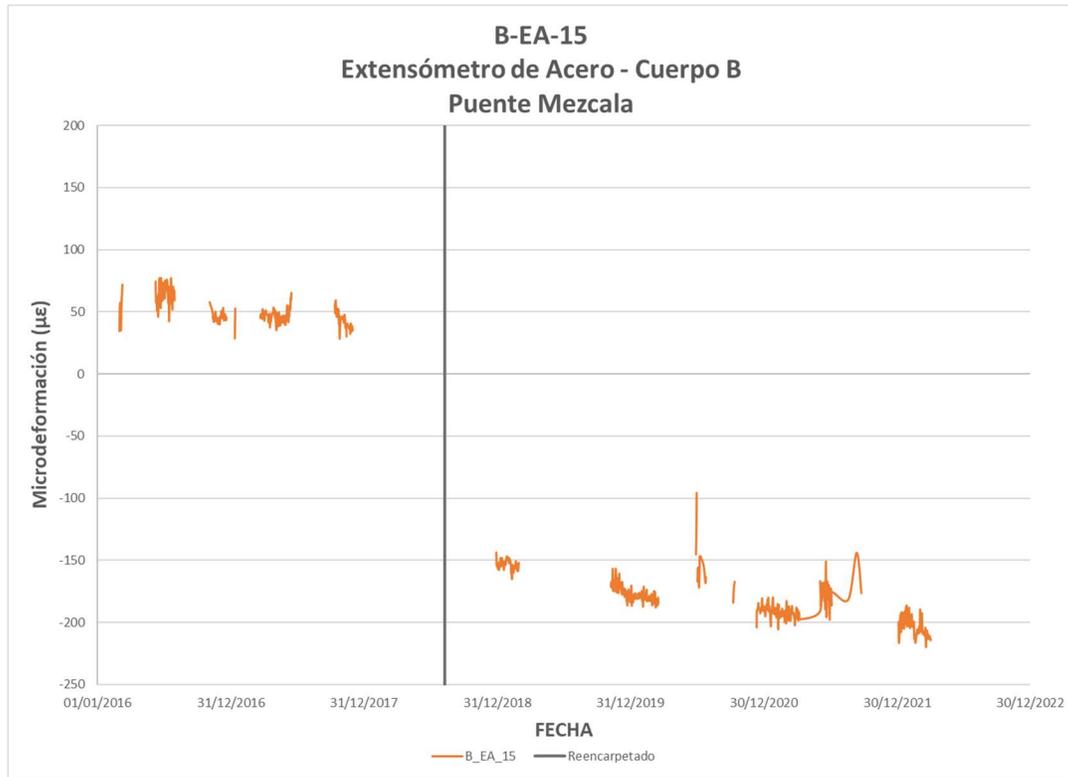


Figura 3.74 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-15

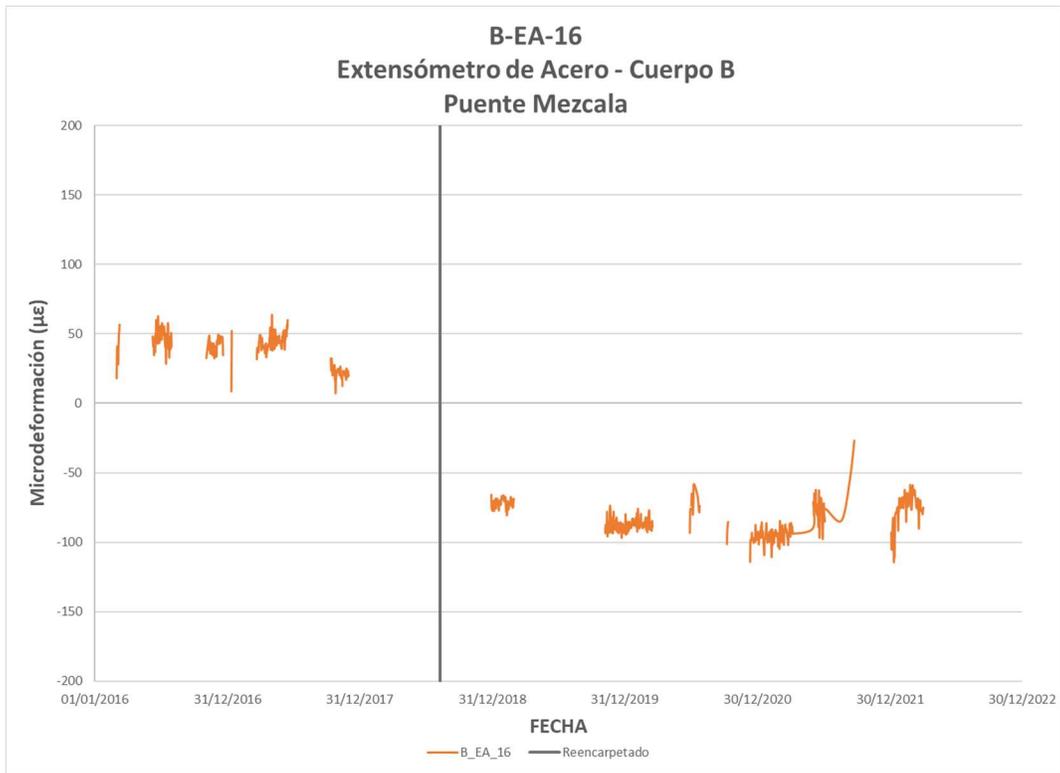


Figura 3.75 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-16

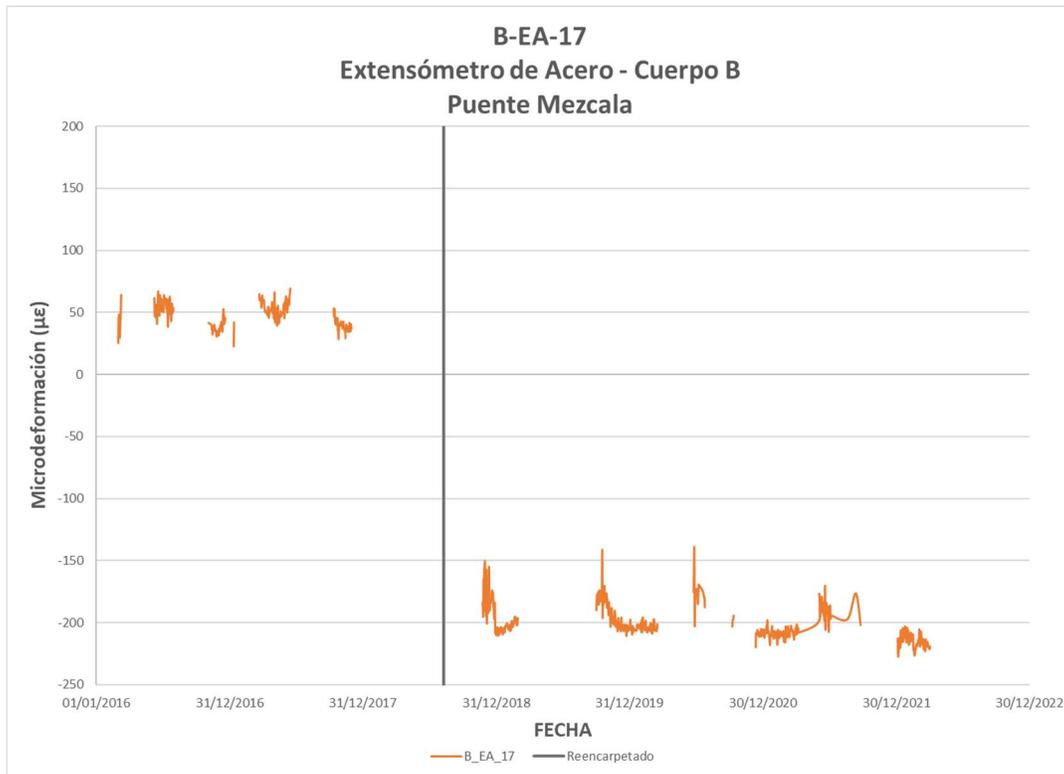


Figura 3.76 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-17

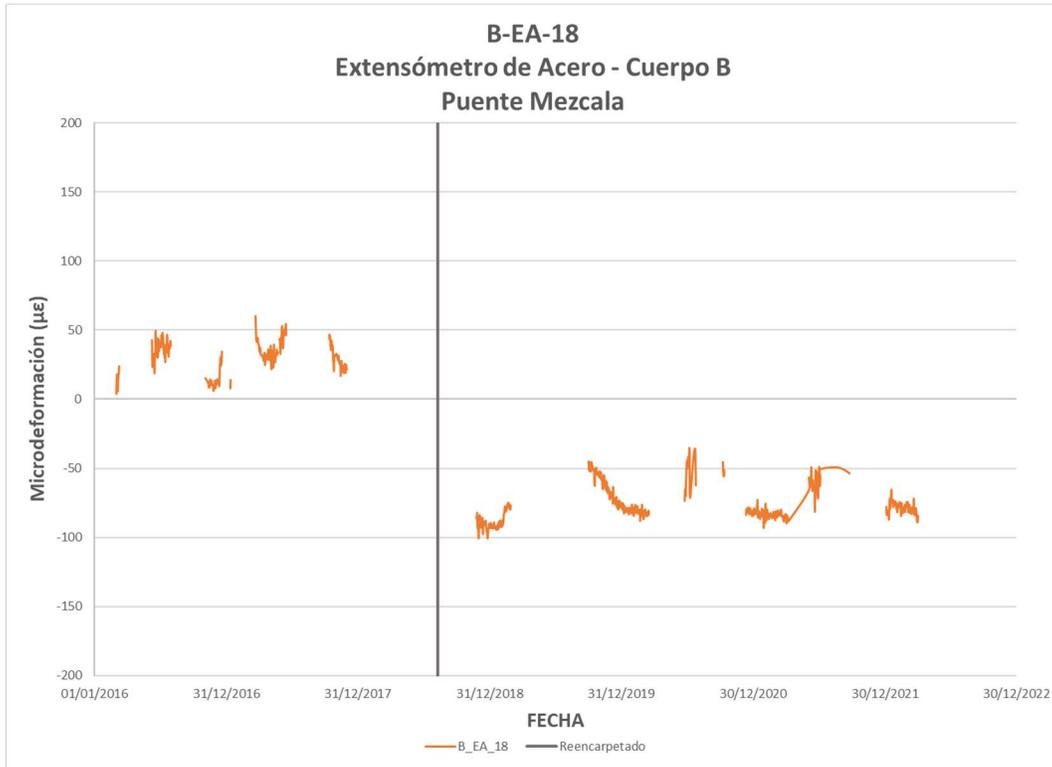


Figura 3.77 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-18

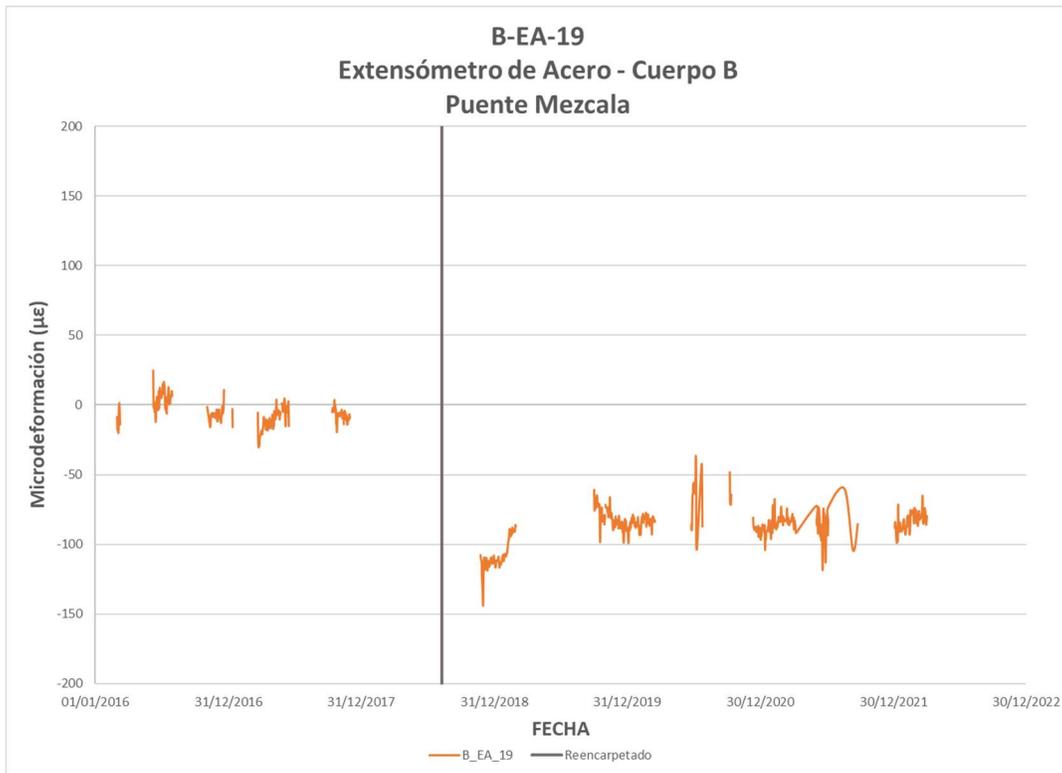


