



---

# MONITOREO Y EVALUACIÓN ESTRUCTURAL EN TIEMPO REAL DEL PUENTE RÍO PAPALOAPAN

Juan Antonio Quintana Rodríguez  
Francisco Javier Carrión Viramontes  
Luis Álvaro Martínez Trujano  
Jorge Alberto Hernández Figueroa  
Héctor Miguel Gasca Zamora  
Miguel Anaya Díaz  
Jesús Iván Valenzuela Delgado  
Germán Michel Guzmán Acevedo  
Andrés Hernández Guzmán

**Publicación Técnica No. 592**  
**Sanfandila, Qro, 2020**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**

**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Monitoreo y evaluación estructural en tiempo real  
del puente Río Papaloapan**

**Publicación Técnica No. 592  
Sanfandila, Qro, 2020**

---



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por el Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, el Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, el M. en C. Álvaro Martínez Trujano, el Ing. Jorge Alberto Hernández Figueroa, el Lic. Héctor Miguel Gasca Zamora, el M. en C. Miguel Anaya Díaz, el M. en C. Jesús Iván Valenzuela Delgado y el Ing. Andrés Hernández Guzmán

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna EI 03/18 “Monitoreo y evaluación estructural en tiempo real del puente Río Papaloapan”.

Se agradece la colaboración de Dr. Miguel Martínez Madrid, Coordinador de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por la revisión y las facilidades para la realización del presente trabajo.



# Contenido

---

Índice de figuras .....	vii
Índice de tablas .....	xiii
Sinopsis.....	xv
Abstract .....	xvii
Resumen ejecutivo .....	xix
1 Introducción .....	1
2 Sistema de monitoreo puente Río Papaloapan.....	17
3 Seguimiento de los parámetros estructurales del puente Río Papaloapan..	21
4 Conclusiones .....	89
5 Bibliografía .....	91



# Índice de figuras

---

Figura 1.1	Elemento de anclaje del tirante 1, semi-arpa 5 que falló.....	2
Figura 1.2	Sección de fractura del elemento de anclaje del tirante 1, semi-arpa 5. ....	2
Figura 1.3	Registro de los extensómetros bajo la viga principal aguas arriba. ....	3
Figura 1.4	Respuesta del extensómetro al centro de la viga principal aguas arriba. ....	4
Figura 1.5	Respuesta de los inclinómetros en la torre 2 aguas arriba .....	4
Figura 1.6	Tensiones antes y después de la falla en la semi-arpa 5.....	5
Figura 1.7	Tensiones antes y después de la falla en la semi-arpa 6.....	5
Figura 1.8	Puntal de refuerzo temporal en la zona afectada por la falla .....	6
Figura 1.9	Deformaciones medidas por el sensor L2 durante la instalación del puntal.....	7
Figura 1.10	Tensiones en el tirante 2, semi-arpa 5 durante la instalación del puntal.....	7
Figura 1.11	Parámetros característicos de una señal acústica .....	9
Figura 1.12	Prueba de emisiones acústicas según ASTM-F2174 .....	9
Figura 1.13	Prueba de tensión y probeta utilizada para simular condiciones de campo .....	10
Figura 1.14	Secuencia de ciclos de carga y descarga aplicados en la prueba de tensión.....	10
Figura 1.15	Procedimiento de colocación y fijación de sensores .....	11
Figura 1.16	Identificación de respuestas según su origen y zona.....	12
Figura 1.17	Gráfica del índice de severidad, de mayor a menor, para todos los elementos de anclaje.....	13
Figura 1.18	Gráfica del índice de severidad de los elementos de anclaje más críticos.....	14
Figura 2.1	Diagrama de instalación de los sensores de deformación de fibra óptica. ....	18

Figura 2.2	Diagrama de instalación de los sensores de deformación de fibra óptica.....	19
Figura 2.3	Ubicación e identificación de los inclinómetros de fibra óptica....	19
Figura 3.1	Valores de deformación unitaria para el sensor R1 .....	22
Figura 3.2	Valores de deformación unitaria para el sensor R2 .....	22
Figura 3.3	Valores de deformación unitaria para el sensor R3 .....	23
Figura 3.4	Valores de deformación unitaria para el sensor R4 .....	23
Figura 3.5	Valores de deformación unitaria para el sensor R5 .....	24
Figura 3.6	Valores de deformación unitaria para el sensor R6 .....	24
Figura 3.7	Valores de deformación unitaria para el sensor R7 .....	25
Figura 3.8	Valores de deformación unitaria para el sensor R8 .....	25
Figura 3.9	Valores de deformación unitaria para el sensor R9 .....	26
Figura 3.10	Valores de deformación unitaria para el sensor R10 .....	26
Figura 3.11	Valores de deformación unitaria para el sensor R11 .....	27
Figura 3.12	Valores de deformación unitaria para el sensor R12 .....	27
Figura 3.13	Valores de deformación unitaria para el sensor L1 .....	28
Figura 3.14	Valores de deformación unitaria para el sensor L2.....	28
Figura 3.15	Valores de deformación unitaria para el sensor L3.....	29
Figura 3.16	Valores de deformación unitaria para el sensor L4.....	29
Figura 3.17	Valores de deformación unitaria para el sensor L5.....	30
Figura 3.18	Valores de deformación unitaria para el sensor L6.....	30
Figura 3.19	Valores de deformación unitaria para el sensor L7.....	31
Figura 3.20	Valores de deformación unitaria para el sensor L8.....	31
Figura 3.21	Valores de deformación unitaria para el sensor L9.....	32
Figura 3.22	Valores de deformación unitaria para el sensor L10.....	32
Figura 3.23	Valores de deformación unitaria para el sensor L11 .....	33
Figura 3.24	Valores de deformación unitaria para el sensor L12.....	33
Figura 3.25	Valores de inclinación en el plano YZ del sensor R1Y.....	35
Figura 3.26	Valores de inclinación en el plano XZ del sensor R1X.....	35
Figura 3.27	Valores de inclinación en el plano YZ del sensor R2Y.....	36
Figura 3.28	Valores de inclinación en el plano XZ del sensor R2X.....	36
Figura 3.29	Valores de inclinación en el plano YZ del sensor L1Y .....	37
Figura 3.30	Valores de inclinación en el plano XZ del sensor L2X .....	37

---

---

Figura 3.31	Valores de inclinación en el plano YZ del sensor L2Y .....	38
Figura 3.32	Valores de inclinación en el plano XZ del sensor L2X .....	38
Figura 3.33	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 1 .....	40
Figura 3.34	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 1 .....	40
Figura 3.35	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 2 .....	41
Figura 3.36	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 2 .....	41
Figura 3.37	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 3 .....	42
Figura 3.38	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 3 .....	42
Figura 3.39	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 4 .....	43
Figura 3.40	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 4 .....	43
Figura 3.41	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 5 .....	44
Figura 3.42	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 5 .....	44
Figura 3.43	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 6 .....	45
Figura 3.44	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 6 .....	45
Figura 3.45	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 7 .....	46
Figura 3.46	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 7 .....	46
Figura 3.47	Tensión del Tirante 4 de la semi arpa 8 .....	47
Figura 3.48	Tensión del Tirante 11 de la semi arpa 8 .....	47
Figura 3.49	Semi-arpa 1 .....	50
Figura 3.50	Semi-arpa 2 .....	50
Figura 3.51	Semi-arpa 3 .....	51
Figura 3.52	Semi-arpa 4 .....	51
Figura 3.53	Semi-arpa 5 .....	52
Figura 3.54	Semi-arpa 6 .....	52
Figura 3.55	Semi-arpa 7 .....	53
Figura 3.56	Semi-arpa 8 .....	53
Figura 3.57	Media estadística del extensómetro R1 a tensión.....	54
Figura 3.58	Media estadística del extensómetro R1 a compresión.....	55
Figura 3.59	Media estadística del extensómetro R2 a tensión.....	55
Figura 3.60	Media estadística del extensómetro R2 a compresión.....	56
Figura 3.61	Media estadística del extensómetro R3 a tensión.....	56
Figura 3.62	Media estadística del extensómetro R3 a compresión.....	57

---

Figura 3.63	Media estadística del extensómetro R4 a tensión.....	57
Figura 3.64	Media estadística del extensómetro R4 a compresión.....	58
Figura 3.65	Media estadística del extensómetro R5 a tensión.....	58
Figura 3.66	Media estadística del extensómetro R5 a compresión.....	59
Figura 3.67	Media estadística del extensómetro R6 a tensión.....	59
Figura 3.68	Media estadística del extensómetro R6 a compresión.....	60
Figura 3.69	Media estadística del extensómetro R7 a tensión.....	60
Figura 3.70	Media estadística del extensómetro R7 a compresión.....	61
Figura 3.71	Media estadística del extensómetro R8 a tensión.....	61
Figura 3.72	Media estadística del extensómetro R8 a compresión.....	62
Figura 3.73	Media estadística del extensómetro R9 a tensión.....	62
Figura 3.74	Media estadística del extensómetro R9 a compresión.....	63
Figura 3.75	Media estadística del extensómetro R10 a tensión.....	63
Figura 3.76	Media estadística del extensómetro R10 a compresión.....	64
Figura 3.77	Media estadística del extensómetro R11 a tensión.....	64
Figura 3.78	Media estadística del extensómetro R11 a compresión.....	65
Figura 3.79	Media estadística del extensómetro R12 a tensión.....	65
Figura 3.80	Media estadística del extensómetro R12 a compresión.....	66
Figura 3.81	Media estadística del extensómetro L1 a tensión .....	66
Figura 3.82	Media estadística del extensómetro L1 a compresión .....	67
Figura 3.83	Media estadística del extensómetro L2 a tensión .....	67
Figura 3.84	Media estadística del extensómetro L2 a compresión .....	68
Figura 3.85	Media estadística del extensómetro L3 a tensión .....	68
Figura 3.86	Media estadística del extensómetro L3 a compresión .....	69
Figura 3.87	Media estadística del extensómetro L4 a tensión .....	69
Figura 3.88	Media estadística del extensómetro L4 a compresión .....	70
Figura 3.89	Media estadística del extensómetro L5 a tensión .....	70
Figura 3.90	Media estadística del extensómetro L5 a compresión .....	71
Figura 3.91	Media estadística del extensómetro L6 a tensión .....	71
Figura 3.92	Media estadística del extensómetro L6 a compresión .....	72
Figura 3.93	Media estadística del extensómetro L7 a tensión .....	72
Figura 3.94	Media estadística del extensómetro L7 a compresión .....	73

---

Figura 3.95	Media estadística del extensómetro L8 a tensión .....	73
Figura 3.96	Media estadística del extensómetro L8 a compresión .....	74
Figura 3.97	Media estadística del extensómetro L9 a tensión .....	74
Figura 3.98	Media estadística del extensómetro L9 a compresión .....	75
Figura 3.99	Media estadística del extensómetro L10 a tensión .....	75
Figura 3.100	Media estadística del extensómetro L10 a compresión .....	76
Figura 3.101	Media estadística del extensómetro L11 a tensión .....	76
Figura 3.102	Media estadística del extensómetro L11 a compresión .....	77
Figura 3.103	Media estadística del extensómetro L12 a tensión .....	77
Figura 3.104	Media estadística del extensómetro L12 a compresión .....	78
Figura 3.105	Señales dinámicas de deformación producto de vibraciones ambientales.....	79
Figura 3.106	Señal dinámica de un extensómetro producto de vibración ambiental .....	79
Figura 3.107	Espectro de Fourier para la señal de deformación. ....	80
Figura 3.108	Espectro de MUSIC para la señal de deformación. ....	80
Figura 3.109	Forma modal del primer modo de vibración.....	81
Figura 3.110	Forma modal del segundo modo de vibración .....	81
Figura 3.111	Forma modal del tercer modo de vibración.....	82
Figura 3.112	Respuesta dinámica de aceleración con vibración ambiental. ....	82
Figura 3.113	Espectro de Fourier para la respuesta dinámica de aceleración.....	83
Figura 3.114	Espectro de MUSIC de la señal dinámica de aceleración.....	83
Figura 3.115	Forma modal del primero modo. ....	84
Figura 3.116	Forma modal del segundo modo. ....	84
Figura 3.117	Forma modal del tercer modo. ....	85
Figura 3.118	Forma modal del primer modo (Flexión del tablero) .....	85
Figura 3.119	Forma modal del segundo modo (Flexión del tablero) .....	86
Figura 3.120	Forma modal del tercer modo (Torsión del tablero) .....	86



## Índice de tablas

---

Tabla 2.1	Sistema de monitoreo instalado en el puente Río Papaloapan.....	17
Tabla 3.1	Tensión en los tirantes del puente Río Papaloapan finales.....	48
Tabla 3.2	Tensión en los tirantes del puente Río Papaloapan registradas en el mes de diciembre de 2018.....	49
Tabla 3.3	Frecuencias naturales del puente Río Papaloapan.....	87
Tabla 3.4	Frecuencias naturales registradas durante el 2018 .....	87



## Sinopsis

---

El puente Río Papaloapan es uno de los cuatro puentes atirantados que el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CMPEI) del Instituto Mexicano del Transporte tiene monitoreado. El monitoreo y evaluación estructural del Puente Río Papaloapan comenzó desde el año 2013 y derivado de la información obtenida del sistema de monitoreo se ha podido evaluar la condición estructural, ajustar y calibrar modelos matemáticos, establecer estrategias de mantenimiento y de operación bajo condiciones de seguridad, evaluar el mantenimiento realizado, cambiar o modificar procesos de mantenimiento y analizar en corto plazo la integridad de la estructura después de la ocurrencia de fenómenos naturales.

La importancia de tener información actualizada y conocer el desempeño de la estructura en condiciones de operación normal es invaluable, el tiempo de respuesta para evaluar la condición estructural es un factor que se minimiza y permite tener estrategias oportunas y seguras en caso de detección de daño provocado por fenómenos naturales, accidentes y degradación de los elementos estructurales.

En este trabajo se evaluó el desempeño de los parámetros estructurales del Puente Río Papaloapan durante el año 2018. Durante este periodo evaluado comenzó el mantenimiento mayor del Puente Río Papaloapan a partir del mes de agosto de 2018.

**(Palabras clave:** *Monitoreo Estructural, Puentes, Parámetros estructurales*)



# Abstract

---

The Río Papalopan stayed bridge is one of the four cable-stayed bridges that the Intelligent Bridges and Structures Monitoring Center (CMPEI) of the Mexican Transportation Institute has monitored. The bridge has been monitored since 2013, and due to the information provided by monitoring system, has been possible to evaluate its structural integrity, to adjust and to calibrate mathematical models, to establish maintenance and operation strategies with safety conditions, to evaluate preventive maintenance, to change or to modify maintenance processes and to analyze structural integrity after the occurrence of natural phenomena.

The importance of having updated information and knowing the performance of the structure in normal operating conditions is invaluable, the response time for structural evaluation is minimum and allows having timely and safe strategies in case of damage detection caused by natural phenomena, accidents and degradation of structural elements.

In this work it was evaluated the performance of the structural parameters of the Río Papaloapan stayed bridge during the year 2018. During this evaluated period has begun a mayor maintenance in the Rio Papaloapan bridge since August 2018.

**(Key words:** *Structural Health Monitoring, Bridges, Structural parameters*)



## **Resumen ejecutivo**

---

A principios del año 2013 se instrumentó y comenzó la evaluación estructural del Puente Río Papaloapan con el objetivo de garantizar la integridad estructural y la seguridad de los usuarios. Desde el comienzo del monitoreo se han identificado parámetros estructurales, identificado los rangos de operación de cada uno de ellos bajo condiciones de operación normal, se han establecido niveles de alarma y ajustado modelos matemáticos.

La información es analizada y jerarquizada en tres niveles: el primero corresponde al análisis individual de los sensores para determinar su comportamiento estructural mediante un criterio de alarmas; el segundo corresponde al análisis de varios sensores para determinar índices de desempeño; y el tercero corresponde al análisis de la información para aplicar algoritmos de detección de daño y análisis estructural.

Este trabajo presenta resultados de la actualización y seguimiento de los índices de desempeño estructural del puente Río Papaloapan durante el año 2018.



# 1 Introducción

---

El puente Río Papaloapan es de tipo atirantado ubicado en el kilómetro 85 + 980 de la autopista la Tinaja-Acayucan en el estado de Veracruz, México; fue puesto en servicio en el año de 1995, tiene una longitud total de 407 m, con un claro máximo de 206 m y está suspendido por 8 semi-arpas de 14 tirantes cada una de ellas. La importancia de este puente dentro de la red federal carretera de México es primordial, ya que permite el intercambio económico entre el centro y sur del país; además, es una estructura a la cual se le han realizado fuertes inversiones económicas para llevar a cabo estudios y mantenimientos preventivos durante su vida útil debido a un proceso de construcción inadecuado. Lo anterior coloca al Puente Río Papaloapan como una estructura ideal y estratégica para la implementación de un sistema de monitoreo continuo y en tiempo real con la finalidad de garantizar la seguridad de los usuarios y su integridad estructural. Para lograr los objetivos planteados, en diciembre de 2012 se instalaron en el Puente Río Papaloapan, 24 medidores de deformación, 24 acelerómetros, ocho inclinómetros, un sensor de desplazamiento, dos cámaras de video, una estación climatológica y una estación sismológica, los cuales integran el sistema de monitoreo remoto continuo en tiempo real energizado a través de 94 celdas fotovoltaicas. La información recibida por los sensores instalados es utilizada para generar distribuciones estadísticas de las cargas vivas presentes en el puente, líneas de tendencia de los registros, calibrar modelos matemáticos para la búsqueda de daño global en la estructura, realizar prognosis de la integridad estructural a través de simulación Monte-Carlo y calcular índices de confiabilidad del puente Río Papaloapan.

El 10 de junio de 2015 se presentó la ruptura del elemento de anclaje superior del tirante 1, semi-arpa 5 (torre 2, aguas arriba, lado tierra) del puente Río Papaloapan (figuras 1.1 y 1.2). En el año 2000, este puente ya había reportado la falla del elemento de anclaje superior del tirante 11 de la semi-arpa 7 (torre 3, aguas arriba, lado agua), que después de un análisis de falla se determinó que la causa fueron deficiencias en el material constitutivo [1]. Entre las características principales del material deficiente estaba la microestructura de grano grande, que lo hacía sumamente frágil que, en conjunción con la gran cantidad de poros e inclusiones que contenía la pieza por ser de fundición, resultó particularmente sensible a fallar por fatiga y que fue la causa por la que se desencadenó la ruptura después de seis años de servicio. Para prevenir la falla de algún otro elemento de anclaje del puente, el Instituto Mexicano del Transporte desarrolló una técnica de inspección no destructiva por ultrasonido, que permitió distinguir aquellas piezas con microestructura semejante a la que falló, respecto a una microestructura de grano

fino [2]; dando como resultado la identificación de 16 piezas “estructuralmente deficientes”, 14 con grano grande y dos con gran contenido de poros. Ante este resultado y basados en un estudio técnico-económico [3], Caminos y Puentes Federales de Ingresos y Servicios Conexos (CAPUFE), decidió sustituir 20 elementos de anclaje superior del puente Río Papaloapan; los 16 ya identificados en el estudio anterior y cuatro piezas elegidas al azar para obtener una muestra representativa del resto para un estudio probabilístico de confiabilidad estructural del puente [4].