Figura 3.78 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-19

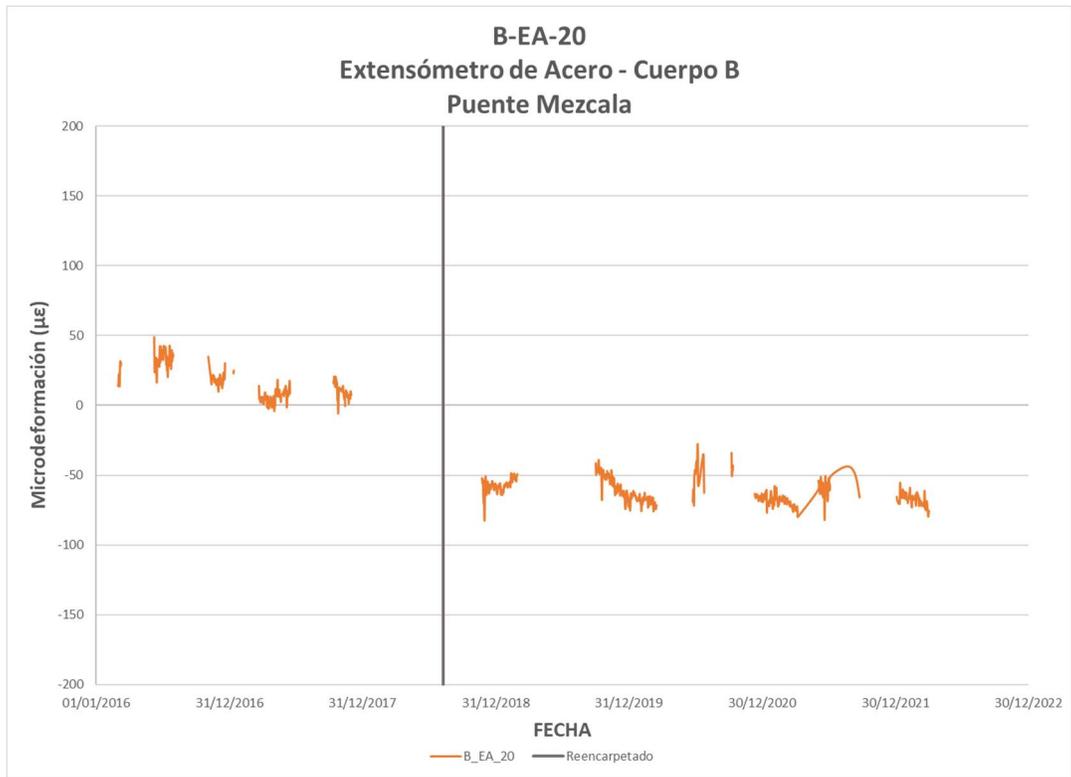


Figura 3.79 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-20

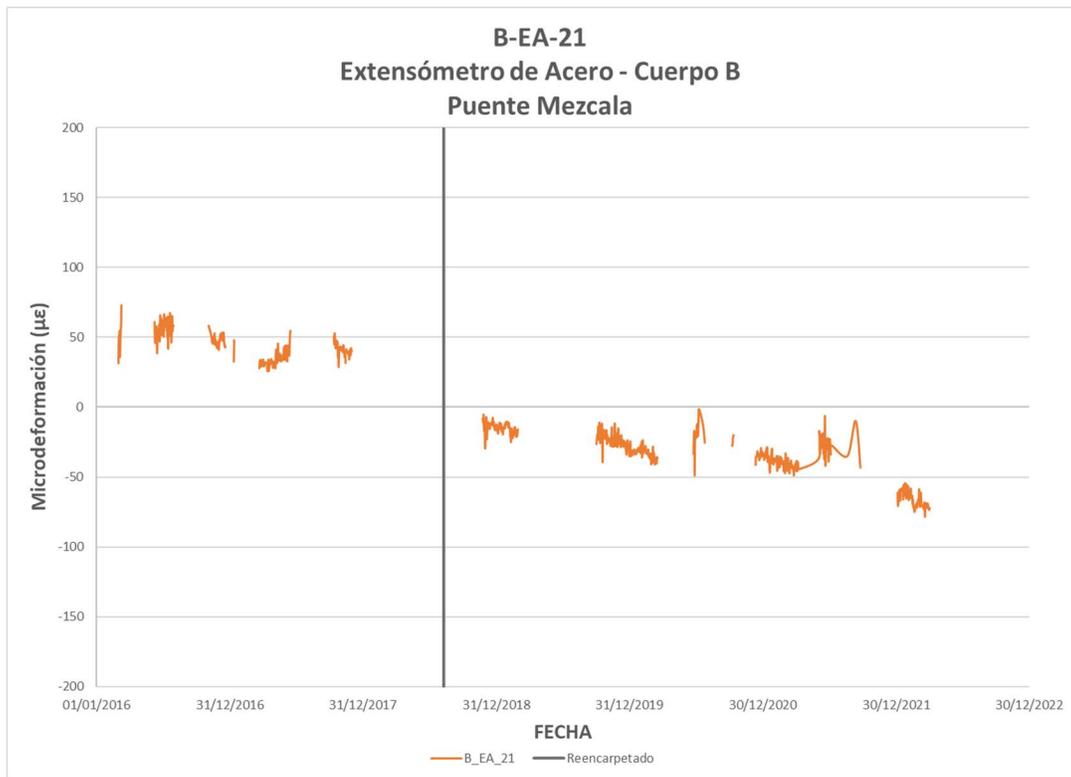


Figura 3.80 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-21

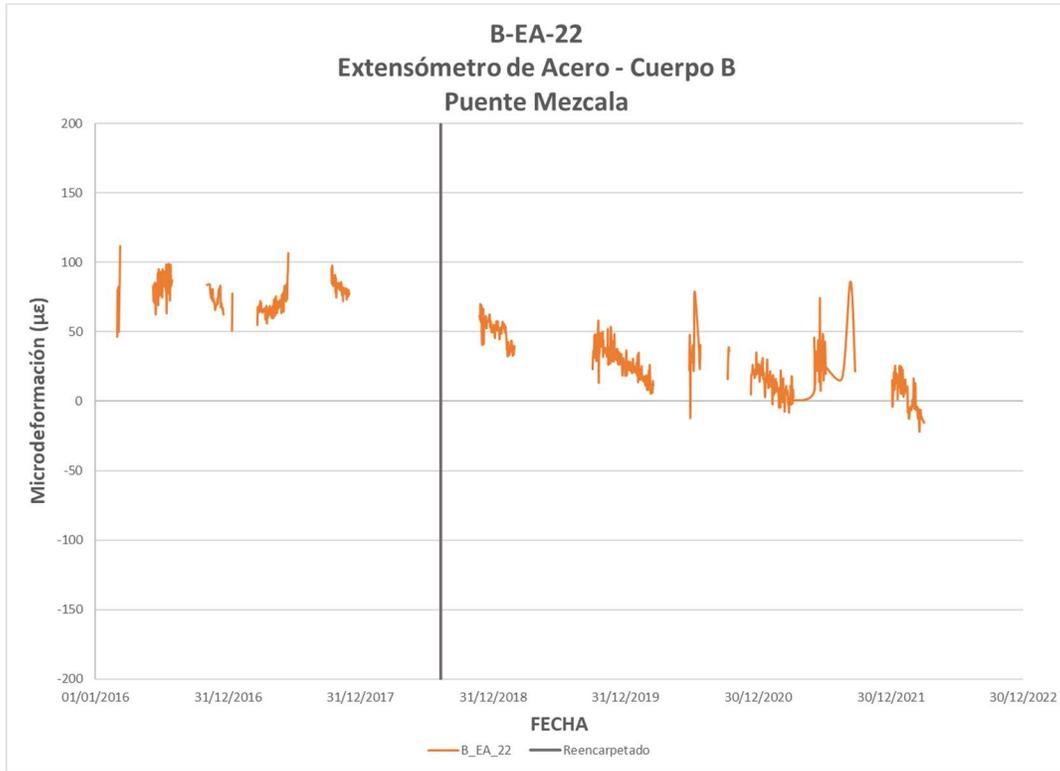


Figura 3.81 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-22

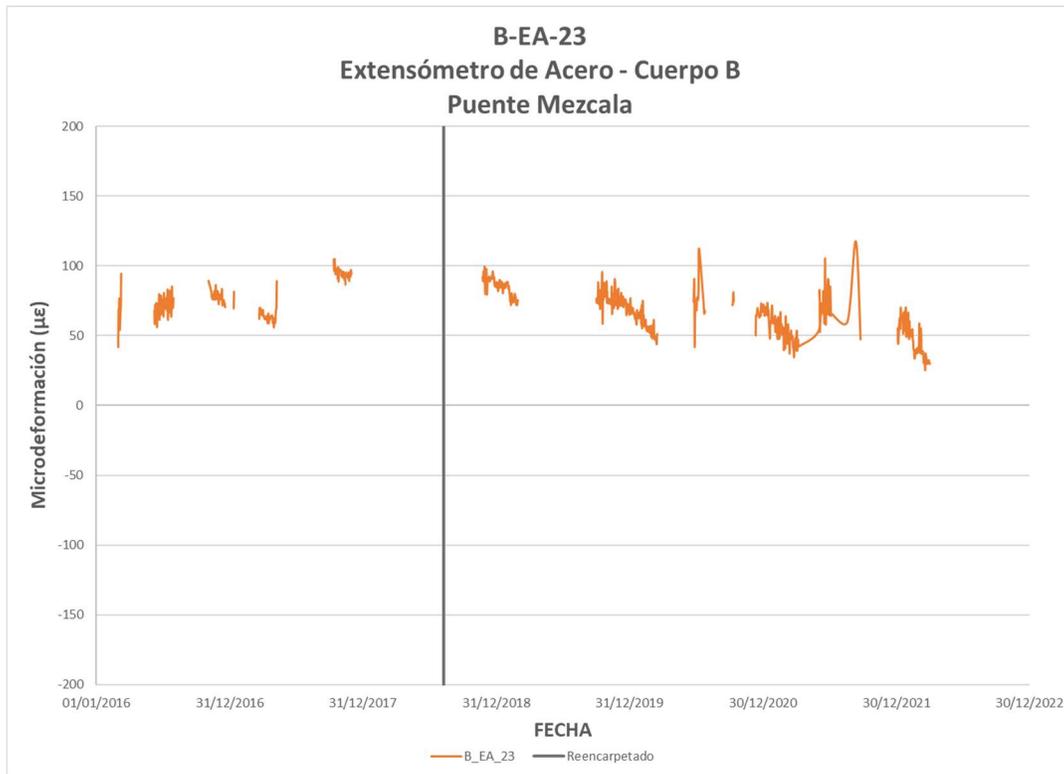


Figura 3.82 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-23

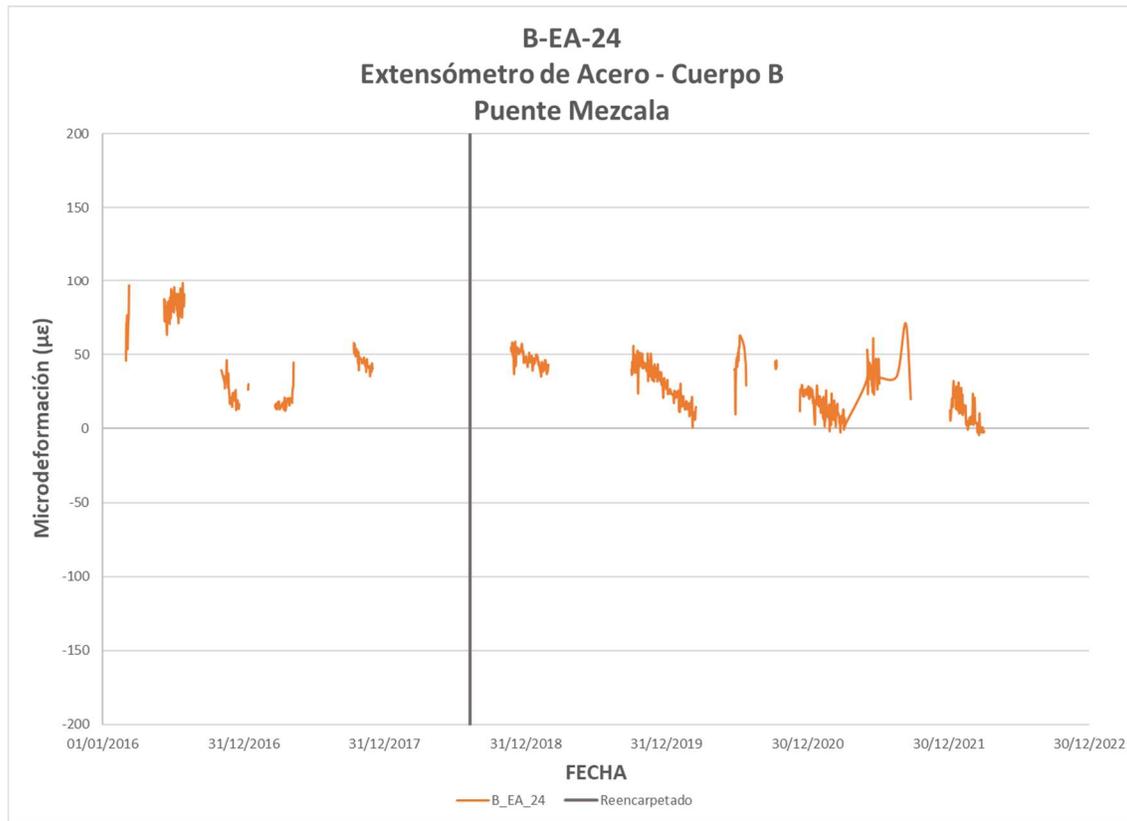


Figura 3.83 Seguimiento de la tendencia del extensómetro B-EA-24

Como se puede apreciar en el seguimiento de la mayoría de los extensómetros, el comportamiento se ha mantenido estable, sin presentar considerables cambios con respecto a los valores iniciales de referencia. Sin embargo, algunos sensores, en particular, los extensómetros A-EA-6A-EA-11, B-EA-9, B-EA-13, B-EA-14, B-EA-15, B-EA-16, B-EA-17, B-EA-18 y B-EA-19 muestran cambios o “escalones” de magnitud considerable.