**Figura 1.1 Elemento de anclaje del tirante 1, semi-arpa 5 que falló.**



**Figura 1.2 Sección de fractura del elemento de anclaje del tirante 1, semi-arpa 5.**

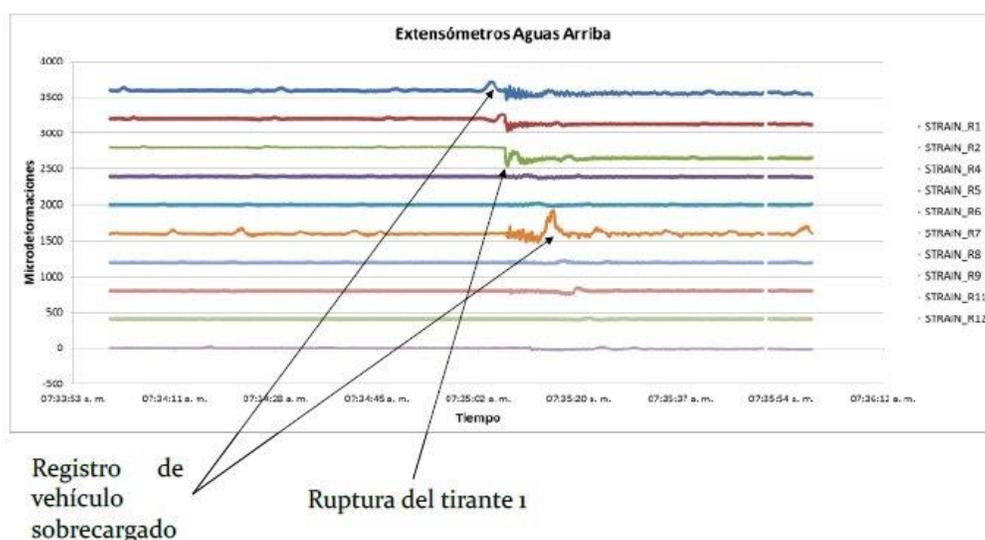
Ya rehabilitado el puente, se esperaba que no ocurrieran fallas en por lo menos 20 años a partir de 2009, fecha que se tomó como referencia para el estudio de confiabilidad, pero la falla ocurrió tan solo después de seis años.

Al realizarse el análisis de falla del elemento fracturado en 2015, se concluyó que en esta ocasión la causa principal fue una deficiente soldadura que muy

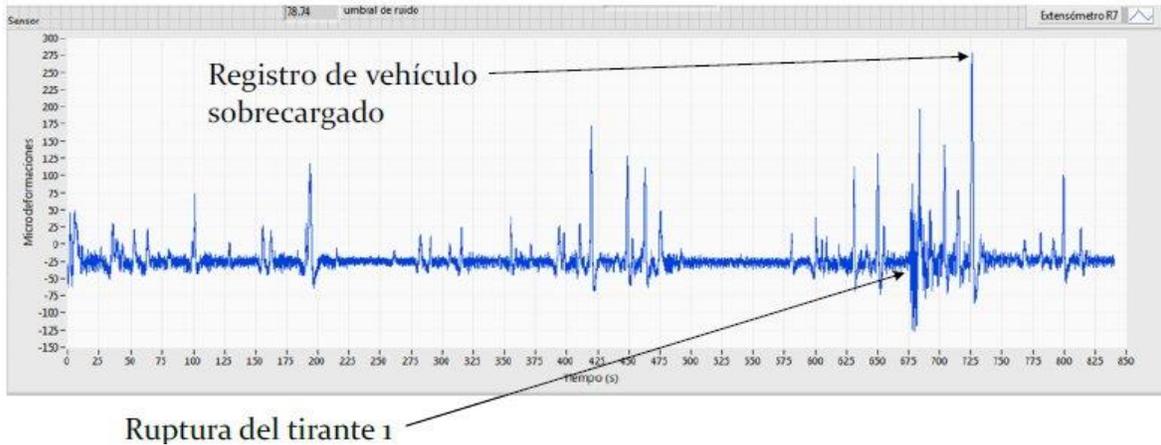
probablemente se aplicó con baja temperatura que impidió una adecuada fusión entre el material y la soldadura [5], generando una zona de concentración de esfuerzos que eventualmente desarrolló una grieta que llegó a la falla después de 20 años de servicio. Al analizar la figura 1.2, es fácil distinguir dos zonas en la superficie de fractura, una muy brillante (zonas I y III) que corresponden a la zona de fractura final por sobrecarga y una zona oscurecida por la oxidación por exposición al aire y agua por algún tiempo, que corresponde a la grieta que evolucionó en el tiempo por fatiga (zona II). Cabe mencionar que para llegar a la falla tuvo que desarrollar una grieta de aproximadamente el 60% de la sección transversal de la pieza, lo que permite concluir que la capacidad estructural del material sería excelente si se hubieran controlado adecuadamente el proceso de soldadura y no se hubiera presentado la zona con falta de fusión que desarrolló una grieta por fatiga.

Debido a que este puente cuenta con sistema de monitoreo continuo, fue posible analizar el comportamiento del puente antes, durante y después de la falla, del cual se obtuvo la siguiente información:

- I La falla ocurrió a las 07:35:04 am del 10 junio de 2016, después de que pasó un vehículo carga a una velocidad de 60 km/h (figura 1.3) y, por la magnitud de la respuesta y basados en la estadística de mediciones por dos años, se estima que el peso del vehículo sobrepasa el 99.98 percentil, es decir, que existe un 0.02% de probabilidad de que un vehículo con ese peso circule por el puente (figura 1.4).

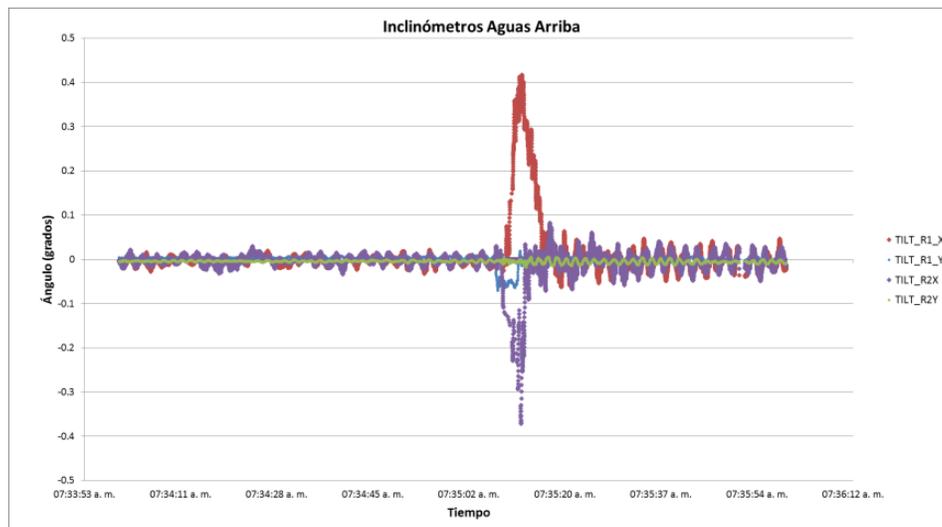


**Figura 1.3 Registro de los extensómetros bajo la viga principal aguas arriba.**



**Figura 1.4** Respuesta del extensómetro al centro de la viga principal aguas arriba.

- II Se midió la respuesta dinámica del puente y se observa recuperación de la estructura en muy poco tiempo (figura 1.5). En general, no se observó mayor daño que el del elemento de anclaje mismo; sin embargo, al evaluar las tensiones (figuras 1.6 y 1.7) se observa que el incremento en la tensión del tirante 1 de la semi-arpa 6 (torre 2, aguas arriba, lado agua), es de casi 50 toneladas, por encima del máximo de diseño, lo que pone en riesgo la integridad de ese mismo tirante. El resto de los tirantes contiguos al que falló, se mantienen por debajo del máximo de diseño.



**Figura 1.5** Respuesta de los inclinómetros en la torre 2 aguas arriba.

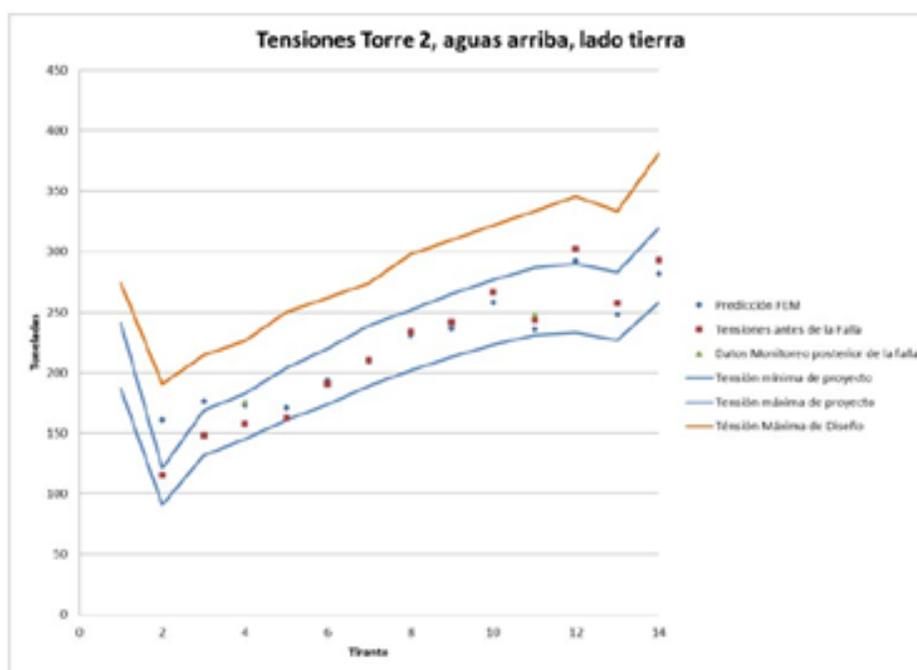


Figura 1.6 Tensiones antes y después de la falla en la semi-arpa 5.

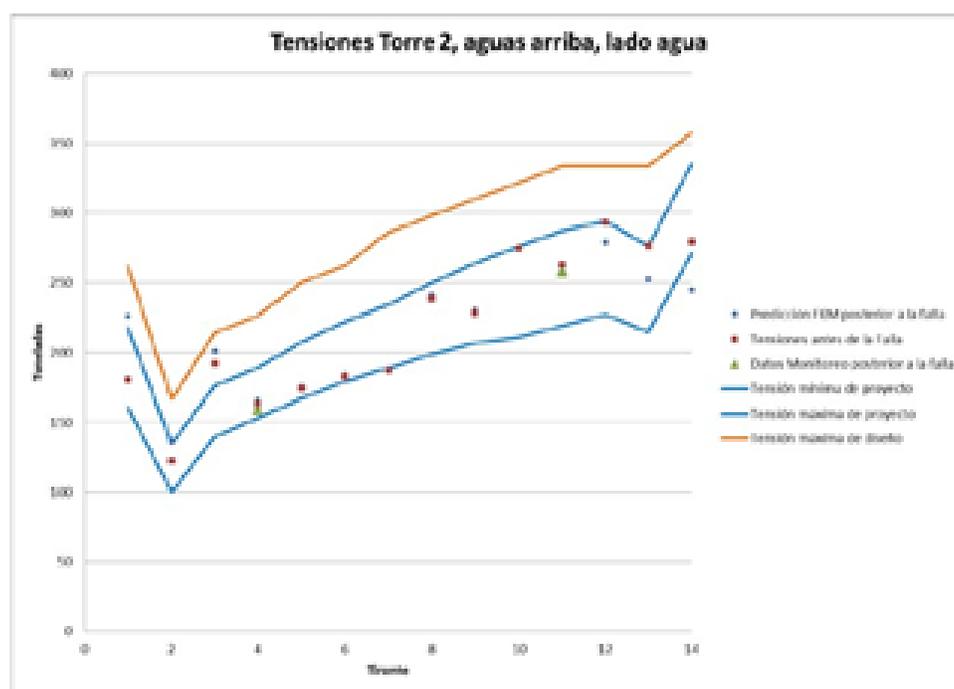


Figura 1.7 Tensiones antes y después de la falla en la semi-arpa 6.

Con base en lo anterior, en muy poco tiempo y con datos concretos obtenidos del sistema de monitoreo, fue posible recomendar a CAPUFE que restringiera el tránsito vehicular del cuerpo A por exclusivamente el carril de alta velocidad, dejando libre

el de baja velocidad para limitar al máximo las cargas en los tirantes sobrecargados. Al mismo tiempo, se sugirió limitar la velocidad de circulación sobre el puente para reducir cargas dinámicas. Finalmente, se sugirió instalar un sistema de soporte por debajo del anclaje inferior del tirante 1 que falló, para recuperar en lo posible la pérdida del tirante y aliviar los tirantes contiguos. Esta sugerencia llevó a instalar un puntal temporal de soporte, antes de rehabilitar el tirante (figura 1.8).

Dentro de las actividades que el IMT desarrolló durante el proyecto de rehabilitación, fue el monitoreo del puente durante eventos especiales, tales como la instalación del puntal, el destensado y tensado de tirantes, o cualquier actividad que alterara la condición del puente. De esta manera, se monitorearon las tensiones de los tirantes y las deformaciones de los sensores contiguos al punto donde se instaló el puntal (figuras 1.9 y 1.10).



**Figura 1.8 Puntal de refuerzo temporal en la zona afectada por la falla.**

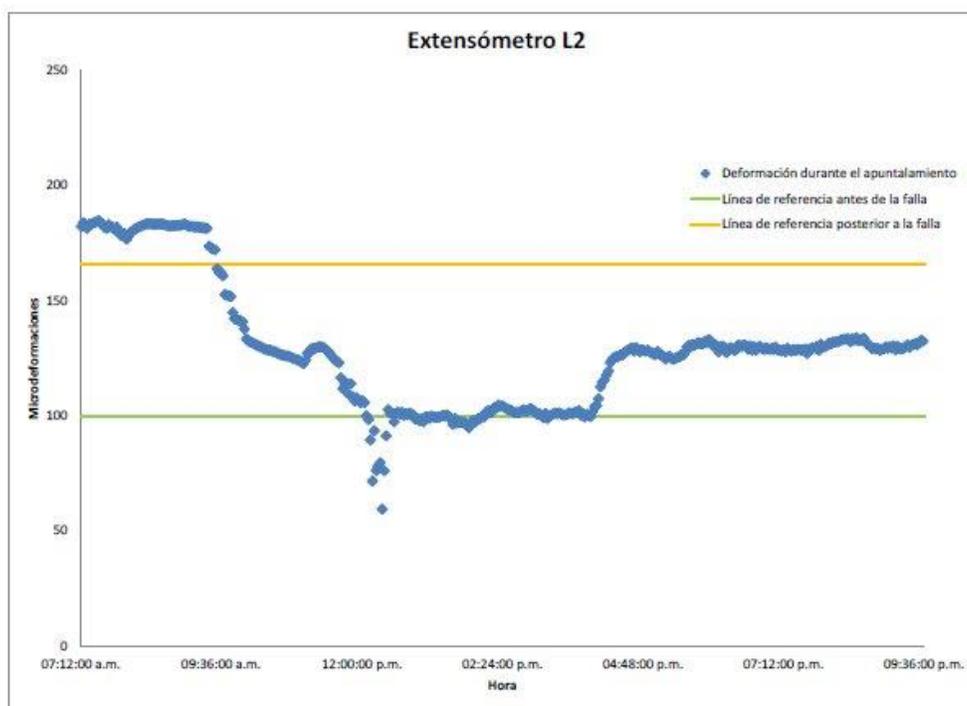


Figura 1.9 Deformaciones medidas por el sensor L2 durante la instalación del puntal.

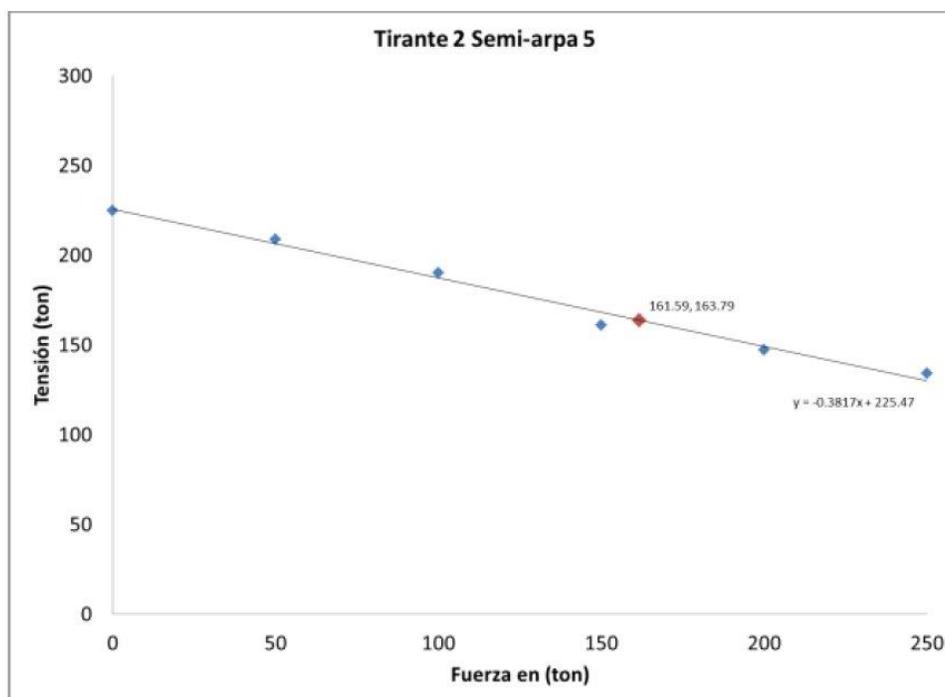


Figura 1.10 Tensiones en el tirante 2, semi-arpa 5 durante la instalación del puntal.

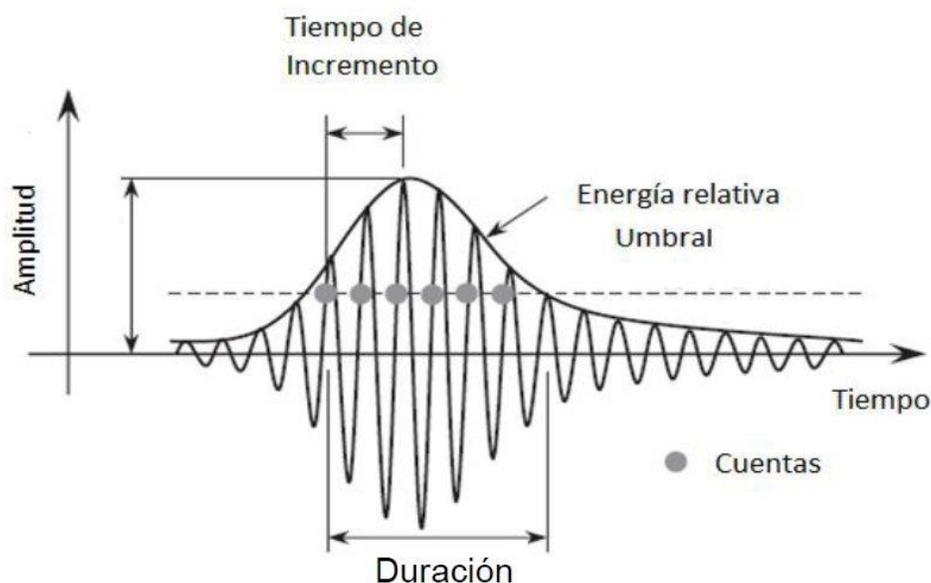
Del monitoreo de las tensiones de los tirantes durante la instalación del puntal, fue posible estimar la carga final que estaba soportando el puntal a través de la correlación lineal de las cargas aplicadas por el gato hidráulico antes de instalar el neopreno y después de que se instaló el neopreno y se liberó el gato. De esta manera, se concluyó que la carga soportada por el puntal era de entre 150 y 160 toneladas.

El monitoreo periódico de las tensiones de los tirantes permitió confirmar que no había variaciones en su distribución, excepto cuando se destensaron o tensaron los cables. Además, se confirmó nuevamente que los efectos de los tirantes son locales y afectan únicamente cuatro o cinco tirantes contiguos del mismo lado únicamente.