En lo que respecta al sensor que muestra las mayores magnitudes en las formas modales de vibración del puente, el cual es el sensor B-EA-10, éste muestra un comportamiento muy estable en el tiempo, sin embargo, el sensor contiguo, B-EA-9, si presenta un escalón de deformación, cercano a las 500 micro deformaciones. Lo anterior parece indicar que este escalón no tuvo una repercusión en la forma modal de vibración ya que el sensor B-EA-9 presenta prácticamente las mismas amplitudes que el A-EA-9, el cual es su contraparte aguas abajo, por lo que, se puede concluir que este cambio en la media del sensor posiblemente esté más atribuido a un malfuncionamiento del sensor que a un daño estructural.

Finalmente, se presenta el seguimiento del comportamiento de los sensores de inclinación instalados en el puente Mezcala. En las figuras 3.84 a 3.99 se muestran el monitoreo de los valores de inclinación desde que fueron instalados los sensores. La nomenclatura de los sensores, L o T, hacen referencia a la orientación del puente donde se está midiendo la inclinación, que son longitudinal y transversal respectivamente.

Como se puede observar en el seguimiento, las tendencias de la mayoría de los inclinómetros se mantienen prácticamente constantes o presentan un escalón abrupto y a partir de este se presentan pocas variaciones. El caso más destacado de lo anterior es el que presenta el sensor B-T2-I-L, el cual mide la inclinación en la parte superior de la torre 2, en el sentido longitudinal. El valor del escalón que presentó el sensor es de 0.45 grados, si se realiza un análisis aproximado, tomando en cuenta la altura de la torre 2, la inclinación medida representaría un desplazamiento de 1 metro, el cual sería, visualmente, muy evidente. Basado en lo anterior, podemos concluir que, en este caso, el escalón abrupto en la tendencia del sensor estaría posiblemente atribuido al propio sensor más que al daño o a un desplome de la torre.

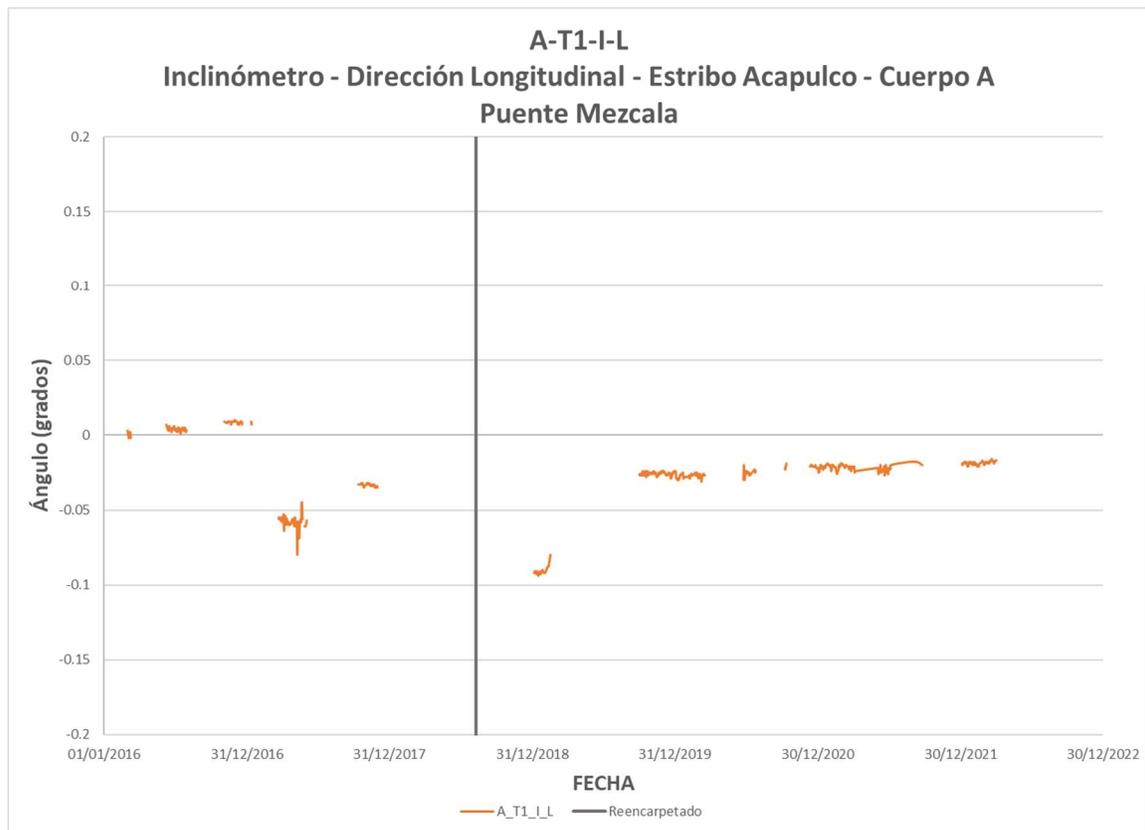


Figura 3.84 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro A-T1-I-L

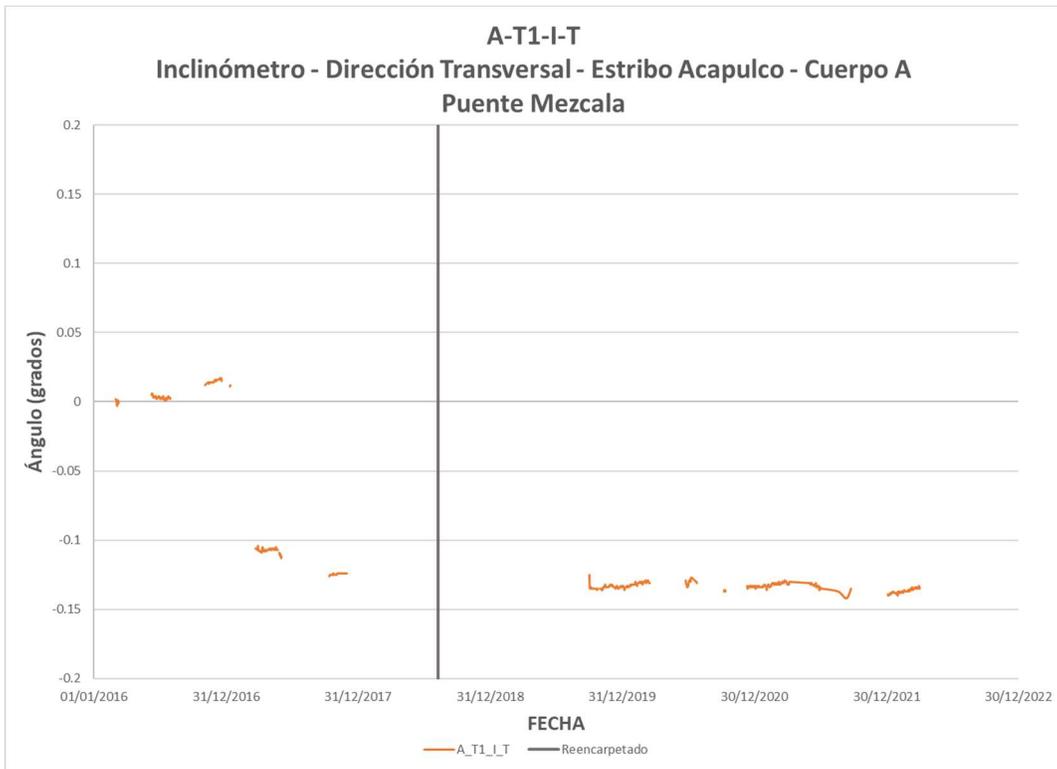


Figura 3.85 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro A-T1-I-T

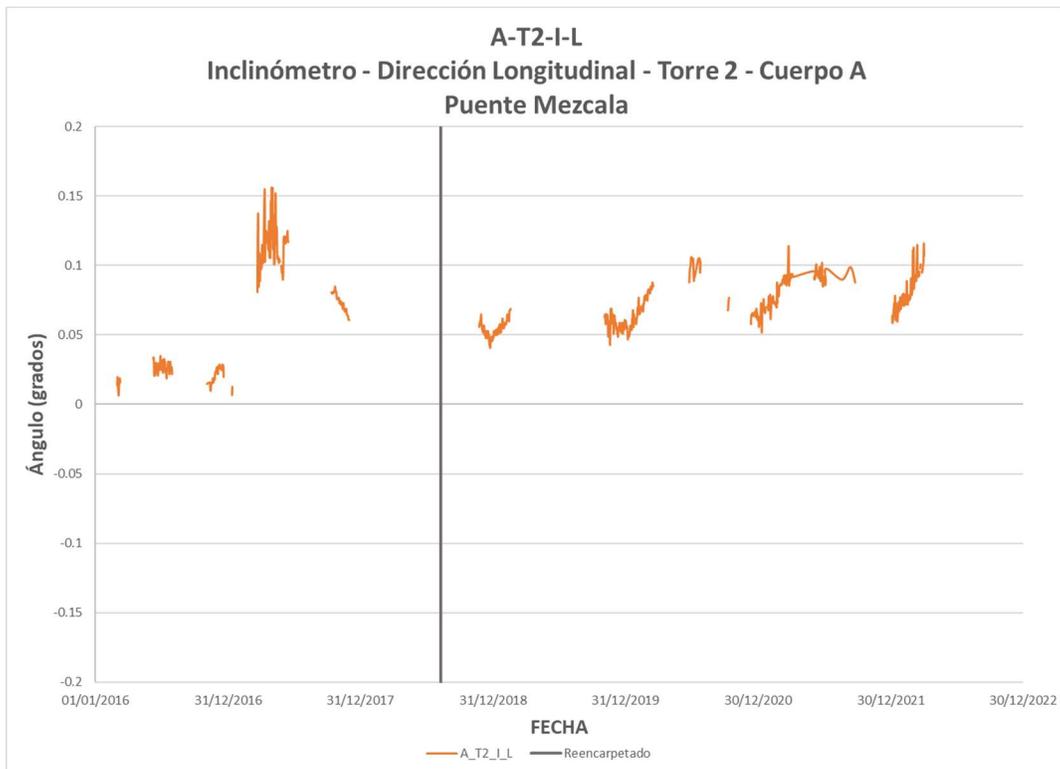


Figura 3.86 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro A-T2-I-L

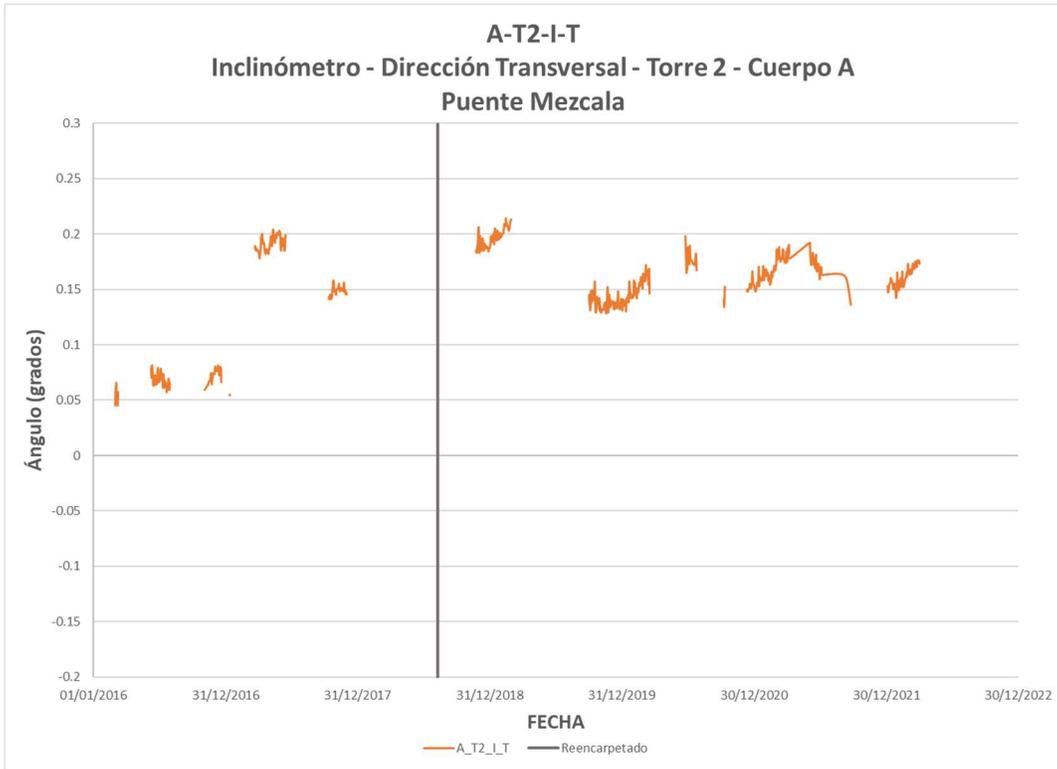


Figura 3.87 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro A-T2-I-T

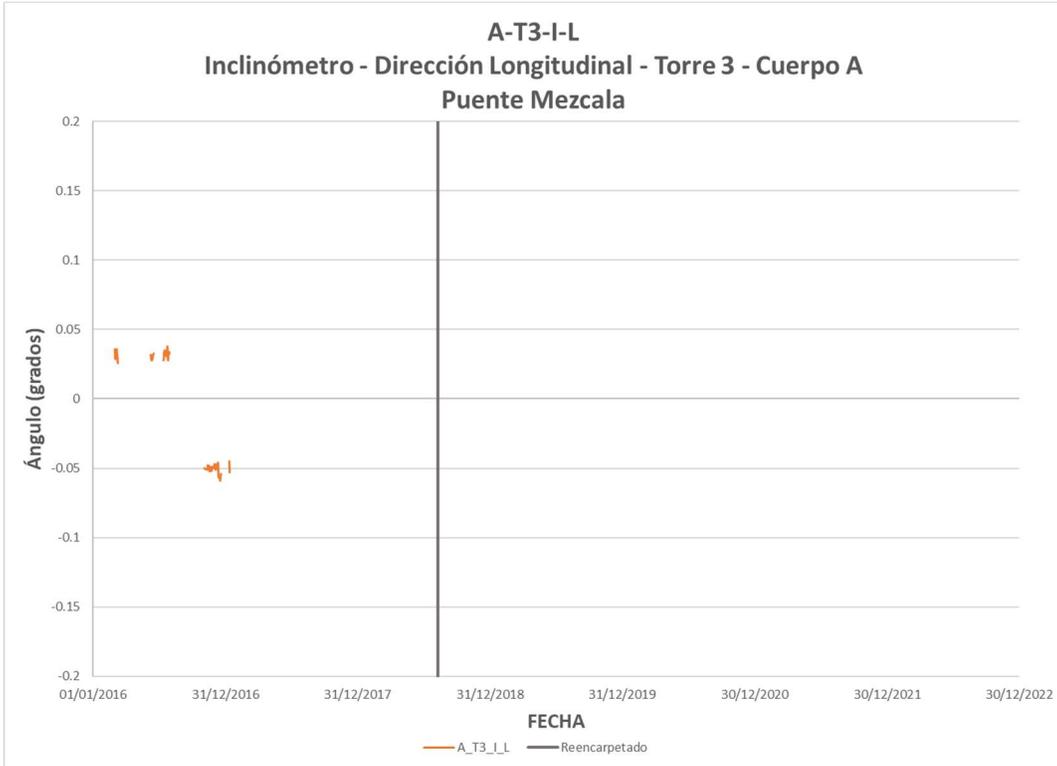


Figura 3.88 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro A-T3-I-L

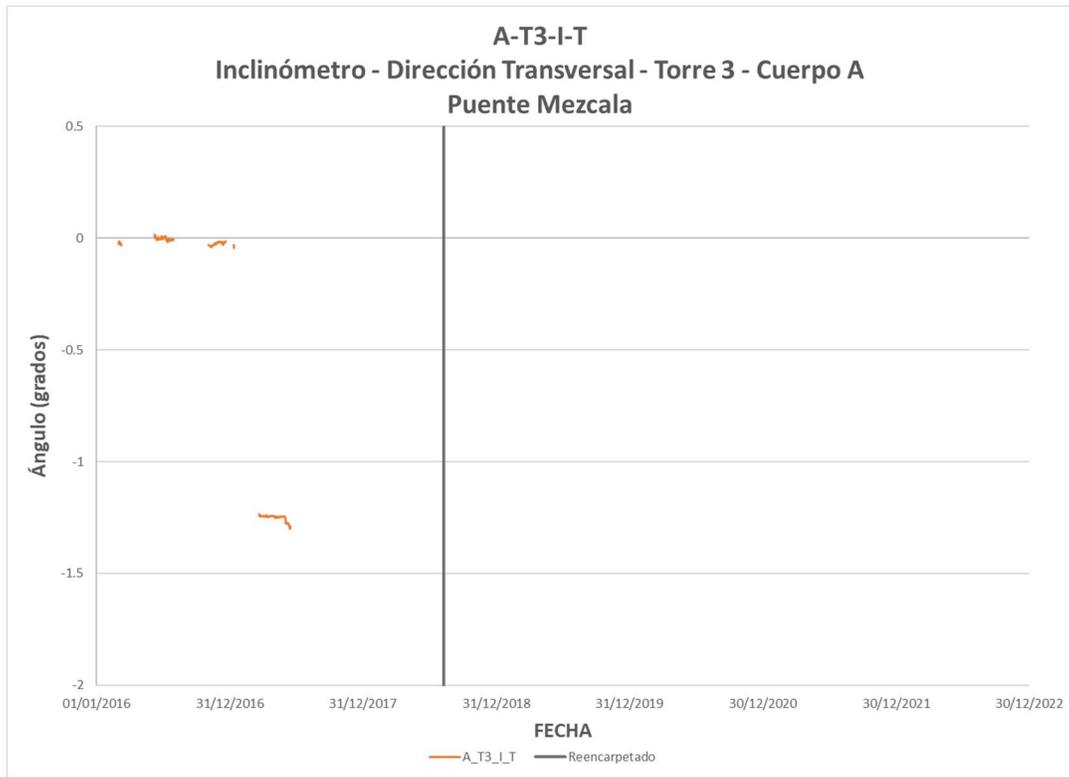


Figura 3.89 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro A-T3-I-T

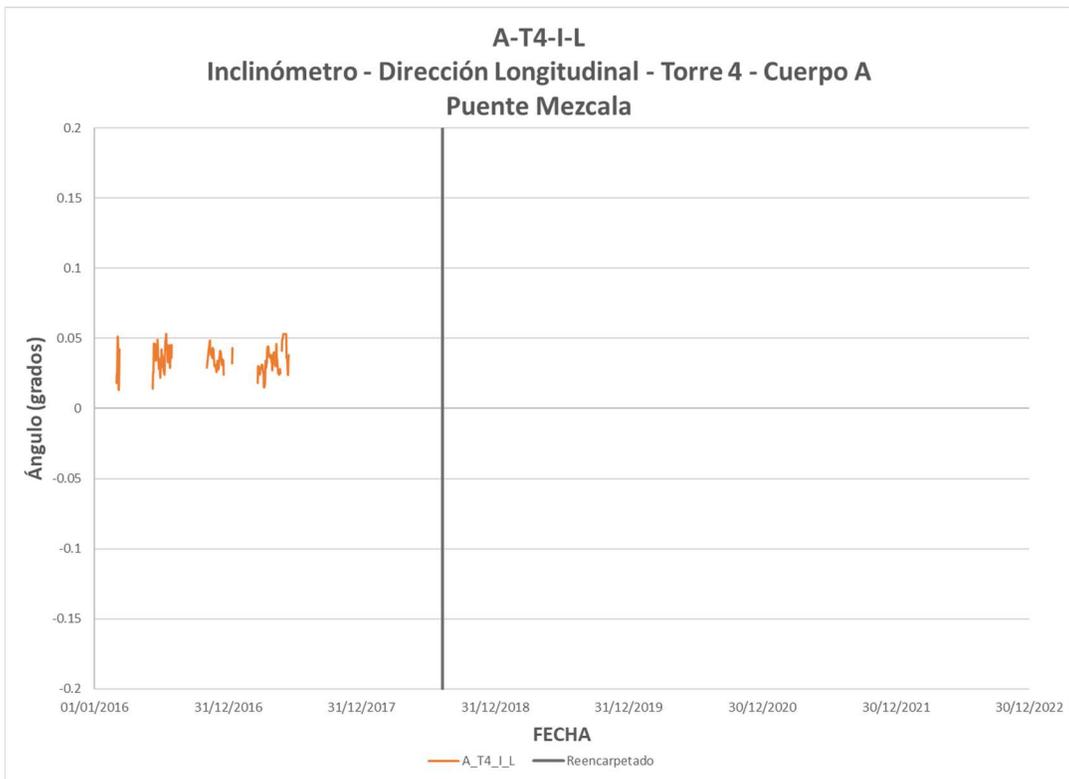


Figura 3.90 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro A-T4-I-L

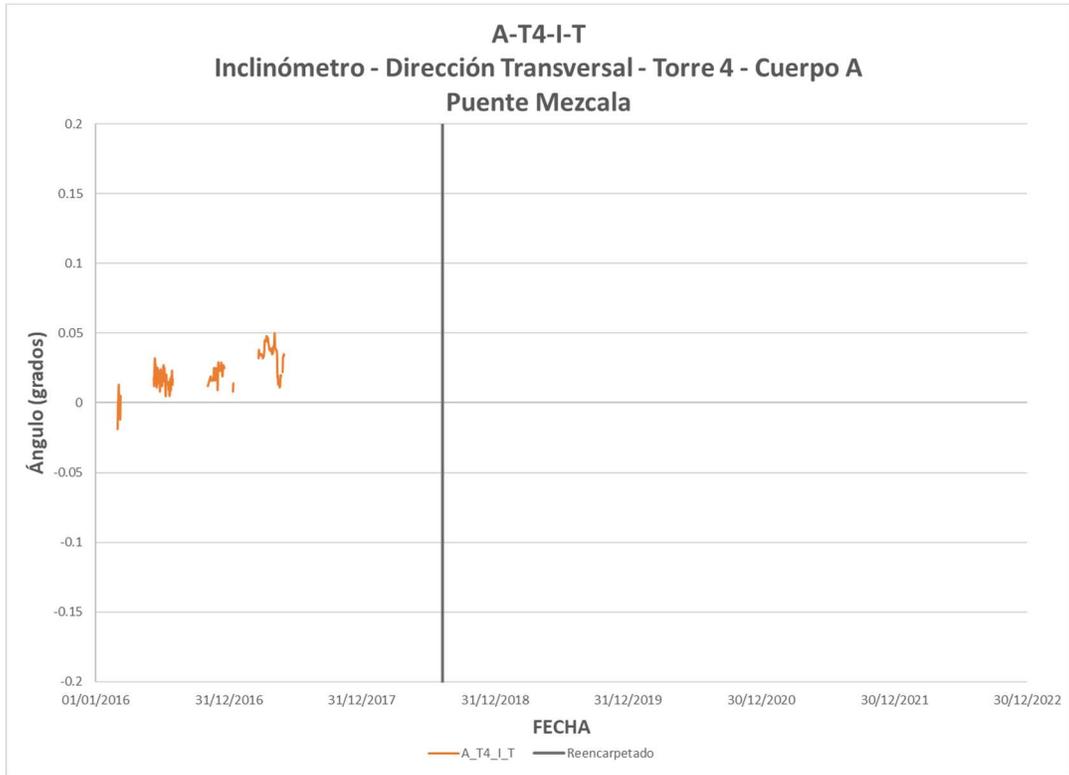


Figura 3.91 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro A-T4-I-T

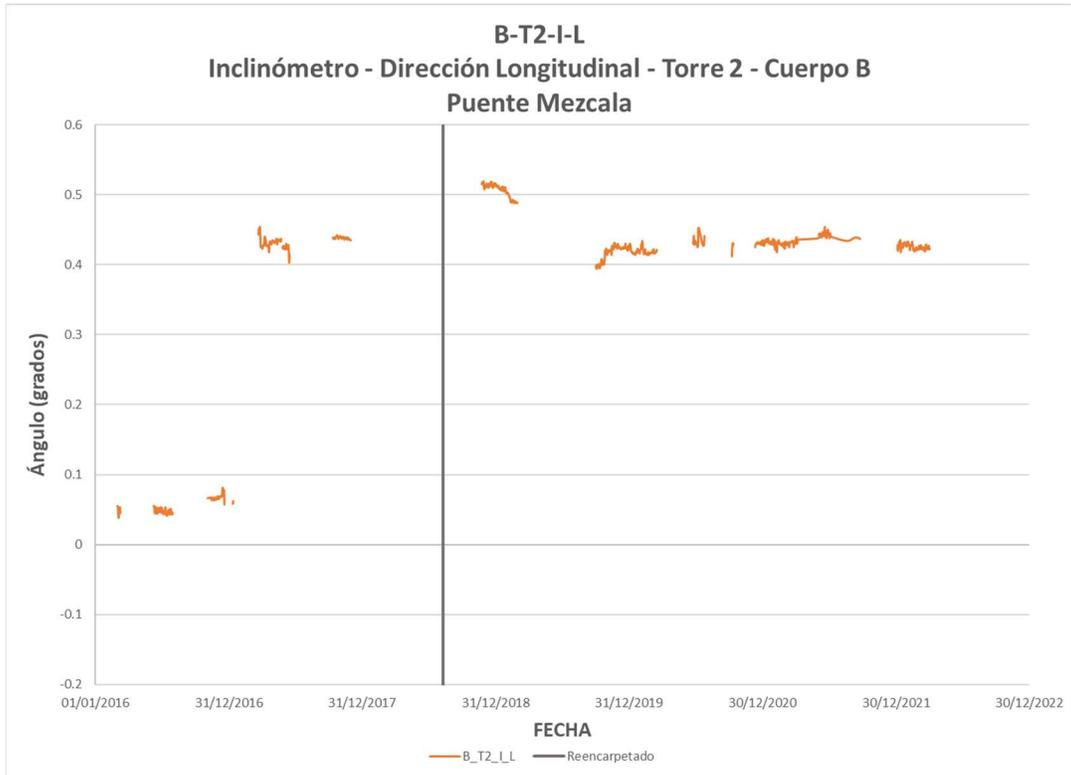


Figura 3.92 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro B-T2-I-L

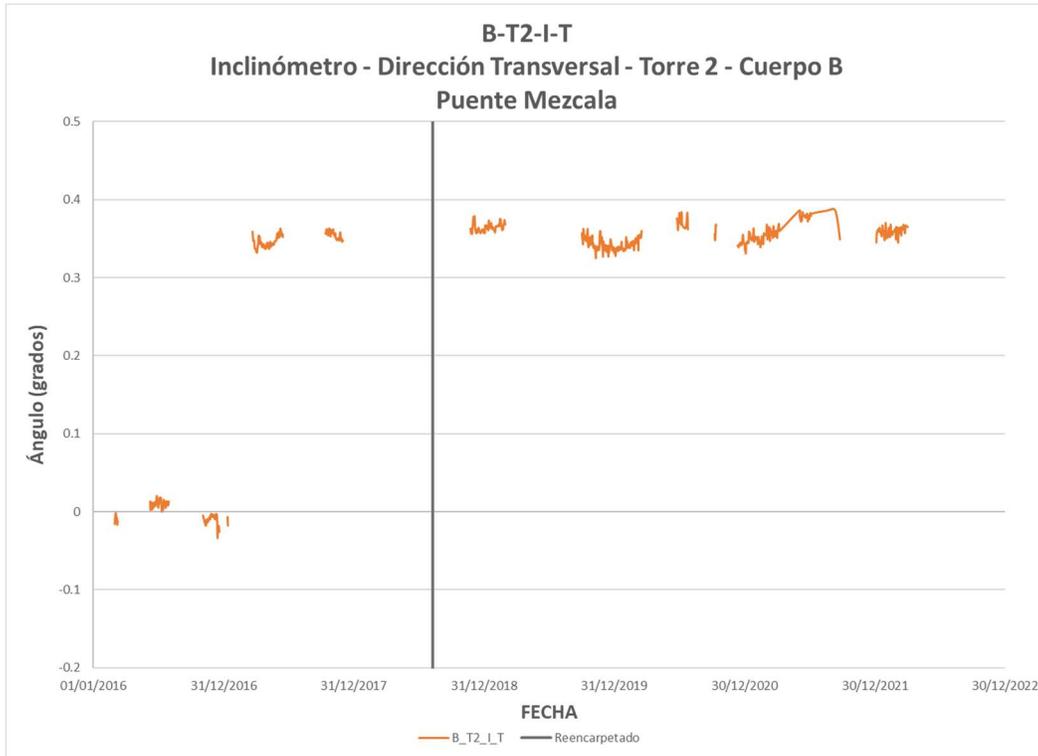


Figura 3.93 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro B-T2-I-T

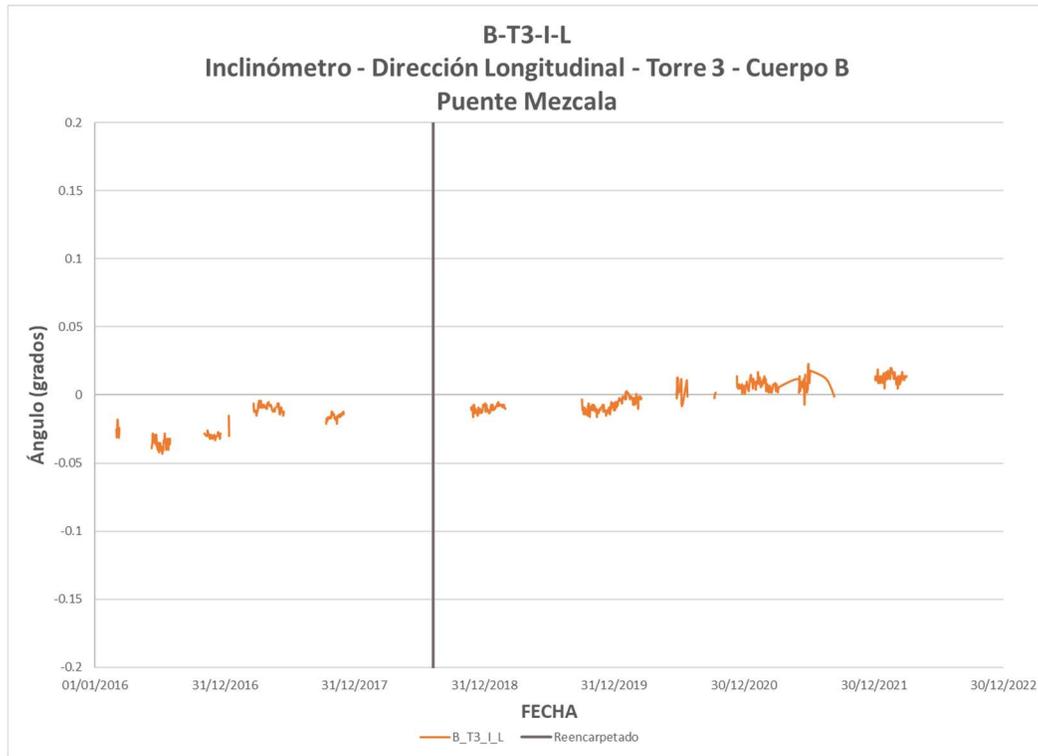


Figura 3.94 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro B-T3-I-L

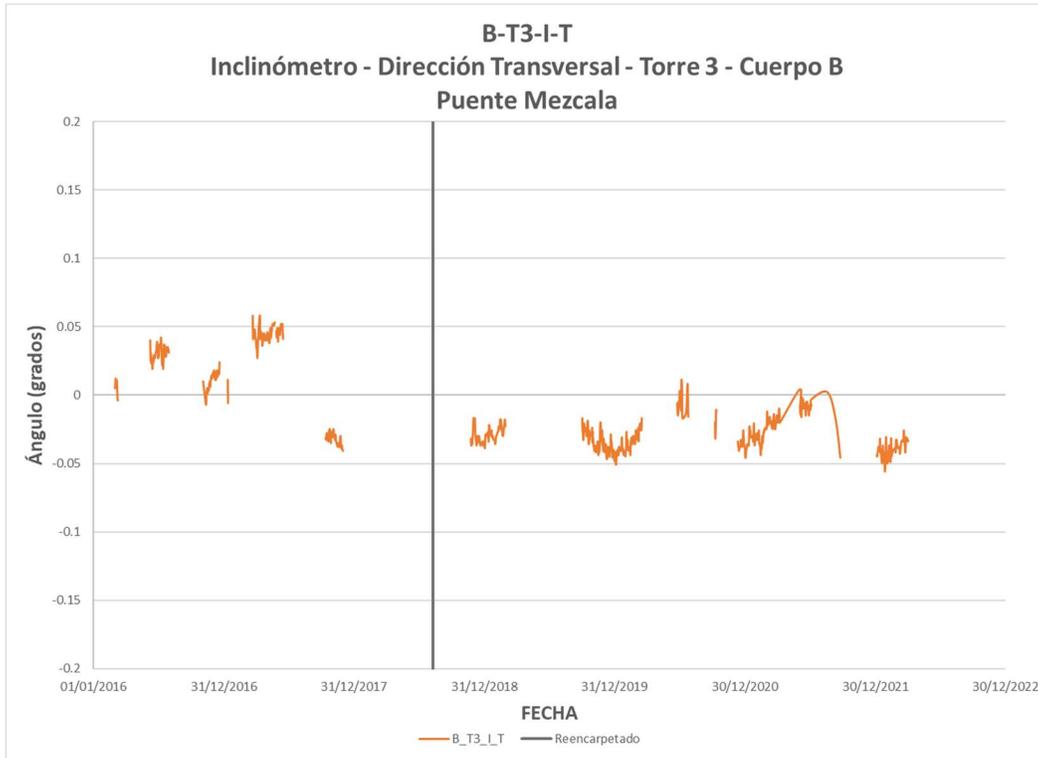


Figura 3.95 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro B-T3-I-T



Figura 3.96 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro B-T4-I-L