Para inspeccionar las soldaduras embebidas en el concreto de los elementos de anclaje del puente Río Papaloapan, se propuso utilizar la técnica de emisiones acústicas, la cual es una técnica de inspección no destructiva que se basa en el principio físico de que las micro-grietas y defectos en un material sometido a esfuerzos, emiten pulsos acústicos producto del crecimiento de grietas o de efectos de fricción entre las caras de las mismas. Por su naturaleza, esta técnica debe ser evaluada con sumo cuidado para distinguir las emisiones por el crecimiento o la fricción de grietas respecto a emisiones producidas por otros efectos no deseados o ruido externo.

Las señales de emisión acústica se registran mediante transductores piezoeléctricos que se colocan sobre la superficie del elemento a evaluar, garantizando el acoplamiento del transductor con la pieza que se inspecciona mediante un fluido o grasa que permite la transmisión de la señal al transductor y que compensa los efectos de rugosidad de las dos superficies de acoplamiento.

La caracterización de una señal acústica (hit acústico) se realiza mediante los parámetros de amplitud (en unidades de mV o dB), tiempo de incremento (que es el tiempo que transcurre entre el pase del umbral y la máxima amplitud), duración, intensidad de señal, frecuencia promedio de señal, número de cuentas (corresponde al número de veces que excede el umbral) y energía (Figura 1.11). Cuando se analiza la respuesta de una medición, además de caracterizar cada emisión (hit), se contabiliza el número de emisiones o “hits”, para identificar la razón de crecimiento de una grieta.



**Figura 1.11 Parámetros característicos de una señal acústica.**

Para una correcta interpretación de las emisiones acústicas, es necesario diseñar y realizar un proceso de calibración adecuado al caso específico y para ello se realizaron diferentes pruebas de evaluación. La primera prueba se realiza de acuerdo a la norma ASTM-F2174 Standard Practice for Verifying Acoustic Emission Sensor Response, la cual se utiliza para verificar el adecuado funcionamiento del sistema de medición y que en nuestro caso permitió replicar las condiciones de campo en laboratorio y establecer un primer nivel de calibración (figura 1.12). De igual manera, aplicando la señal de excitación en distintos puntos, según la norma, se pudieron evaluar los efectos de atenuación en el material.

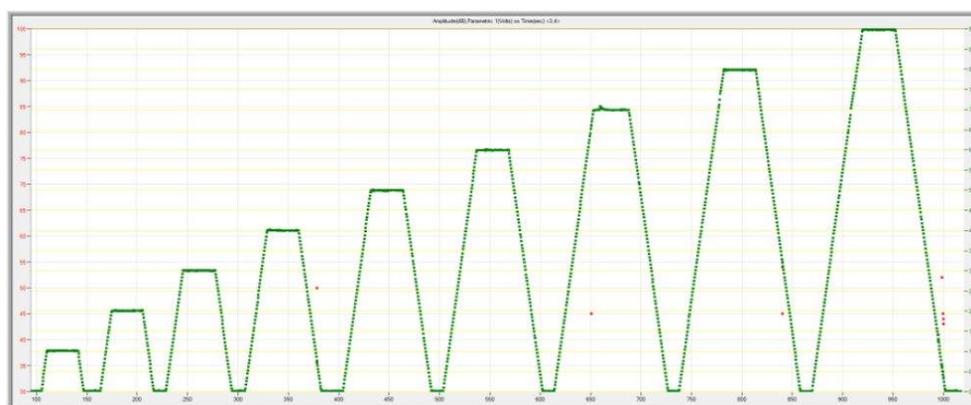


**Figura 1.12 Prueba de emisiones acústicas según ASTM-F2174.**

Para la segunda prueba se fabricó una probeta con el mismo tipo de acero de la placa (A50) y del elemento de anclaje (AISI 1045); la cual fue soldada de manera que tuviera defectos internos para simular las condiciones de un elemento de anclaje superior con defectos en la soldadura. Posteriormente, esta probeta fue sometida a tensión con cargas controladas y se fueron registrando las respuestas por emisiones acústicas para identificar las características de las señales (frecuencias, amplitud) y calibrar el método (umbral, tiempo de incremento, duración), como se muestra en las figuras 1.13 y 1.14.



**Figura 1.13 Prueba de tensión y probeta utilizada para simular condiciones de campo.**



**Figura 1.14 Secuencia de ciclos de carga y descarga aplicados en la prueba de tensión.**

Una vez establecidos los parámetros de calibración en el laboratorio, se realizó una prueba en campo para probar, tanto el procedimiento de fijación y acoplamiento, como el procedimiento de calibración con los parámetros establecidos. Es importante hacer notar que se utilizaron dos sensores por elemento de anclaje, uno de alta frecuencia y otro de baja frecuencia, esto con el objeto de evaluar las respuestas en dos rangos de frecuencia distintos (figura 1.15).

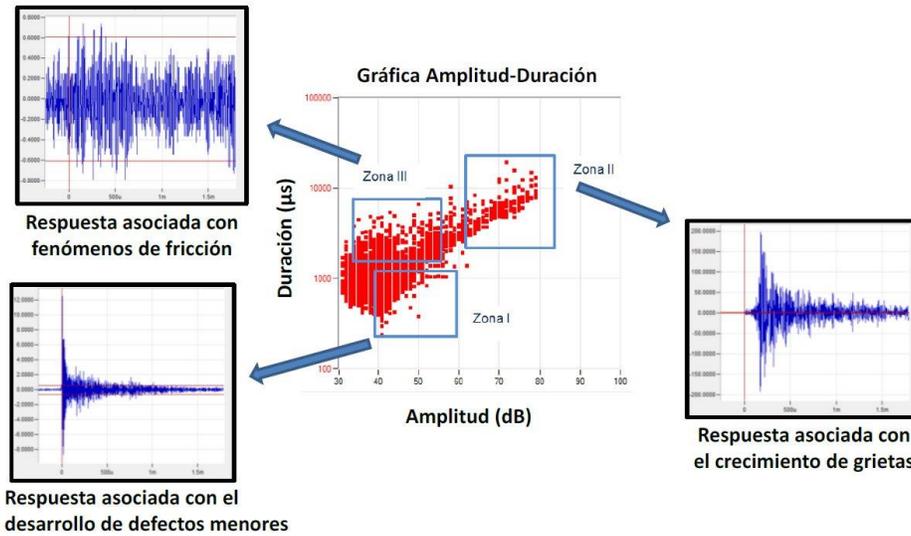


**Figura 1.15 Procedimiento de colocación y fijación de sensores.**

El equipo utilizado cuenta con 16 canales de instrumentación, por lo que fue posible hacer mediciones simultáneas en ocho elementos de anclaje. Debido a esto, los trabajos de inspección en cada torre se planearon en cuatro etapas para cubrir el total de 28 elementos de anclaje, correspondiente a dos semi-arpas, en cada torre, ya sea aguas arriba o aguas abajo. Las inspecciones se planearon para medir durante un periodo de 13 horas continuas, comenzando a las 6 pm de un día y concluyendo a las 7 am del día siguiente. Se seleccionó este intervalo de tiempo porque en la noche es cuando circulan sobre el puente la mayor cantidad de vehículos de carga y, normalmente, con mayor nivel de carga; por lo tanto, se garantizaba el mayor número de ciclos de cargas y favorecer el mayor número de emisiones.

Una vez registradas las emisiones acústicas de una torre (28 elementos de anclaje), se procedió al análisis de los datos en el laboratorio. Este complejo proceso, por el gran número de datos registrados, se resume en las gráficas de amplitud-duración, una para cada elemento de anclaje. En cada gráfica se indican todos los eventos registrados en su correspondiente elemento de anclaje, representando cada evento por su amplitud y frecuencia.

En general, existen tres tipos de eventos que se registran por emisiones acústicas y las gráficas de amplitud-duración son útiles para clasificarlas de acuerdo a su origen (figura 1.16), respuesta asociada a fenómenos de fricción (zona III), respuesta asociada con el desarrollo de defectos menores (zona I) y respuesta asociada con el crecimiento de grietas (zona II).



**Figura 1.16 Identificación de respuestas según su origen y zona.**

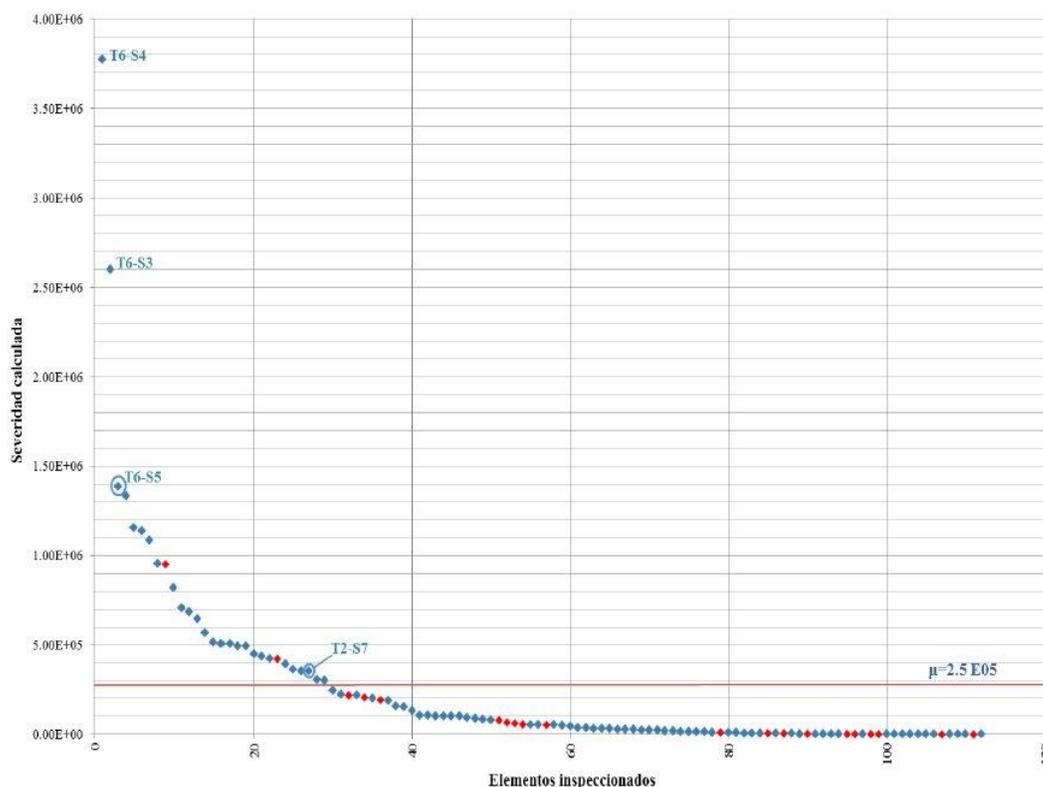
Para establecer un criterio cuantitativo que califique la condición de un elemento de anclaje, se definió un índice de severidad [8], el cual básicamente promedia la energía acústica de los 50 eventos de mayor duración y frecuencia registrados y que representan los casos más críticos.

El índice de severidad se define como:

$$S_r = \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{n=50} S_{oi} \quad (1.1)$$

En este caso,  $S_{oi}$ , es la energía acústica total registrada en el  $i$ -ésimo evento.

El análisis de los índices de severidad se resume en la gráfica de la figura 1.17. La línea que divide las zonas de severidad corresponde al valor promedio del índice de severidad de los 111 elementos de anclaje inspeccionados.



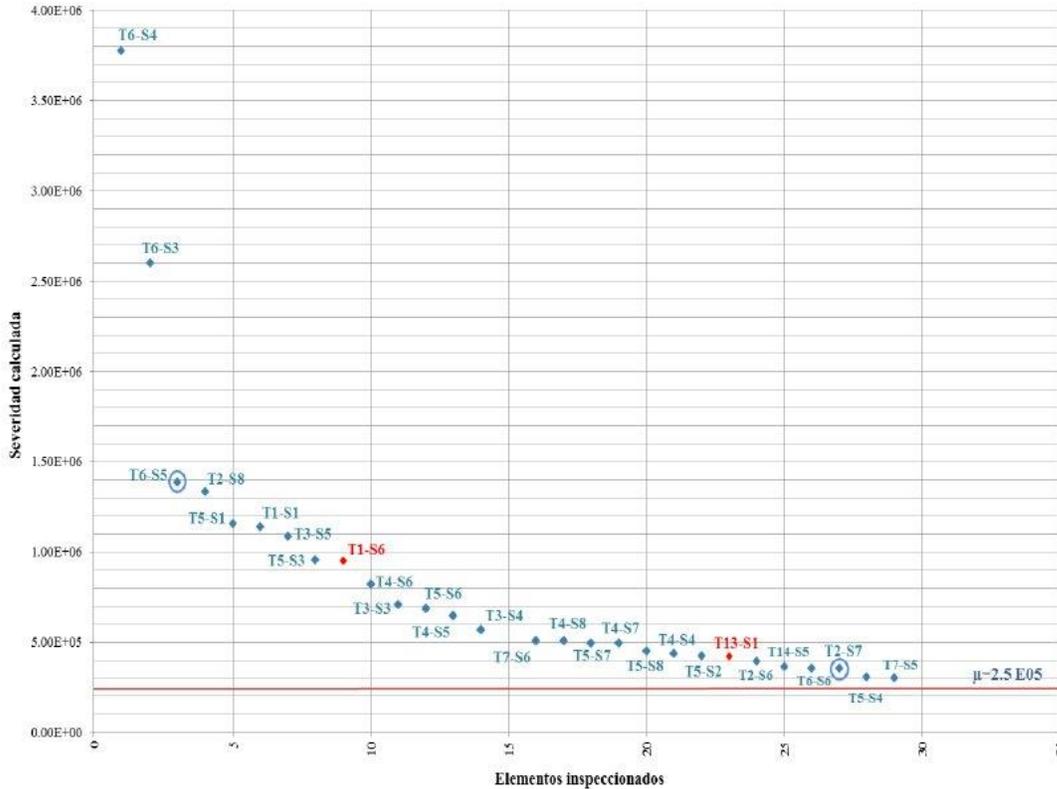
**Figura 1.17 Gráfica del índice de severidad, de mayor a menor, para todos los elementos de anclaje.**

Para establecer una primera correlación entre los defectos de la soldadura y el índice de severidad, e identificar con mayor exactitud cuales elementos pudieran ser críticos y cuáles no, se seleccionaron dos elementos extremos (T6-S5 y T2-S7) para que fueran descubiertos y se pudieran inspeccionar con líquidos penetrantes y ultrasonido y, siguiendo los criterios del código AWS, calificar la condición de la soldadura.

Al descubrirse los dos elementos de anclaje, se encontró que el T2-S7 (de menor severidad) contenía defectos pequeños que, según el criterio AWS, podían ser aceptables; en tanto que el otro elemento de anclaje (T6-S5) contenía un defecto en la raíz de la soldadura que aplicando el mismo criterio tenía que ser rechazado. En el primer caso, de la soldadura no rechazada, finalmente se cambió el elemento de anclaje por grietas en la superficie que podían ser indicios de esfuerzo bajo corrosión, pero en un principio se esperaba que la soldadura fuera reparada sin necesidad de cambiar el elemento de anclaje. En el segundo caso, se determinó que toda soldadura rechazada, implicaba el cambio del elemento de anclaje.

A partir de los resultados anteriores, ahora se grafican todos los elementos de anclaje cuyo índice de severidad es superior al valor promedio (figura 1.18). Con base a lo descrito anteriormente, se sabe que los elementos con valores de severidad cercanos o superiores al elemento de anclaje T6-S5, muy probablemente

contengan defectos en la soldadura y sean rechazados aplicando el criterio del código AWS. Sin embargo, Los que están por debajo de este elemento de anclaje y hasta el T2-S7, puede ser posible que los defectos no lleguen a ser significantes y sean aceptables por el mismo criterio AWS.



**Figura 1.18 Gráfica del índice de severidad de los elementos de anclaje más críticos.**

Ante esta circunstancia se ha propuesto continuar con la sustitución de 10 elementos de anclaje más, comenzando por el de mayor severidad. El proceso de sustitución sugerido, propone abrir la caja para descubrir la soldadura y permitir su inspección por líquidos penetrantes y ultrasonido para calificar la soldadura de acuerdo con los criterios AWS. Si la soldadura es rechazada, entonces se procede a sustituir el elemento de anclaje; por otro lado, si es aceptable, pero contiene defectos pequeños, se procede a reparar la soldadura para eliminar esos defectos menores sin que sea sustituido el elemento de anclaje. Si al inspeccionar por ultrasonido y líquidos penetrantes el resto del elemento de anclaje y se presentan defectos, como fue el caso del elemento T2-S7, entonces se considerará su cambio, en caso contrario, se mantiene el criterio de reparar sin sustituir.

El elemento de anclaje T1-S6 está condicionado a una segunda inspección por emisiones acústicas. Si en esta segunda ocasión mantiene el mismo nivel de severidad, entonces se mantiene en la lista de los 10 elementos que se proponen

cambiar. En caso de que se reduzca el nivel de severidad, entonces se excluye y se considera el siguiente en la secuencia de sustitución, el número 11, el T5-S6.

Derivado de los trabajos de mantenimiento de los elementos de anclaje realizados en el presente año y de los que se realizarán en el año de 2018, surge la necesidad de por una parte evaluar la condición estructural del puente Río Papaloapan posterior a la sustitución de los tres elementos de anclaje y por la otra parte dar seguimiento a los valores de los parámetros estructurales presentes para realizar la actualización del modelo de elemento finito del puente Río Papaloapan y utilizar la información de éste en los trabajos de rehabilitación programados para el año 2019.

Esta investigación, permitirá contar con información de utilidad consistente, la cual vendrá a contribuir al cumplimiento del objetivo 6: “Desarrollar integralmente y a largo plazo al sector con la creación y adaptación de tecnología y la generación de capacidades nacionales[6]”, mismo que se encuentre alineado al objetivo 4.9 “Contar con una infraestructura de transporte que se refleje en menores costos para realizar la actividad económica [7]”, de la meta nacional IV México Próspero del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018.



## 2 Sistema de monitoreo puente Río Papaloapan

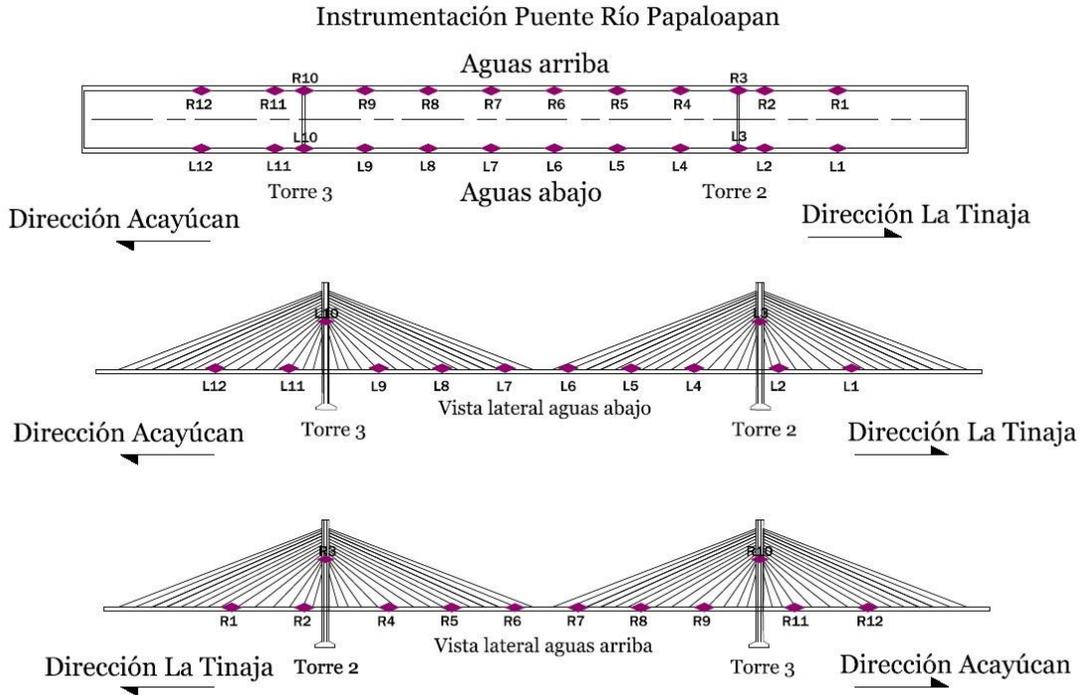
El sistema de monitoreo instalado en el Puente Río Papaloapan consiste de un sistema de adquisición de datos utilizando tecnología de fibra óptica. La instalación y puesta en marcha del sistema de monitoreo comenzó en diciembre de 2012 y está compuesto por los siguientes sensores y equipos: 24 medidores de deformación, 24 acelerómetros, ocho inclinómetros, un sensor de desplazamiento, dos cámaras de video, una estación climatológica y una estación sismológica, un interrogador, un multiplexor y un procesador de datos. Los equipos del sistema de adquisición de datos, interrogador, multiplexor y el procesador de datos, están dentro de un gabinete con temperatura y humedad controladas. Todos los equipos son energizados a través de 94 celdas fotovoltaicas y 36 baterías de ciclado profundo instaladas en las torres 2 y 3 del puente Río Papaloapan. En la tabla 2.1 se pueden consultar el número, marca y modelos de los equipos y sensores instalados.

**Tabla 2.1 Sistema de monitoreo instalado en el puente Río Papaloapan.**

Cant	Nombre	Descripción	Marca	Modelo
1	Interrogador	Equipo de adquisición de datos de fibra óptica de 4 canales con frecuencia de adquisición máxima de 1000 Hz	Micron Optics	sm-130
1	Multiplexor	Equipo que divide el haz de luz de los canales del interrogador para tener 16 canales	Micron Optics	sm-041
1	Sensor de desplazamiento	Sensor empleado para medir desplazamientos	Micron Optics	os5100
5	Sensores de temperatura	Sensor empleado para medir cambios de temperatura	Micron Optics	os4350
8	Inclinómetros	Sensor empleado para medir inclinaciones	FBG TECH	T1-310
24	Acelerómetros	Sensor empleado para medir respuestas dinámicas	Micron Optics	os7100
24	Extensómetros	Sensor empleado para medir deformaciones unitarias en concreto	Micron Optics	os3600

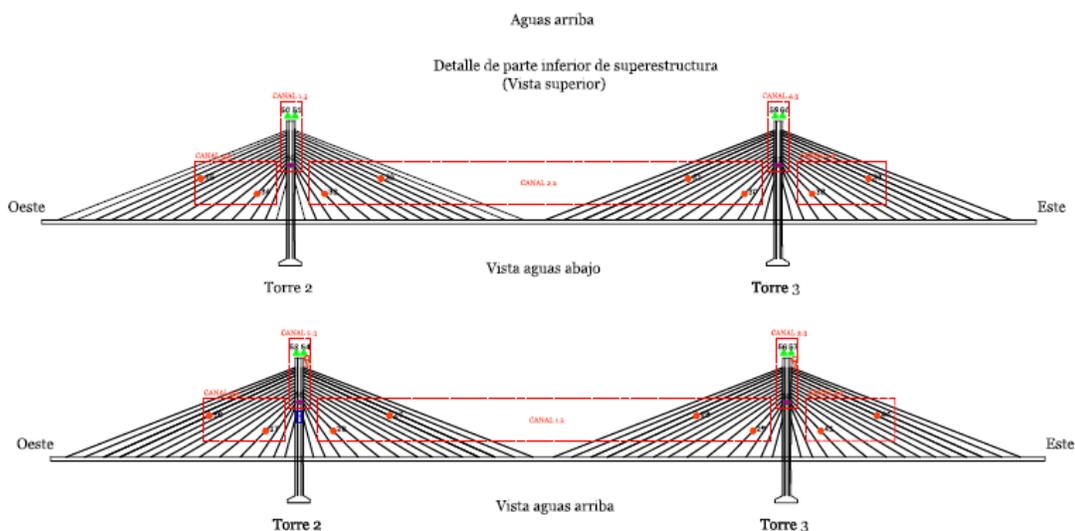
Los 24 sensores de deformación para concreto fueron instalados sobre la cara inferior de las vigas principales y en la cara interna de las torres 2 y 3 del puente tanto del lado aguas abajo y lado aguas arriba. Cada una de las vigas principales

tiene instalados 10 sensores de deformación, distribuidos aproximadamente cada 30 metros en 407 m de la longitud del puente, los últimos cuatro sensores de deformación se instalaron en cada una de las torres que soportan las ocho semi-arpas del puente, a una altura aproximada de 20 metros. En la figura 2.1 se puede observar las posiciones de los 24 extensómetros y su identificación en el puente Río Papaloapan.



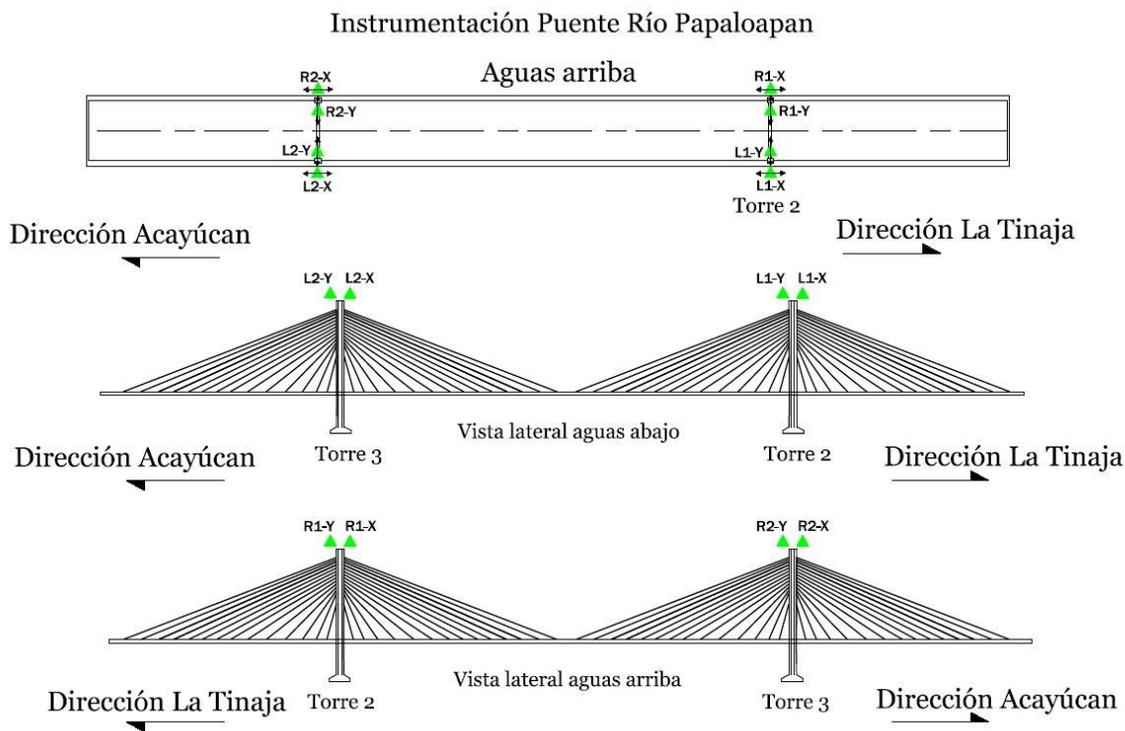
**Figura 2.1 Diagrama de instalación de los sensores de deformación de fibra óptica.**

De los 24 acelerómetros de fibra óptica, 16 de fueron instalados en los tirantes número 4 y número 11 de cada semi-arpa del puente, cada acelerómetro quedó ubicado a la mitad de la longitud total del tirante de sujeción, en tanto que, los ocho acelerómetros restantes fueron colocados en la parte superior de las dos torres, torre 2 y torre 3, lado aguas arriba y lado aguas abajo, dos para cada posición. Los acelerómetros instalados en las torres son registrar las respuestas dinámicas de aceleración en las direcciones “X” y “Y”, dirección longitudinal y transversal respectivamente. La figura 3.2 muestra las ubicaciones de los acelerómetros en puente.



**Figura 2.2 Diagrama de instalación de los sensores de deformación de fibra óptica.**

Los ocho inclinómetros de fibra óptica fueron colocados en la parte superior de las torres 2 y 3, tanto para el lado aguas arriba como para el lado aguas abajo, dos inclinómetros para cada posición, uno para el plano “XZ” y el otro para el Plano “YZ”, figura 2.3.



**Figura 2.3 Ubicación e identificación de los inclinómetros de fibra óptica.**

Finalmente, de los sensores de fibra óptica, se instaló un medidor de desplazamiento en la junta de expansión con dirección a Acayúcan. Complementario al sistema de monitoreo de fibra óptica se incorporó la instalación de dos cámaras de video marca Bosh modelo MIC 400, colocadas en las dos torres ubicadas aguas abajo a una altura aproximada de 20 metros, una estación climatológica marca Weather Hawk modelo WXT 520 ubicada en la parte superior de la torre 2 ubicada aguas abajo y una estación sismológica Marca Nomis modelo minisupergraph. El interrogador, el Multiplexor y la unidad de control se colocaron dentro de un gabinete con temperatura y humedad controladas, éste se ubicó a una altura de 12 m en la torre 2, aguas abajo.

### **3 Seguimiento de los parámetros estructurales del puente Río Papaloapan**

---

A partir del año 2012 se ha dado seguimiento a los parámetros estructurales del puente Río Papaloapan, a través del seguimiento de los valores de referencia iniciales de cada parámetro (deformación, inclinación, tensión, frecuencia natural, etc.), el análisis de cada parámetro bajo condiciones de operación normal, mediante el análisis estadístico de cada variable y la evaluación de los cambios en los parámetros de acuerdo al mantenimiento preventivo realizado o algún tipo de daño encontrado. Las variables seguidas en los últimos seis años han permitido establecer estrategias de mantenimiento, protocolos de actuación ante daño, la evaluación de la efectividad del mantenimiento realizado, evaluar la condición estructural posterior a sismos, garantizar la seguridad de los usuarios y la integridad del puente.

A continuación, en las figuras 3.1 a 3.24 se puede observar el valor de referencia de deformación desde que fueron instalados los extensómetros de fibra óptica en el 2012 y hasta el año de 2018. Cada uno de los gráficos tiene líneas que muestran las fechas en las cuales se realizó mantenimiento sobre el puente o se registró un fenómeno natural. Como se puede apreciar, para el caso de mantenimientos realizados, sustitución de elementos de anclaje, la posición del sensor respecto al lugar donde se realizó la reparación es importante en la sensibilidad del sensor. Si el sensor es relativamente cercano a la posición de un daño o mantenimiento realizado es posible evaluar la efectividad del mantenimiento y determinar si los parámetros estructurales del puente regresan a las condiciones normales de operación una vez concluido el mantenimiento.

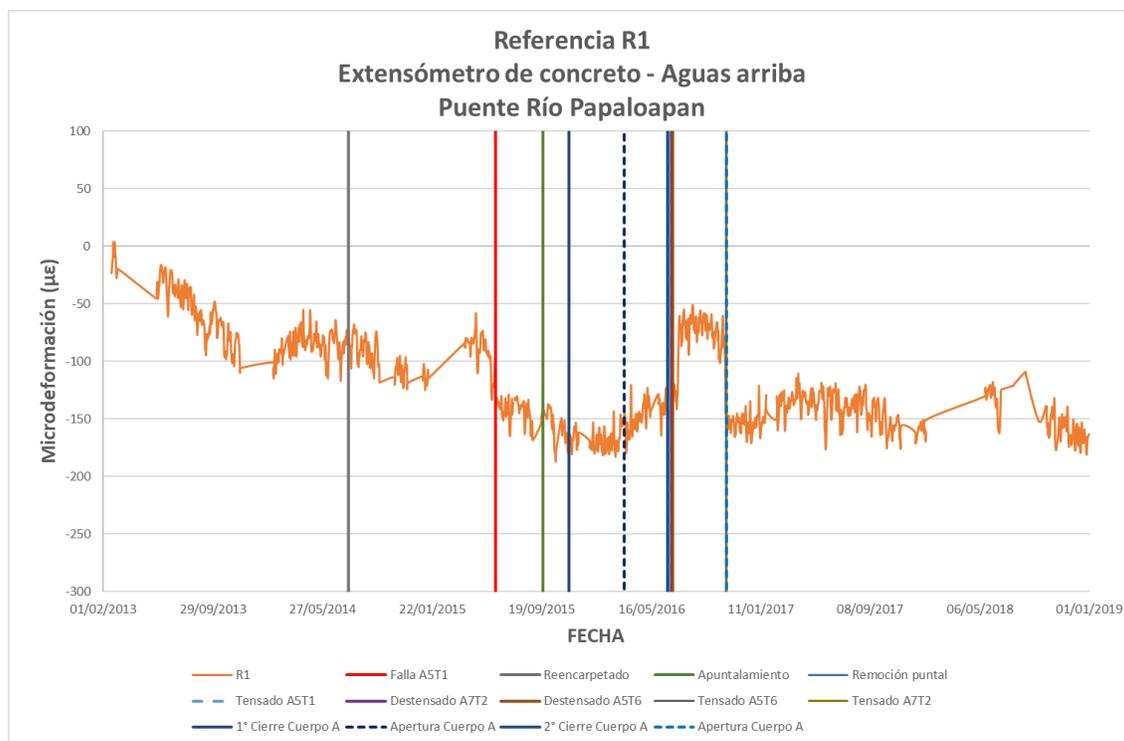


Figura 3.1 Valores de deformación unitaria para el sensor R1.

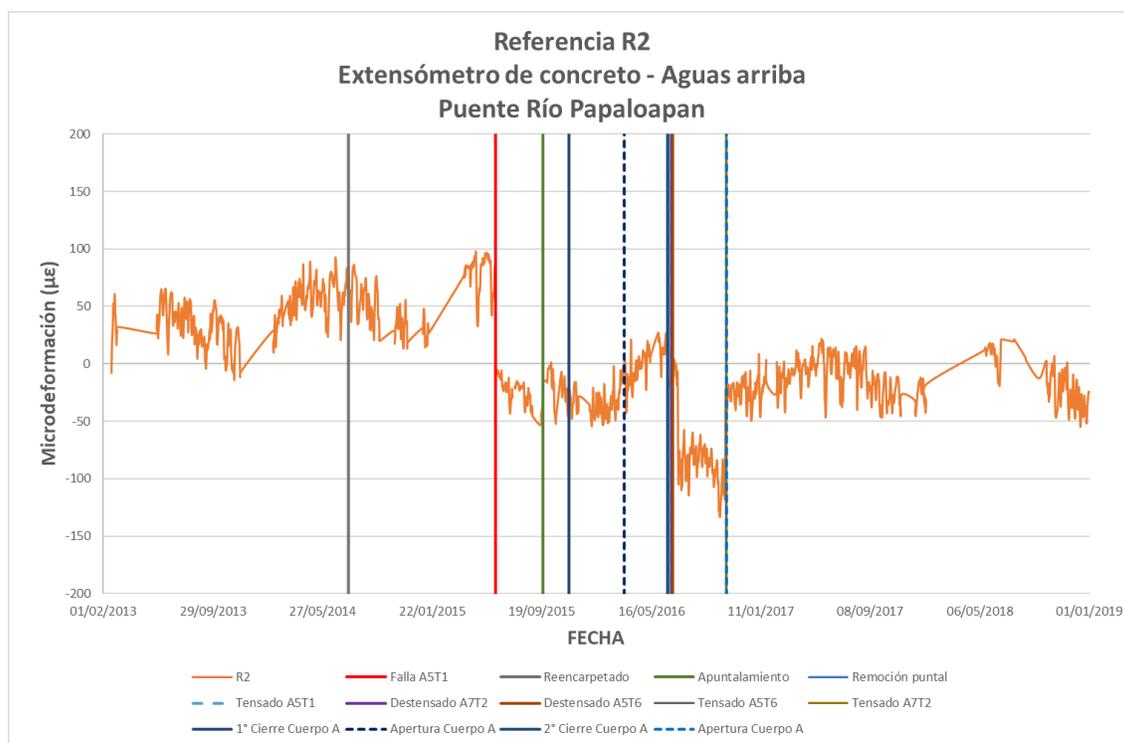


Figura 3.2 Valores de deformación unitaria para el sensor R2.

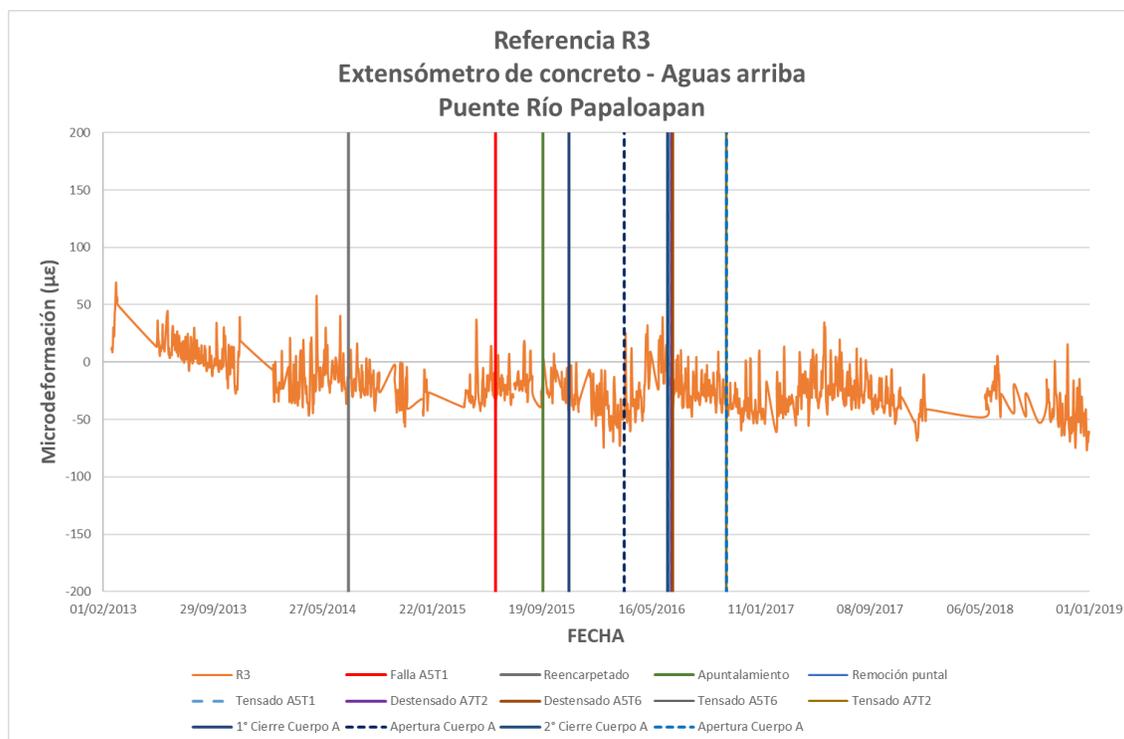


Figura 3.3 Valores de deformación unitaria para el sensor R3.