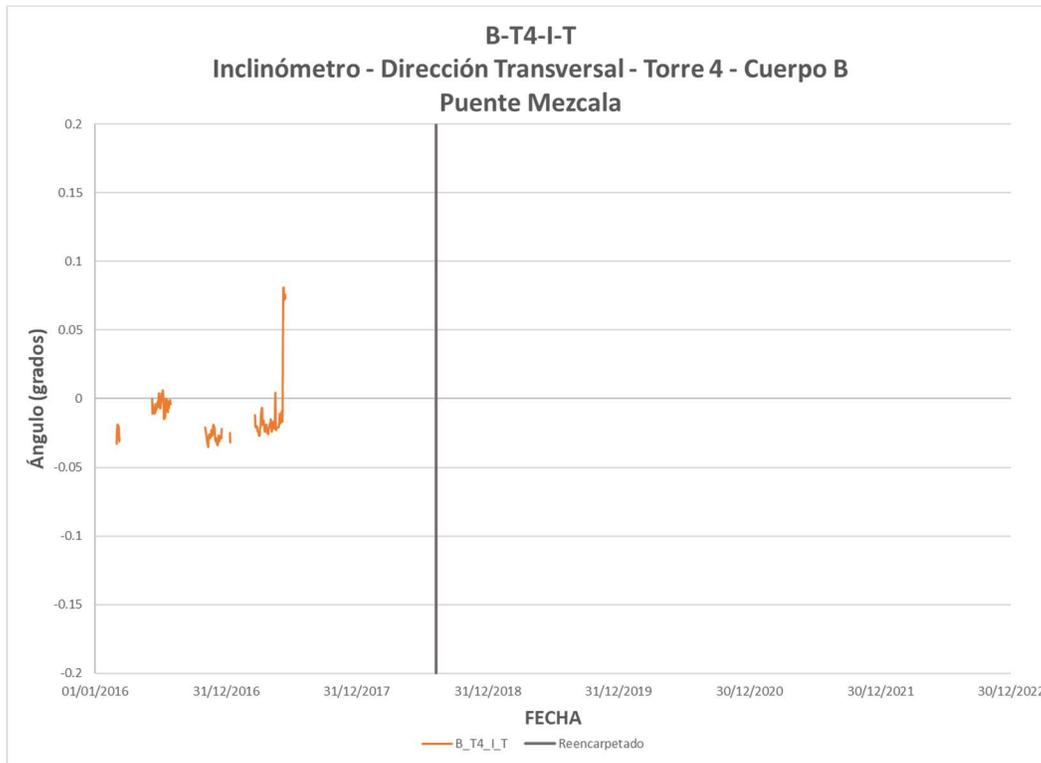


Figura 3.97 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro B-T4-I-T

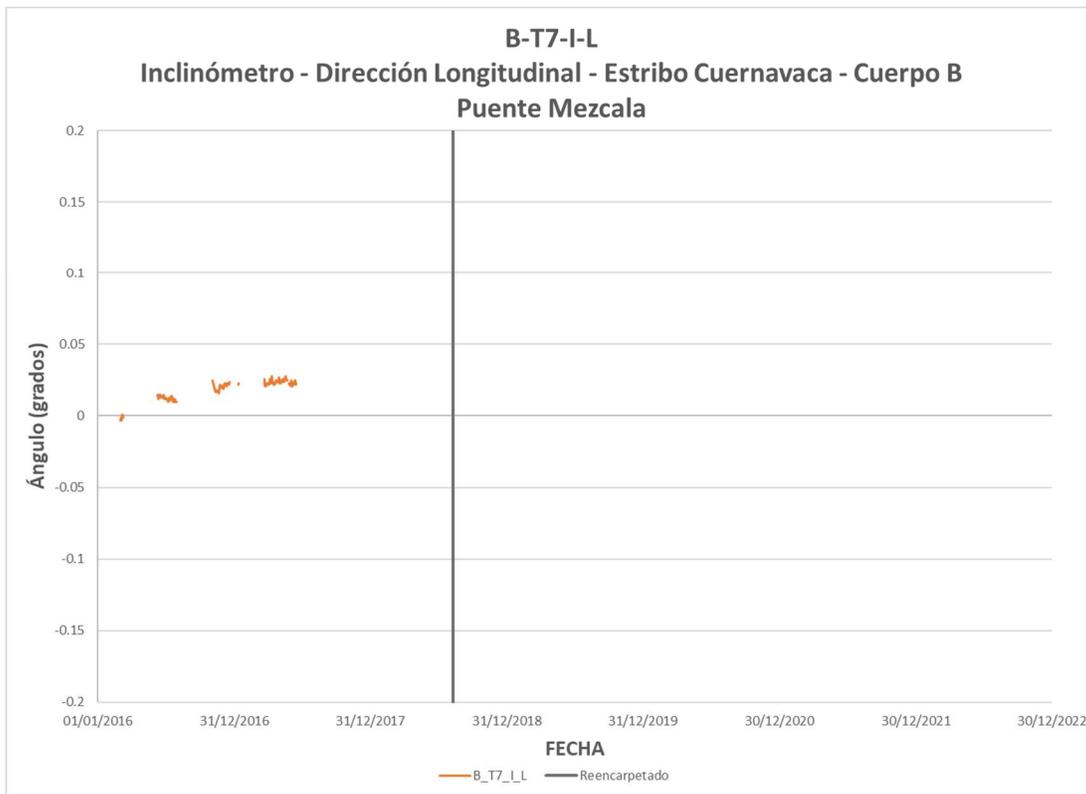


Figura 3.98 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro B-T7-I-L

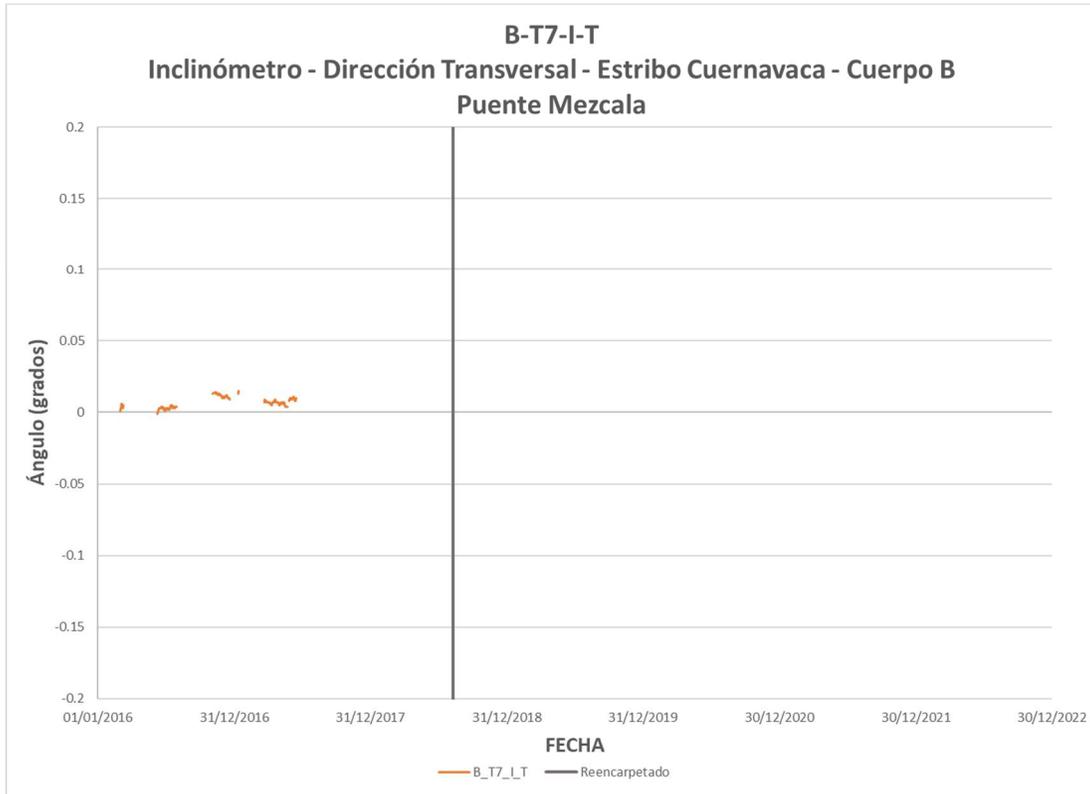


Figura 3.99 Seguimiento de la tendencia del inclinómetro B-T7-I-T

Conclusiones

El monitoreo de la integridad estructural del puente Mezcala durante el año de 2022 se llevó a cabo a partir del análisis de las frecuencias naturales, modos de vibrar y amortiguamiento de la estructura, complementados con información estadística y del modelo calibrado de las tensiones de los tirantes, deformación de cargas vivas bajo condiciones de operación normal, inclinaciones en pilas y niveles de aceleración provocados por sismos y viento.

Del análisis modal realizado mediante la utilización de las señales provenientes del sistema de monitoreo bajo condiciones de vibración ambiental, se monitorearon los valores de las primeras ocho frecuencias naturales del puente Mezcala, las cuales se encuentran en un rango de 0.20 a 1.00 Hz. De los valores obtenidos para el 2022, se encontró que los valores de las frecuencias naturales de los primeros ocho modos no presentaron cambios considerables con respecto a los valores monitoreados anteriormente. Complementariamente se analizaron las variaciones de los modos con frecuencias de 1.00 a 3.00Hz (modos 8 a 20), donde se encontró que, estos presentaron una variación menor al 3%, la cual se puede considerar dentro de los rangos