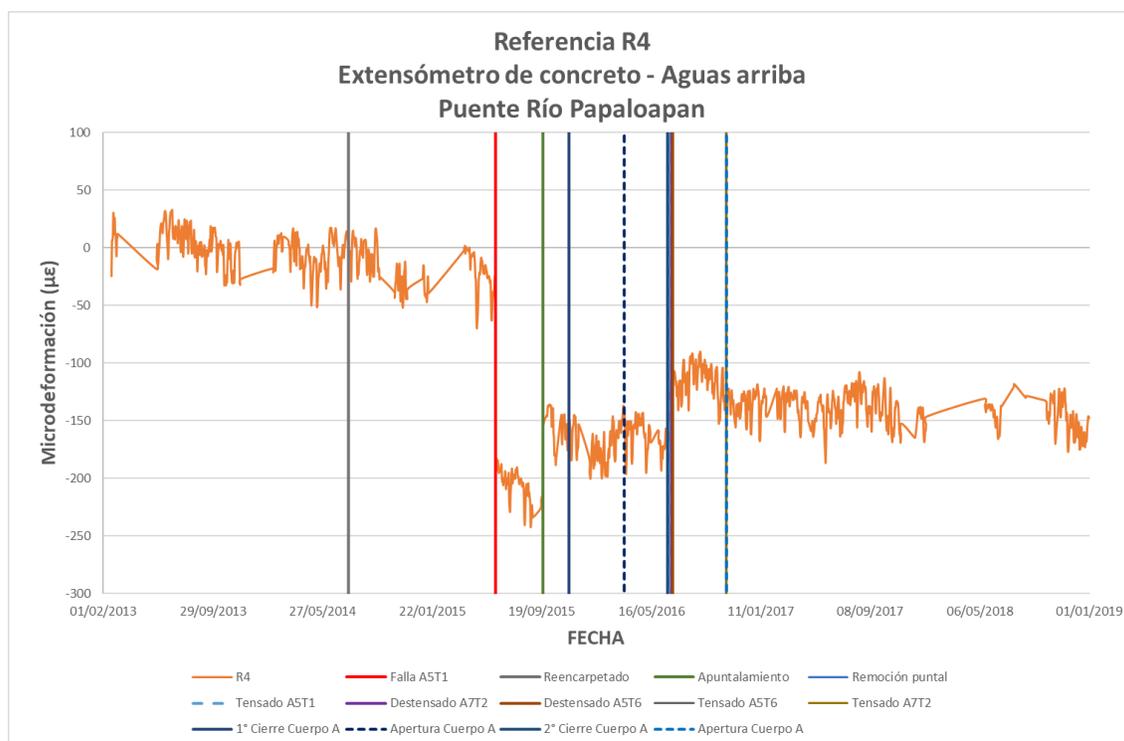


Figura 3.4 Valores de deformación unitaria para el sensor R4.

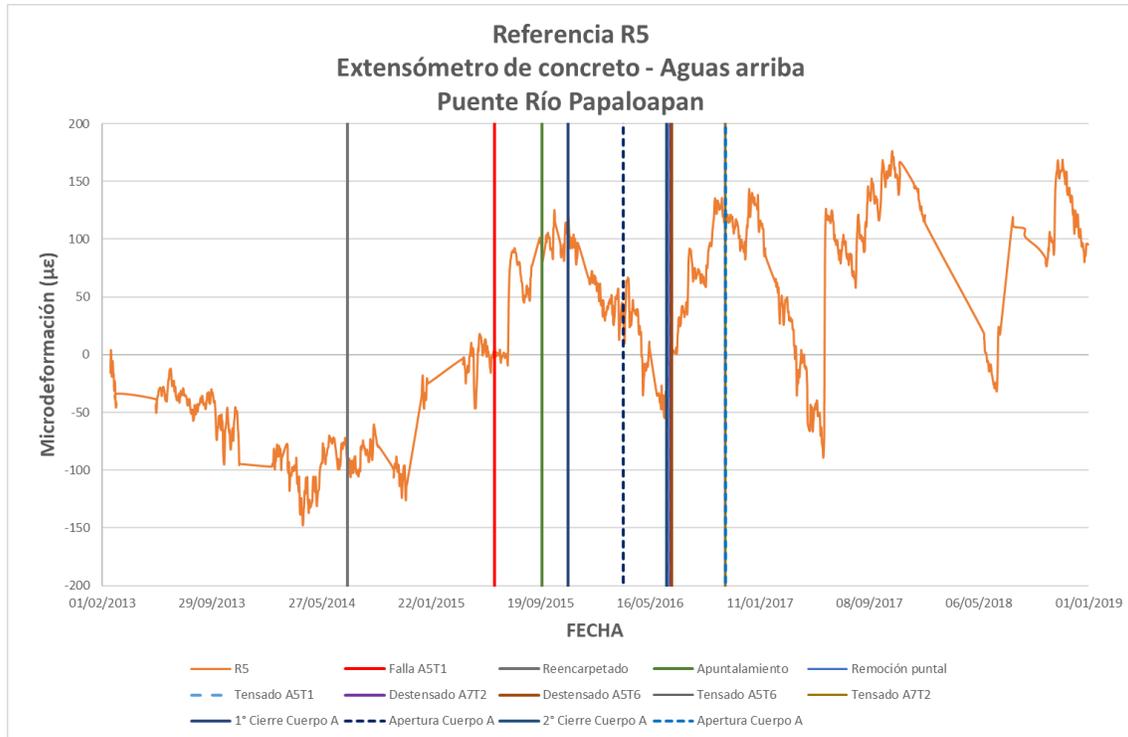


Figura 3.5 Valores de deformación unitaria para el sensor R5.

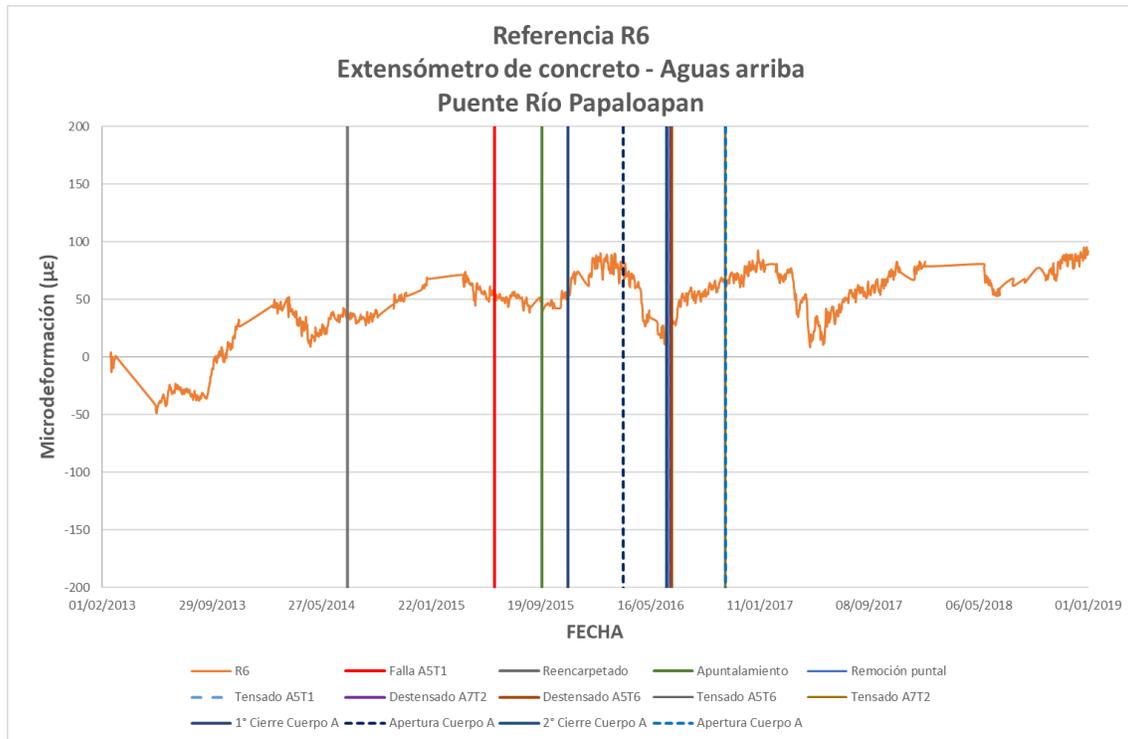


Figura 3.6 Valores de deformación unitaria para el sensor R6.

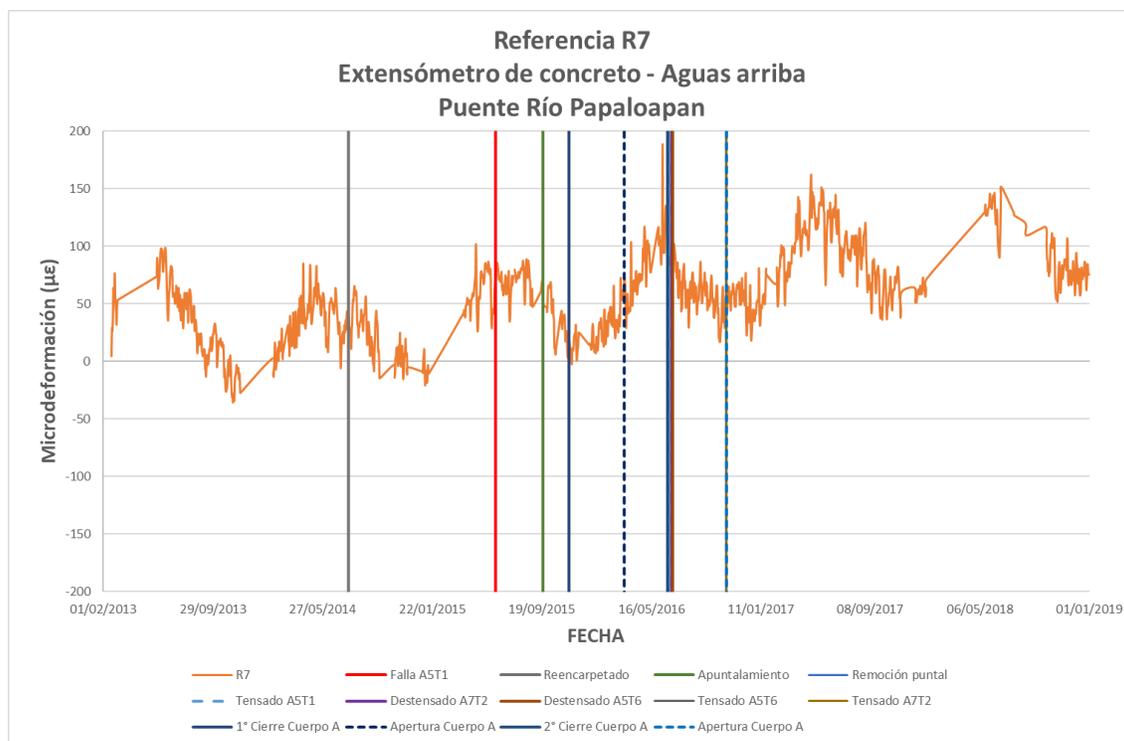


Figura 3.7 Valores de deformación unitaria para el sensor R7.

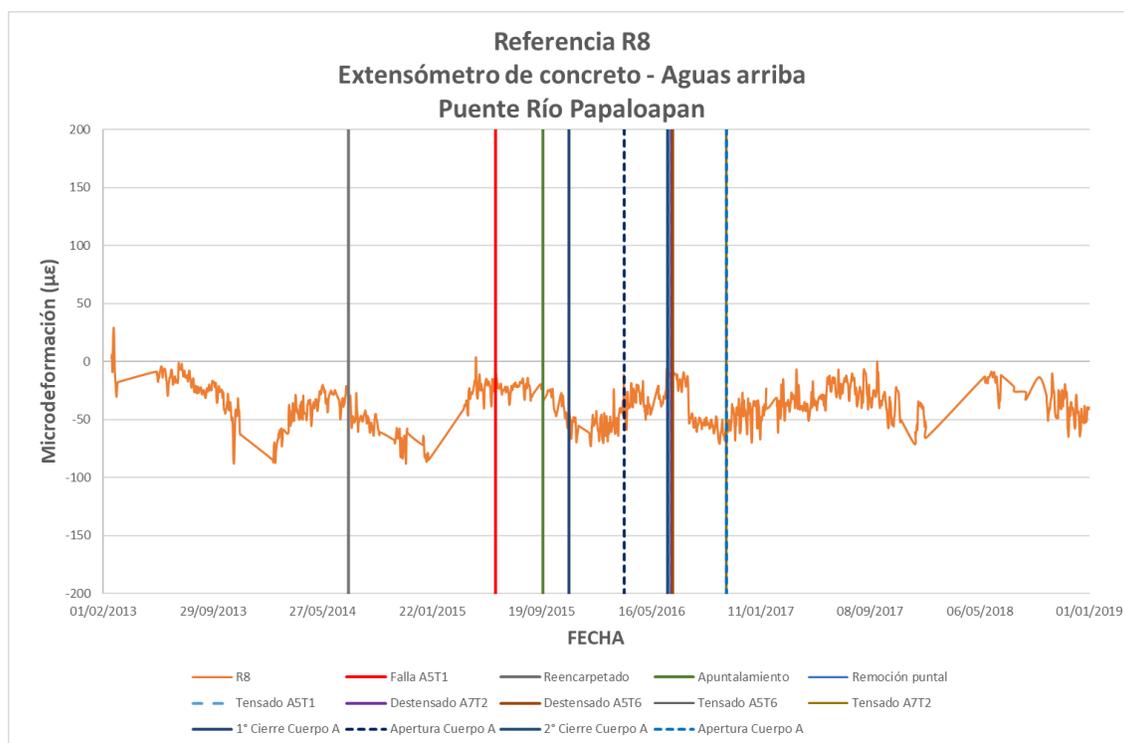
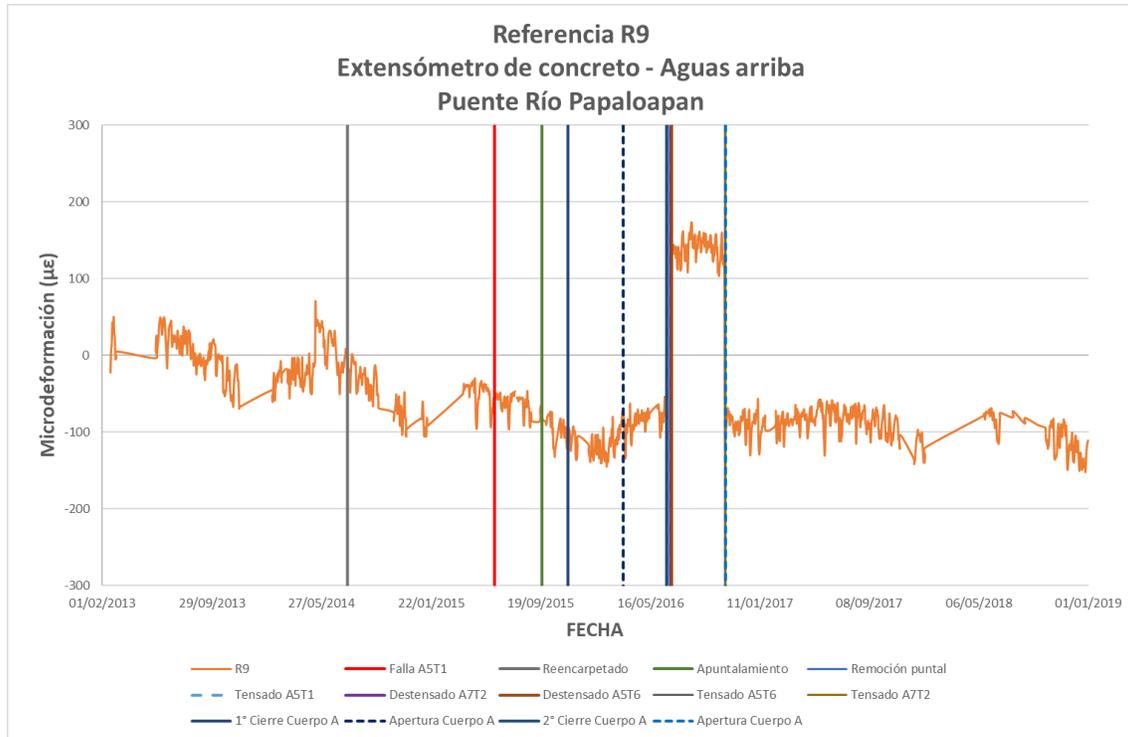
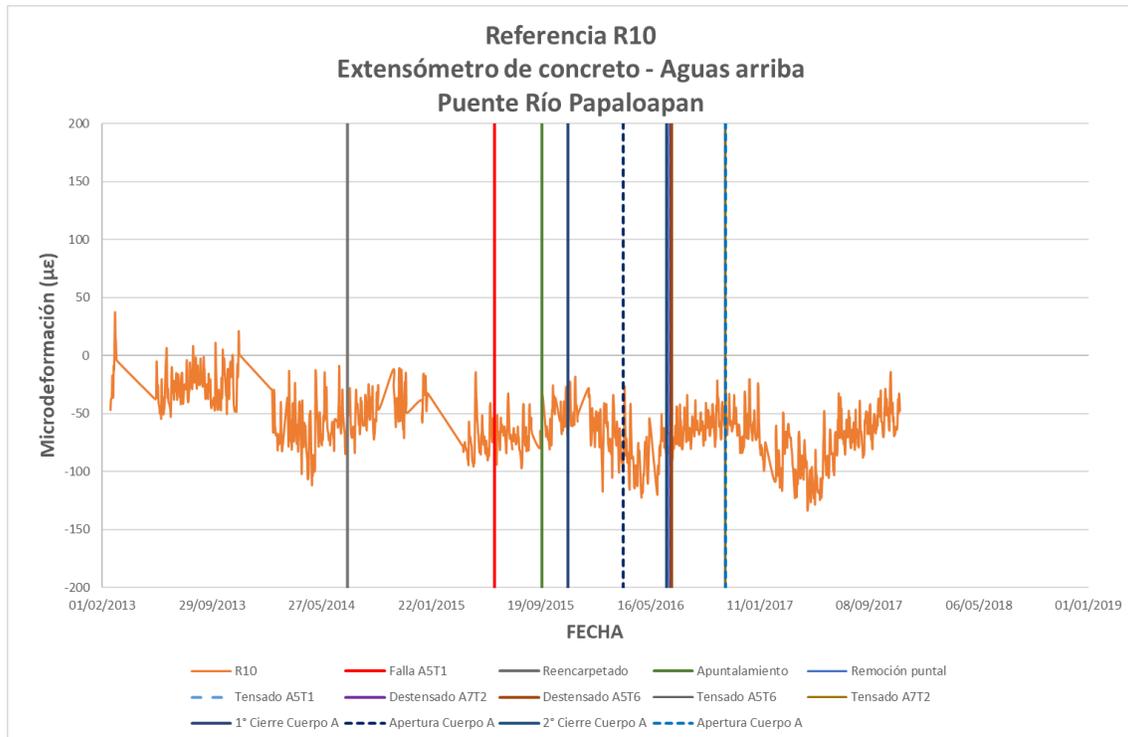


Figura 3.8 Valores de deformación unitaria para el sensor R8.