normales de variación. En cuanto al análisis de las formas modales de deformación del puente Mezcala, podemos decir que las amplitudes de los lados aguas arriba y aguas abajo, presentan valores muy similares, excepto para el sensor ubicado al centro del claro 3 (B-EA-10), lado aguas arriba, el cual presenta amplitudes relativamente significativas para la mayoría de las formas modales, por lo cual se programará una inspección visual de la zona para determinar y evaluar si es que existe daño en alguno de los elementos estructurales aledaños al sensor de deformación.

En lo que respecta al análisis de las respuestas producto de cargas vivas vehiculares, se encontró que, similarmente a las formas modales, las mayores amplitudes se presentan en la zona del sensor B-EA-10.

Por último, del análisis de las tendencias de los sensores, se encontró que la mayoría de los extensómetros e inclinómetros presentan un comportamiento prácticamente constante en el tiempo.

Bibliografía

- Anaya, M., Quintana, J., Carrión, F., Martínez Trujano, L., Hernández Figueroa, J., Gasca, H., Valenzuela, J., Montes, M. y Hernández Guzmán, A. (2018). *Calibración y ajuste de los parámetros estructurales del modelo matemático del puente Mezcala para evaluación estructural*. (Publicación técnica No. 530). México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF].
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt686.pdf>
- Anaya, M., Carrión, F., Quintana, J., Martínez, L., Machorro, J. (2022). Structural Health Monitoring and modal parameters identification of Mezcala Bridge. *J Civil Eng Environ Sci*. 8(2), 062-067.
<https://dx.doi.org/10.17352/2455-488X.000052>
- Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. (2001). Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Mater. Struct.* 10(2001), 441–445.
- Carrión, F., López, J., Quintana, J. y Guzmán, A. (2007). Nonlinear Assessment of Cable Vibration in a Stayed Bridge. *Experimental Mechanics*, 48(1), 153-161. DOI 10.1007/s11340-007-9077-1
- Cruz, C. & Miranda, E. (2017). Evaluation of Damping Ratios for the Seismic Analysis of Tall Buildings. *Journal of Structural Engineering-ASCE*. 143(1), 324-336. DOI 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001628.
- James, G. H., Carne, T. G., Lauffer & J. P. (1993). The Natural Excitation Technique (NExT) for modal parameter extraction from operating wind turbines. *The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 10(4), 260-277.
- Li, H., Ren, L., Jia, Z., Yi, T. & Li, D. (2016). State of the art in structural health monitoring of large and complex civil infrastructures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 6(1), 3–16. DOI 10.1007/s13349-015-0108-9
- Peeters, B., De Roeck, G. (1999). Reference-based stochastic subspace identification for output-only modal analysis. *Mech. Systems and Signal Processing*, 13(6), 855–878.
<https://doi.org/10.1006/mssp.1999.1249>



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
San Fandila, Pedro Escobedo
C.P. 76703
Querétaro, México
Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>