**Figura 3.9 Valores de deformación unitaria para el sensor R9.**



**Figura 3.10 Valores de deformación unitaria para el sensor R10.**

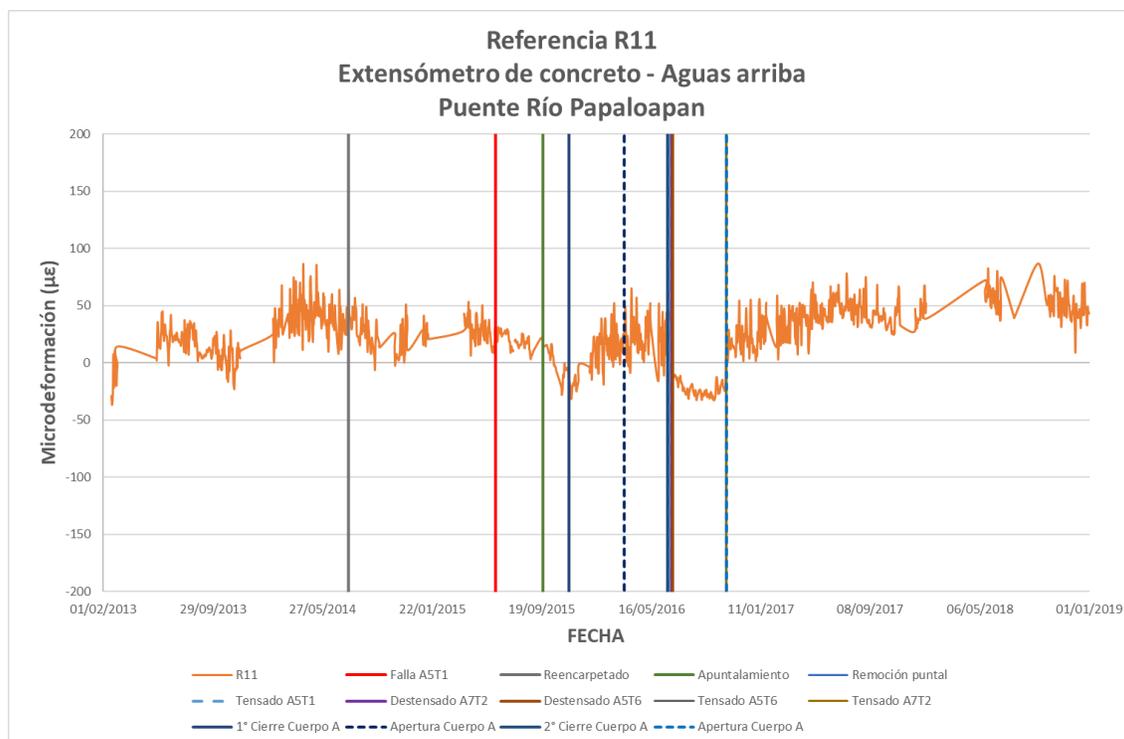


Figura 3.11 Valores de deformación unitaria para el sensor R11.

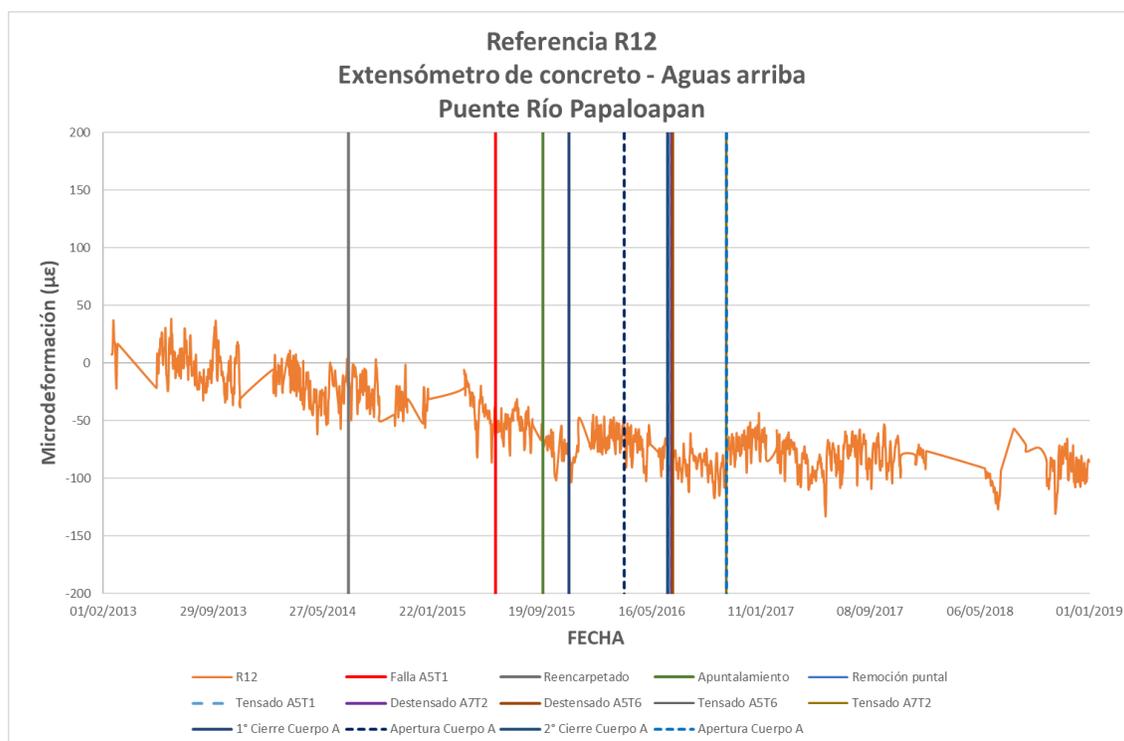


Figura 3.12 Valores de deformación unitaria para el sensor R12.

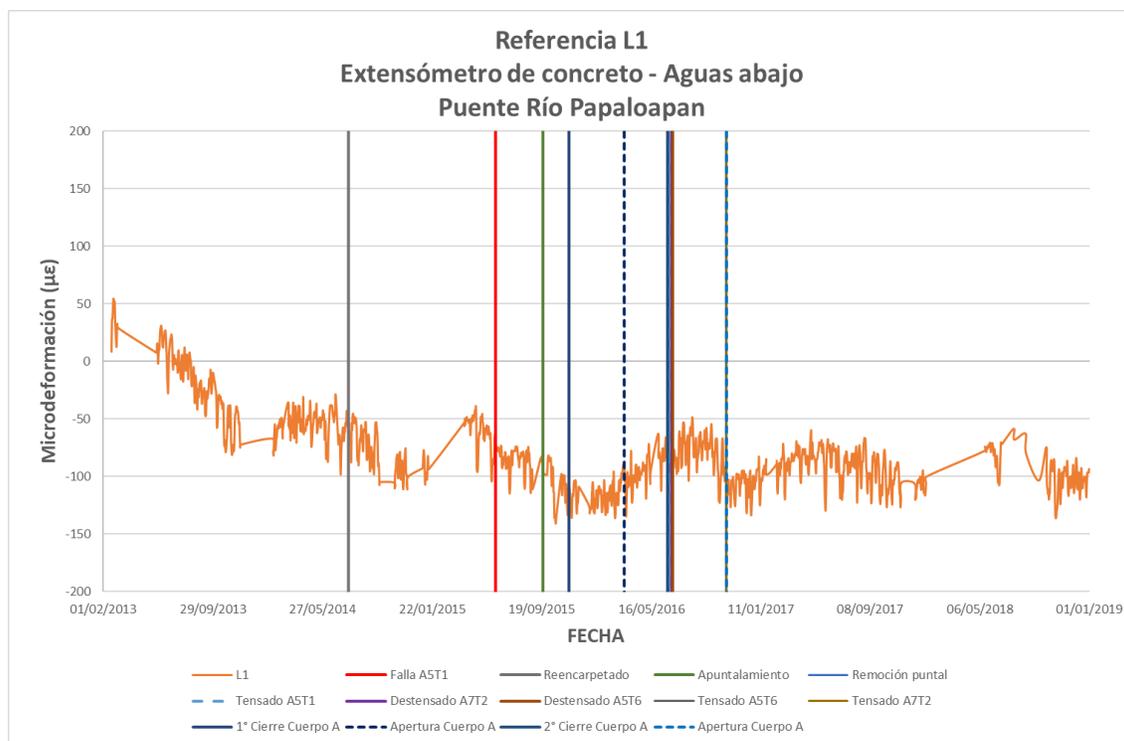


Figura 3.13 Valores de deformación unitaria para el sensor L1.

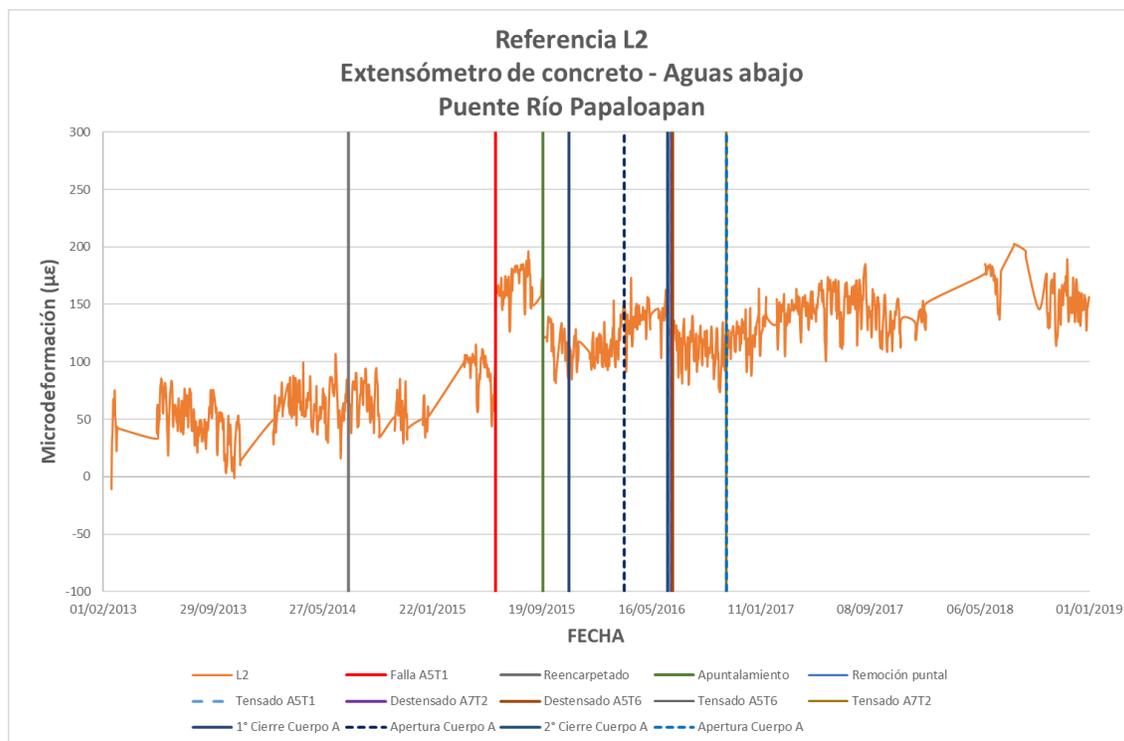


Figura 3.14 Valores de deformación unitaria para el sensor L2.

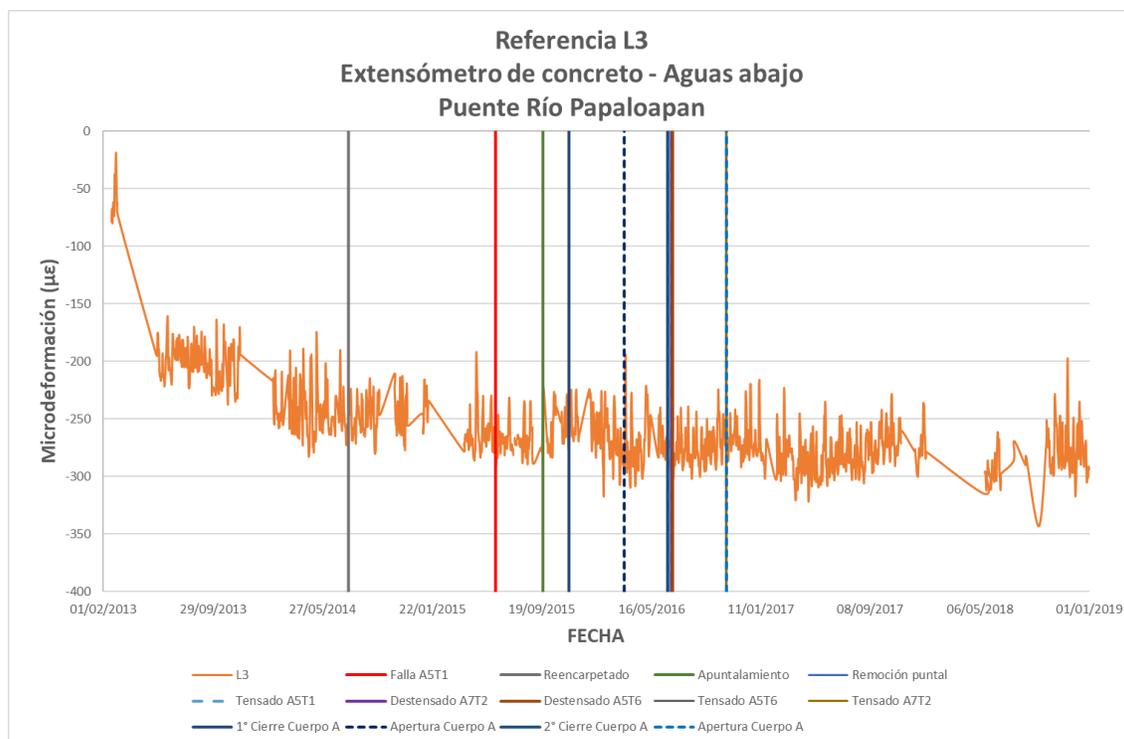


Figura 3.15 Valores de deformación unitaria para el sensor L3.

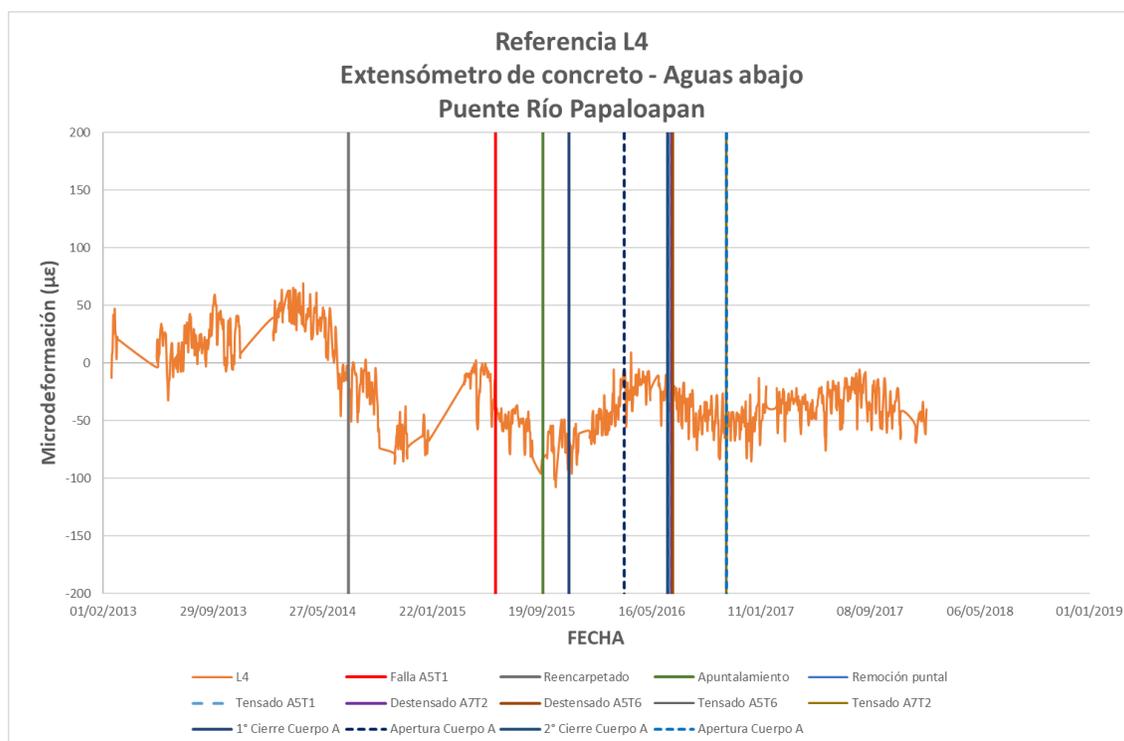
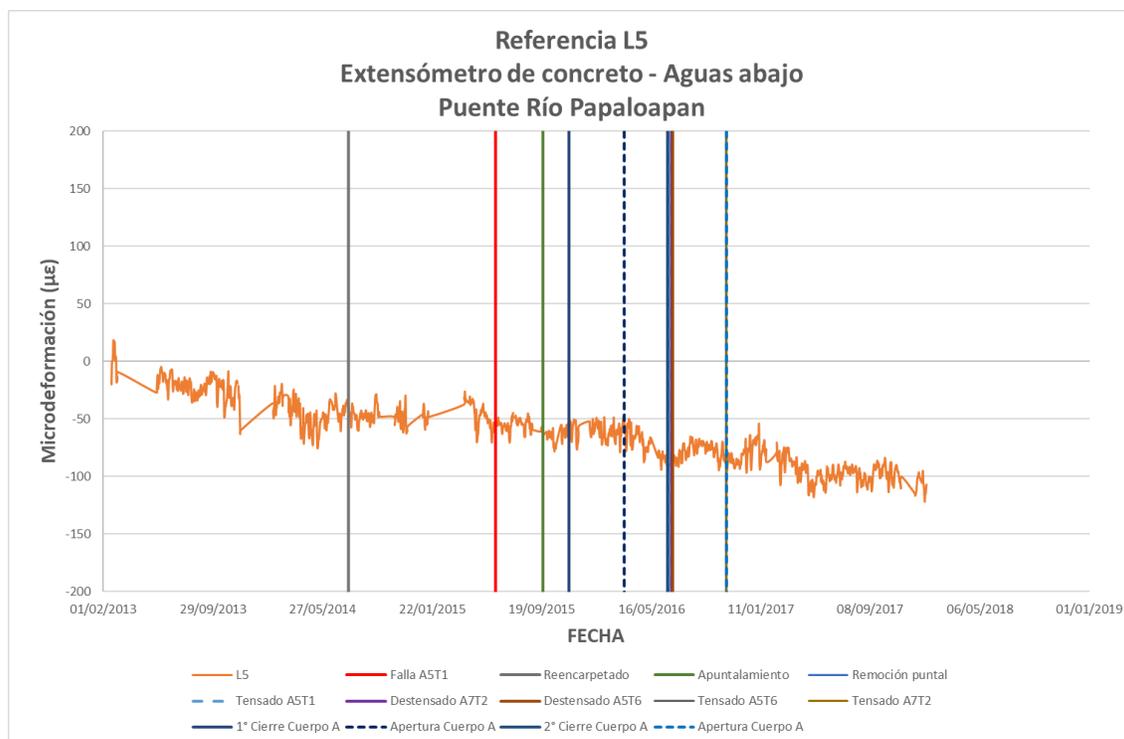
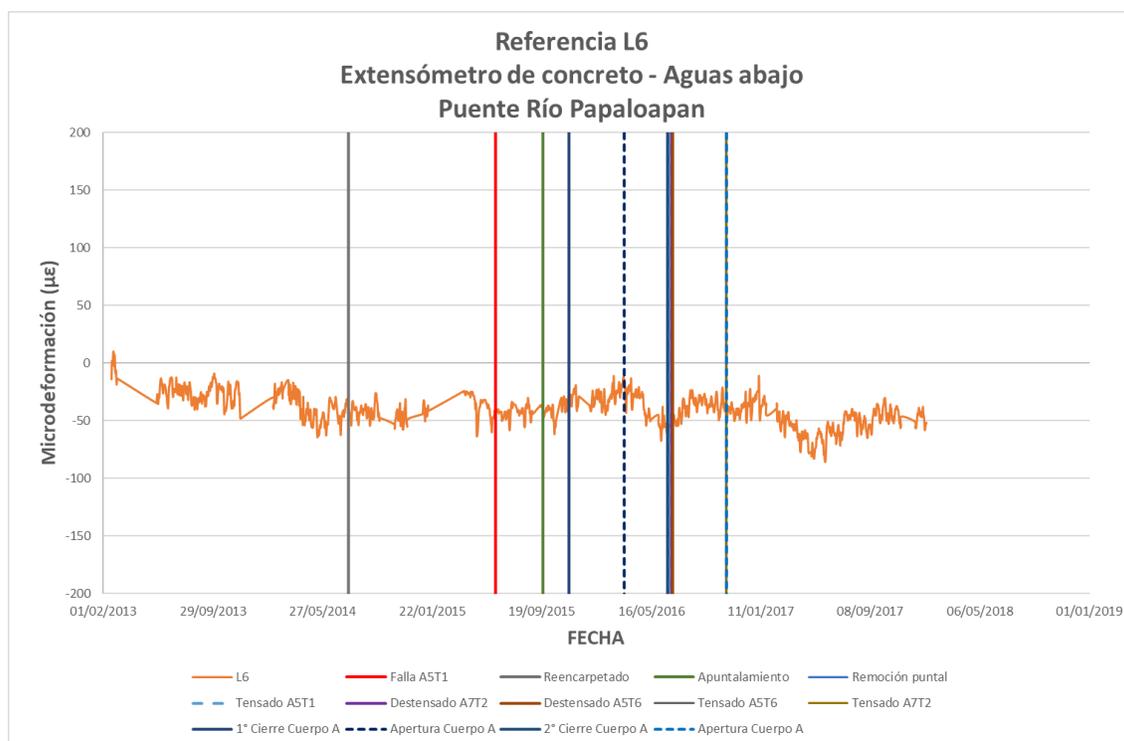


Figura 3.16 Valores de deformación unitaria para el sensor L4.



**Figura 3.17** Valores de deformación unitaria para el sensor L5.



**Figura 3.18** Valores de deformación unitaria para el sensor L6.

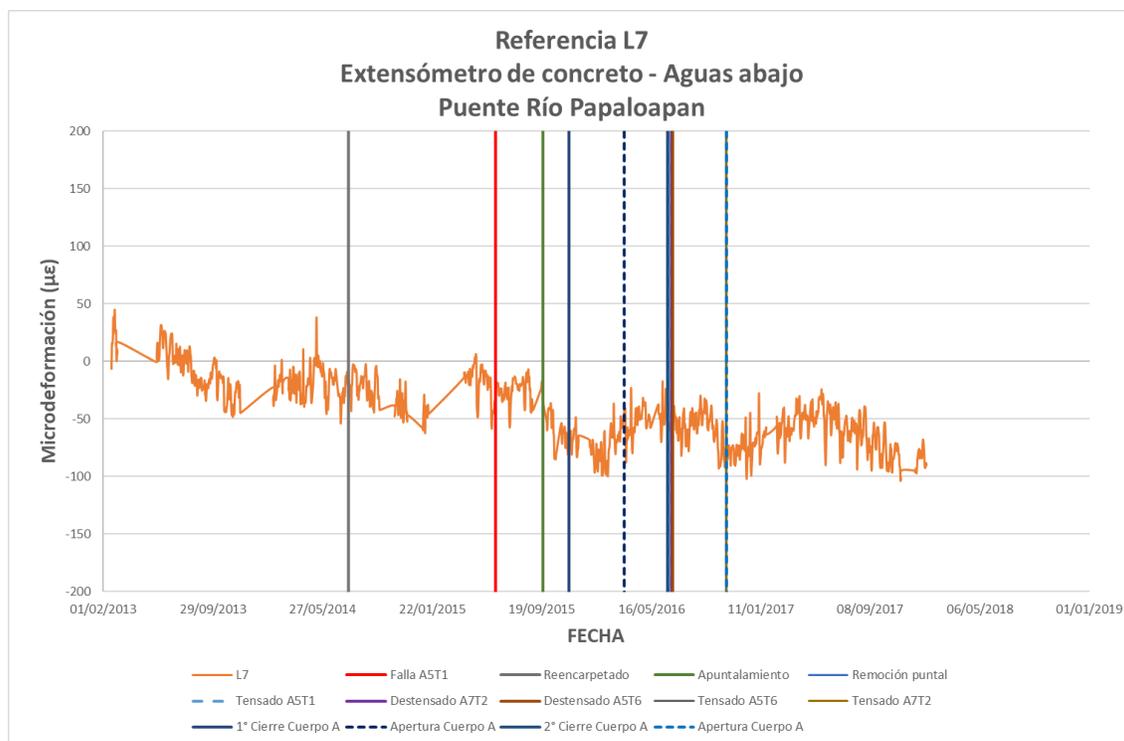


Figura 3.19 Valores de deformación unitaria para el sensor L7.

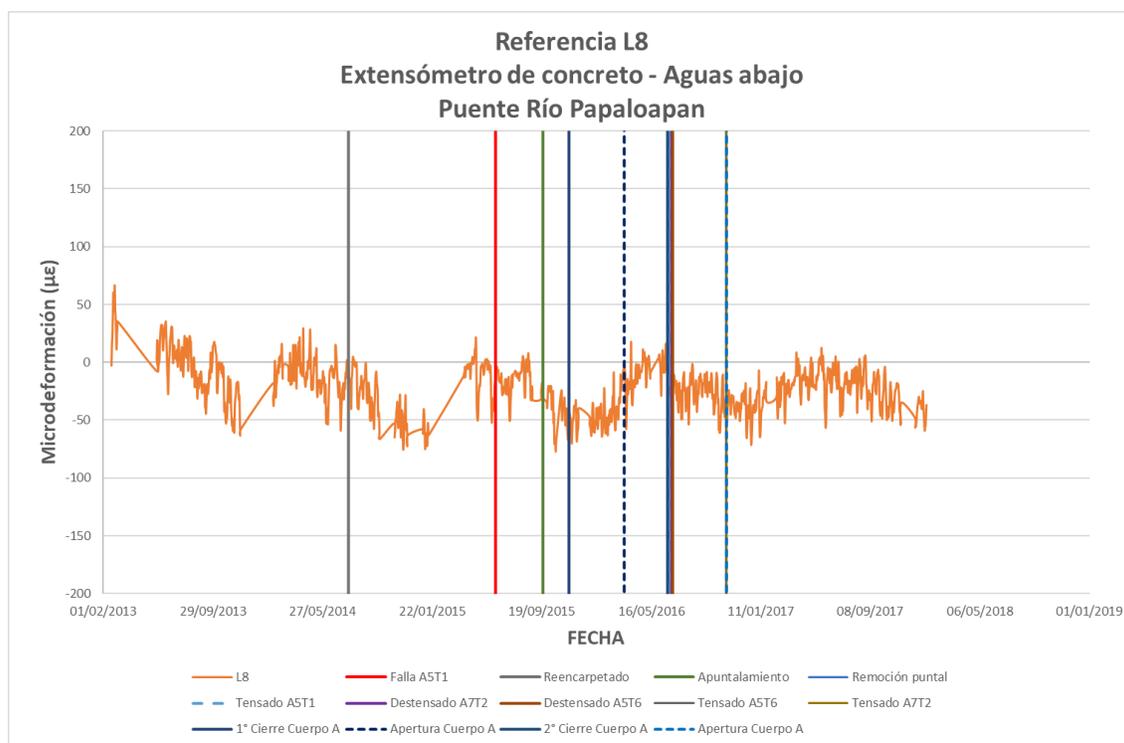
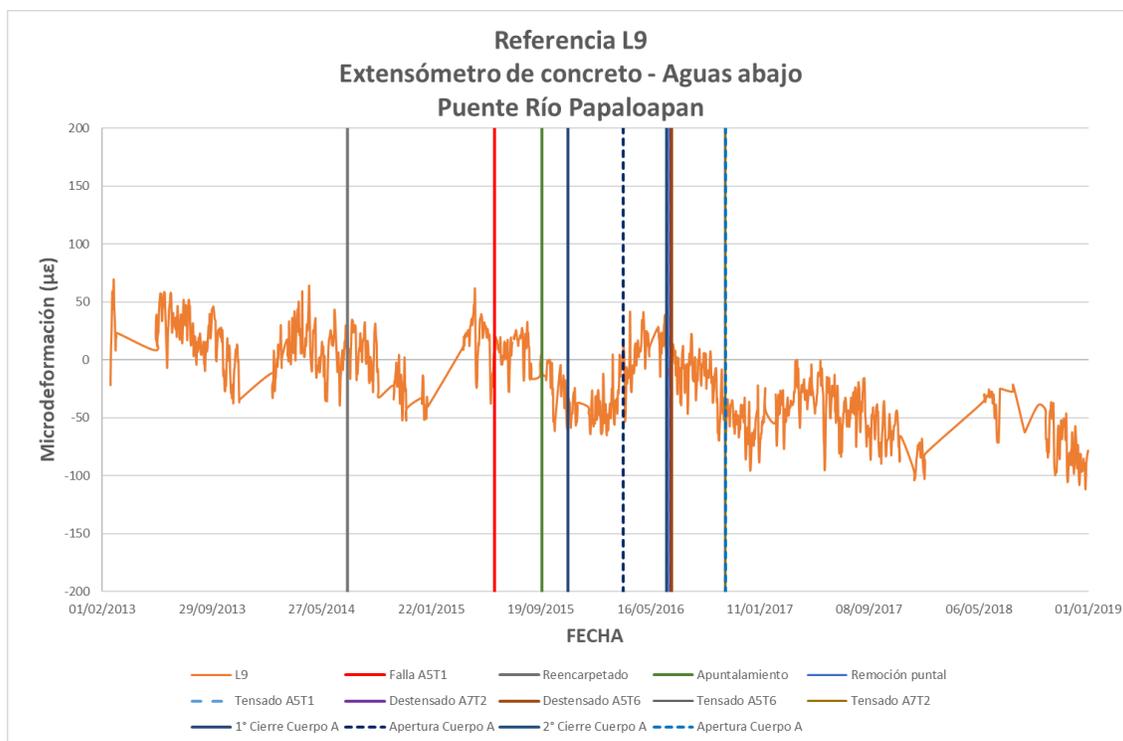
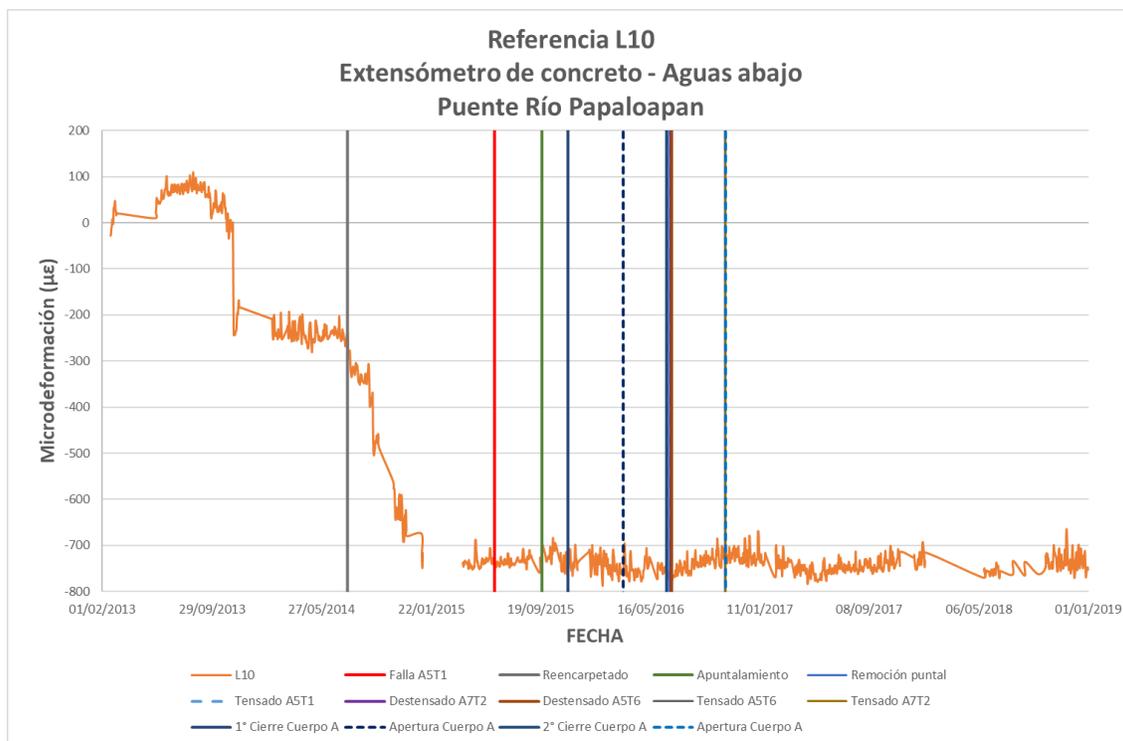


Figura 3.20 Valores de deformación unitaria para el sensor L8.



**Figura 3.21** Valores de deformación unitaria para el sensor L9.



**Figura 3.22** Valores de deformación unitaria para el sensor L10.

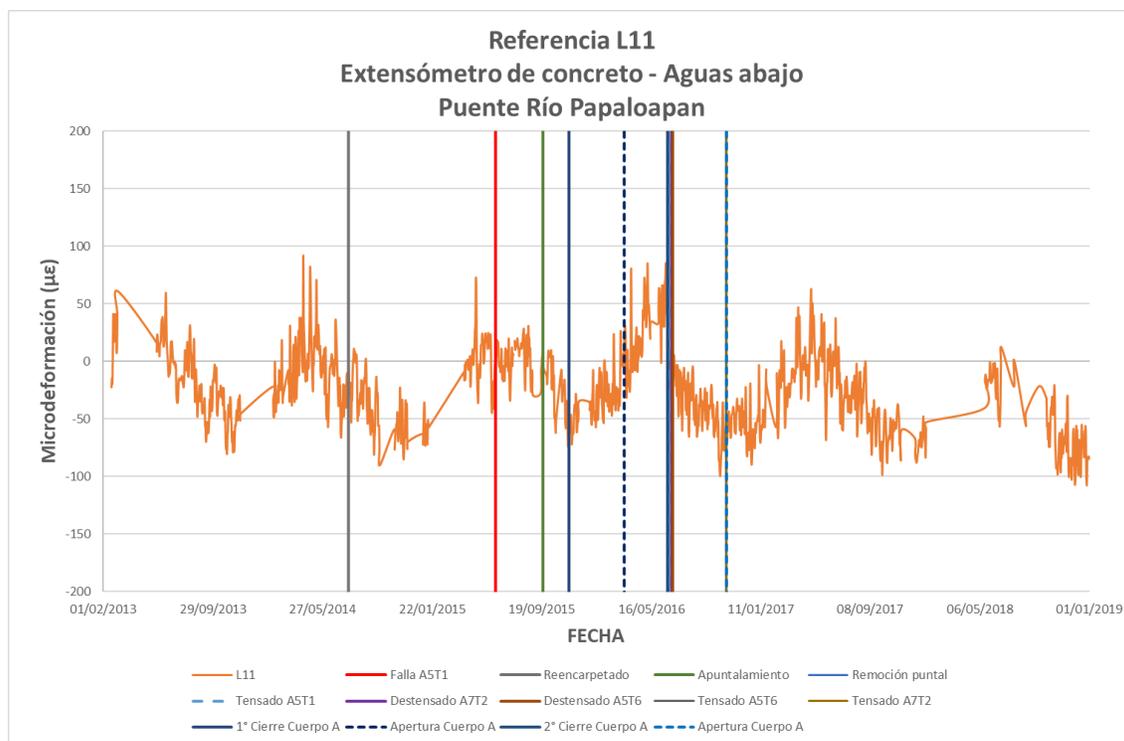


Figura 3.23 Valores de deformación unitaria para el sensor L11.

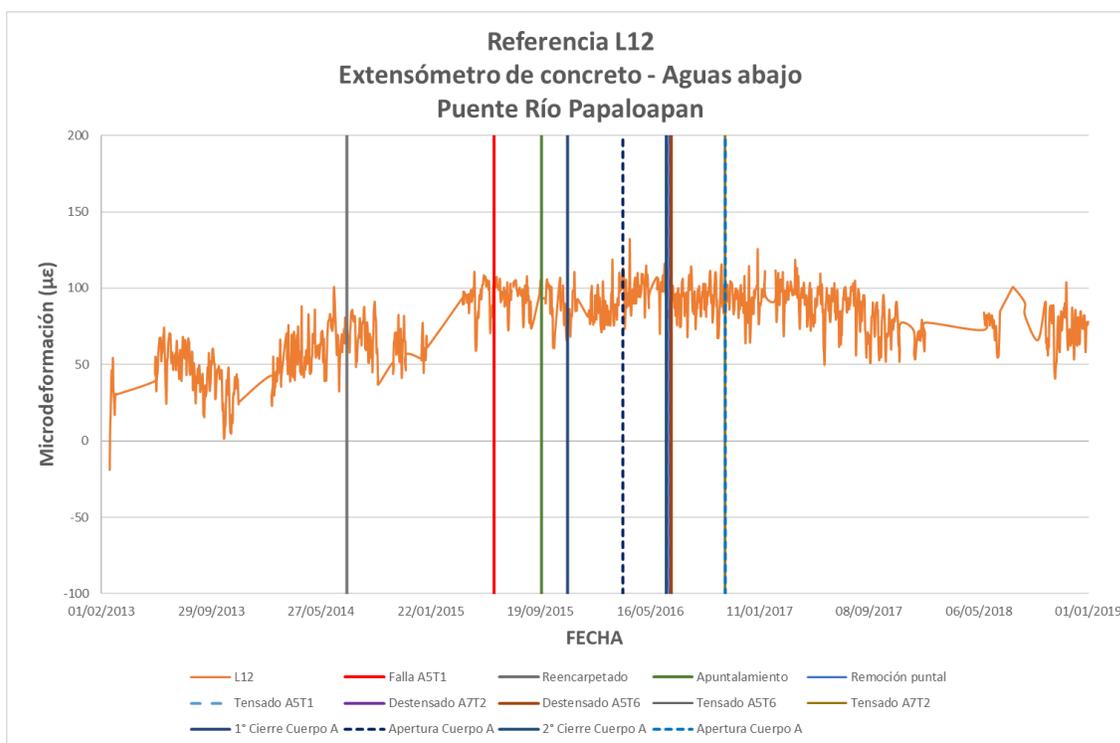


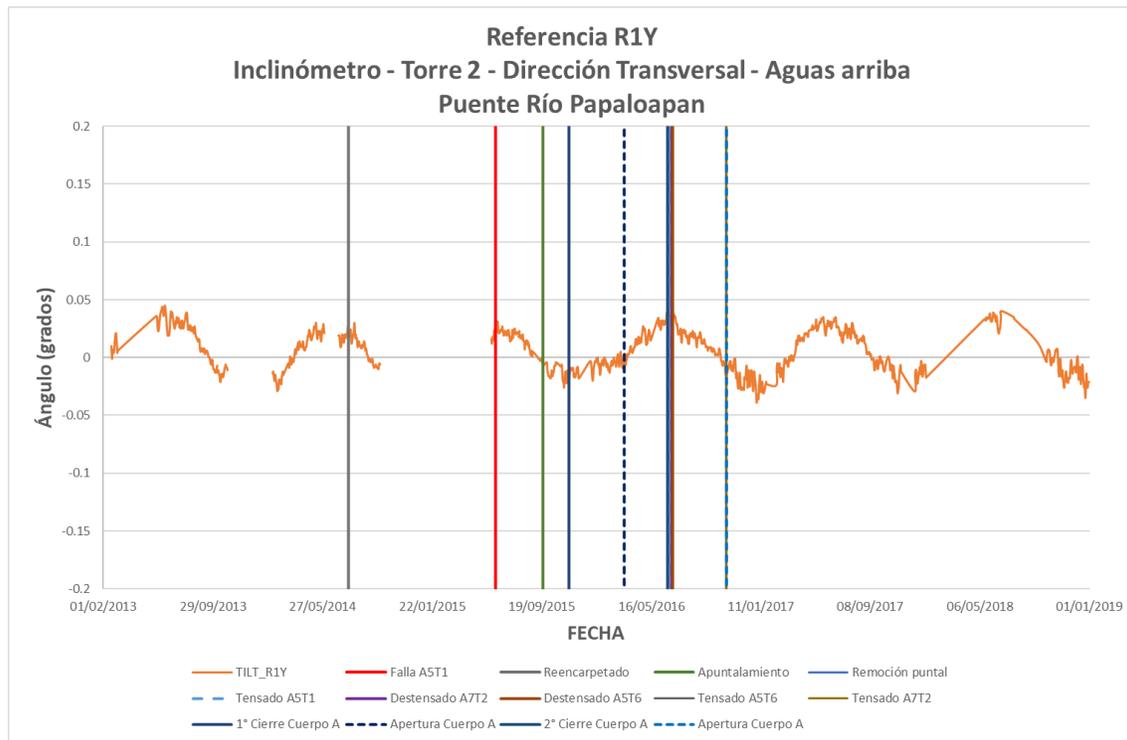
Figura 3.24 Valores de deformación unitaria para el sensor L12.

Es necesario el mantenimiento de uno de los canales del sistema de monitoreo, este canal se encuentra ubicado aguas bajo y contiene la información de los sensores de deformación L4, L5, L6, L7 y L8. Debido a la ruptura del cable de fibra óptica no ha sido posible obtener información de estos sensores. El mantenimiento del sistema de este canal está programado para el primer trimestre del año 2019.

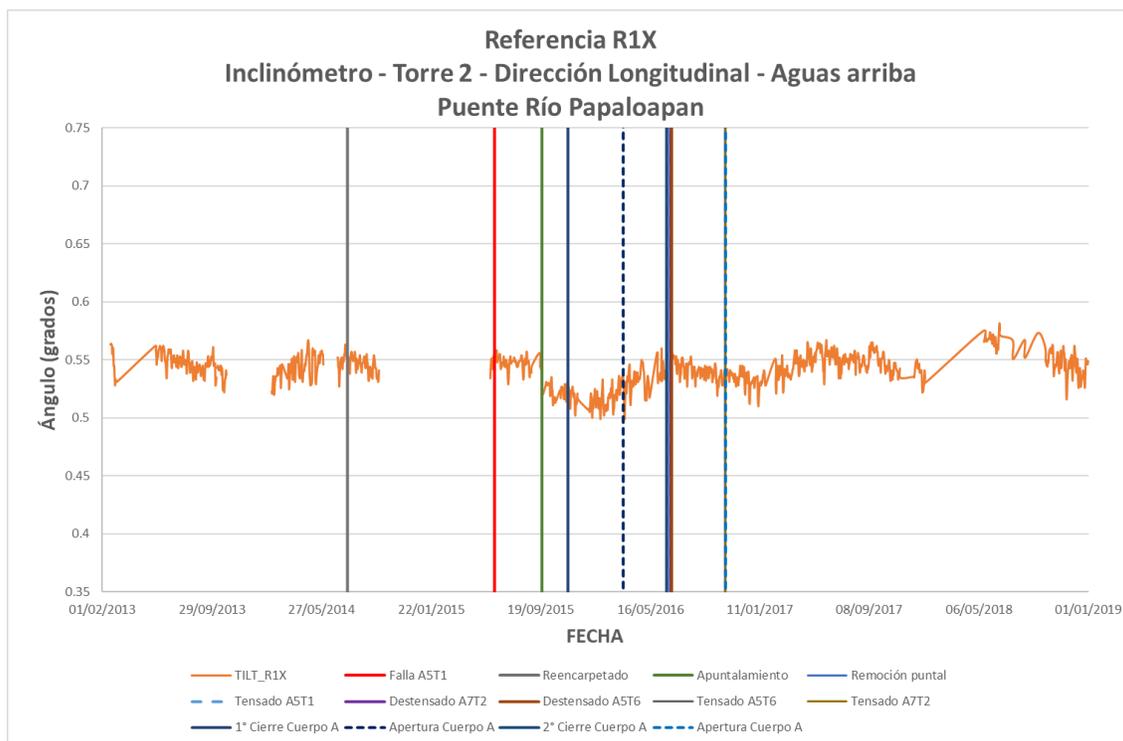
Como se puede observar en las gráficas de las figuras 3.1 al 3.24 los sensores R2, R4 y R5 que están ubicados en la semi arpa 5 y la semi arpa 6 no regresaron a su valor de referencia después del mantenimiento realizado para reparar el tirante 1 de la semi arpa 5. Lo anterior se debe en parte a que la tensión final del tirante 1 de la semi arpa 5 quedó 20 toneladas por debajo de su valor antes de la falla. La diferencia en la medición de la tensión de este cable es consecuencia de la metodología empleada para determinar la tensión a través de sistemas hidráulicos, la cual debe ser revisada para que los valores de incertidumbre de la medición sean menores. El valor de una tensión menor en el tirante 1 de la semi arpa 5 fue analizado no solo por los valores de deformación finales de los extensómetros mencionados, sino también, como se analizará más adelante, por la redistribución de tensiones en los tirantes aledaños.

De la información del comportamiento de los sensores de deformación durante el año 2019, no se observan cambios significativos en su línea de referencia, por lo que se puede concluir que el comportamiento estructural el puente es el esperado bajo condiciones de operación normal.

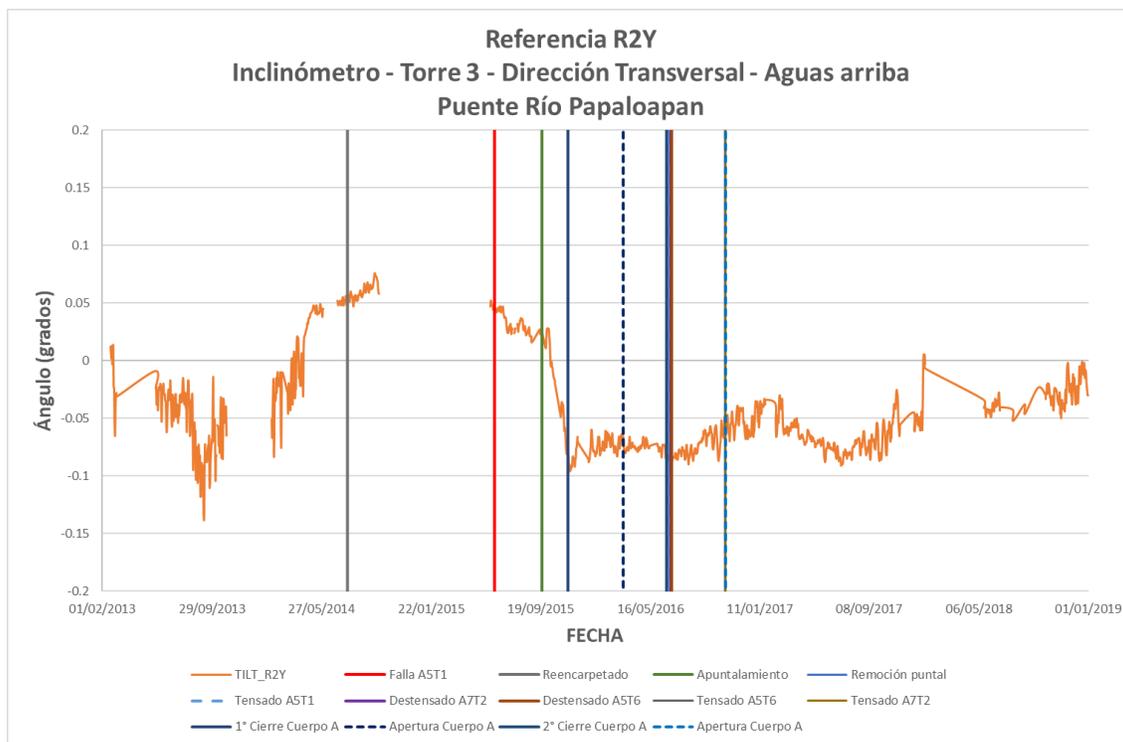
Las figuras 3.25 a 3.32 muestran la información de ocho inclinómetros instalados en el puente Río Papaloapan.



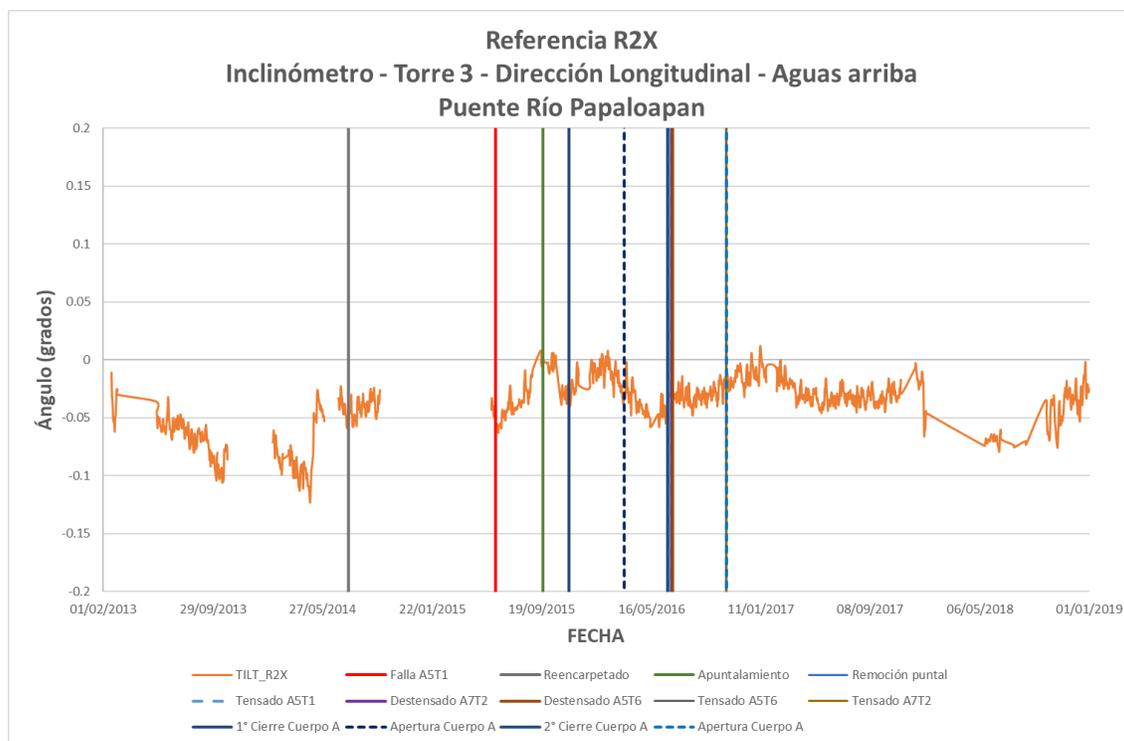
**Figura 3.25 Valores de inclinación en el plano YZ del sensor R1Y.**



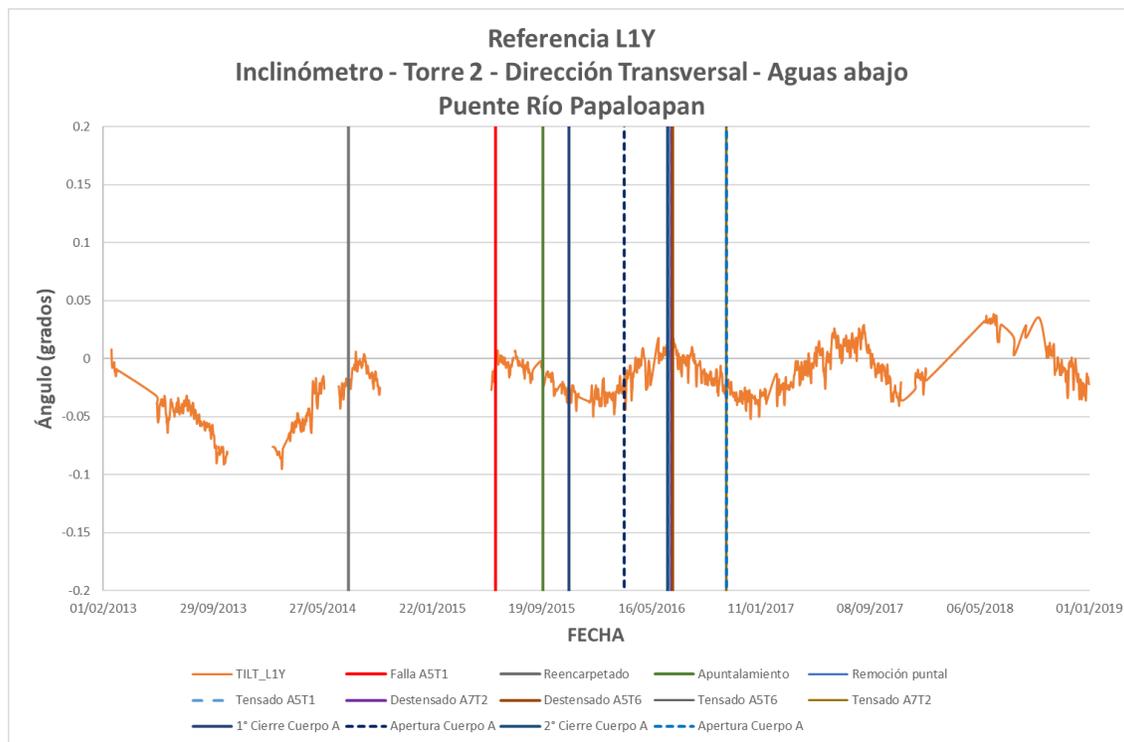
**Figura 3.26 Valores de inclinación en el plano XZ del sensor R1X.**



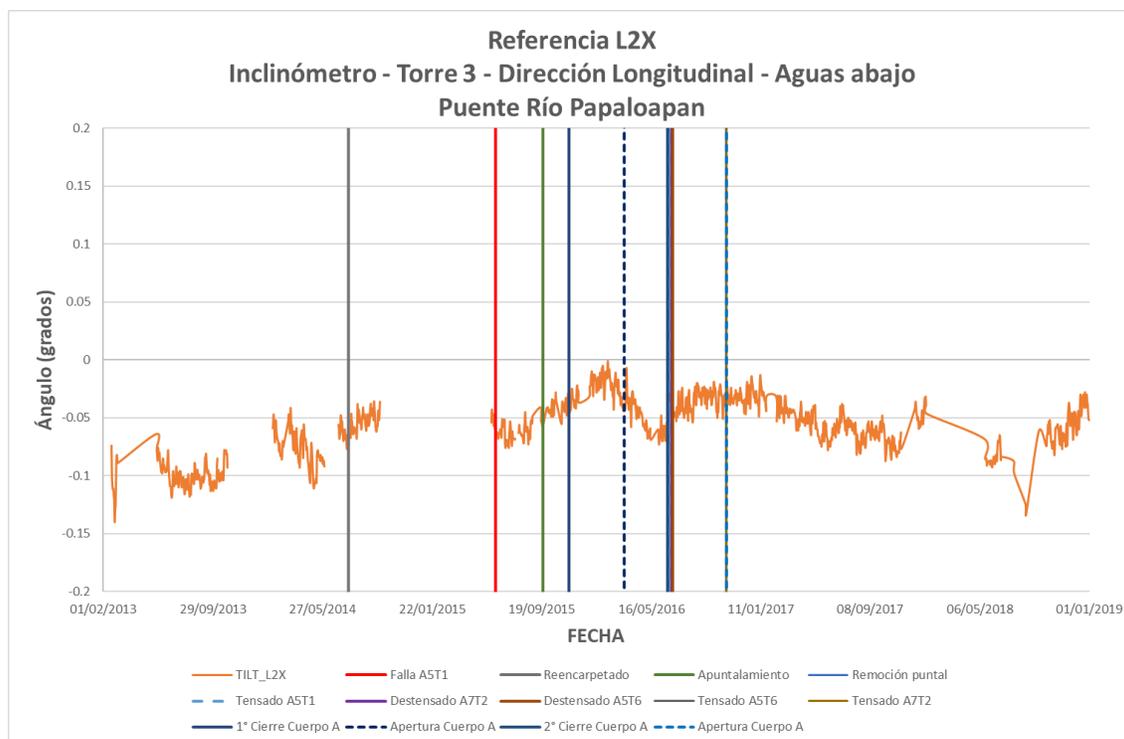
**Figura 3.27 Valores de inclinación en el plano YZ del sensor R2Y.**



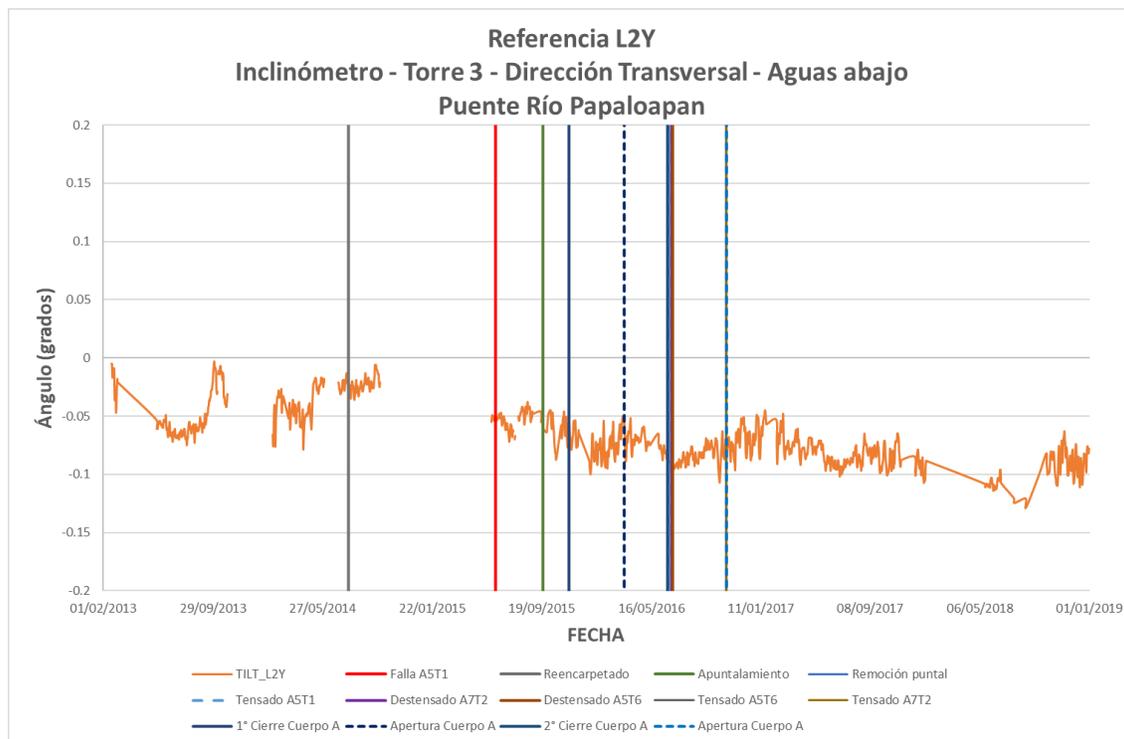
**Figura 3.28** Valores de inclinación en el plano XZ del sensor R2X.



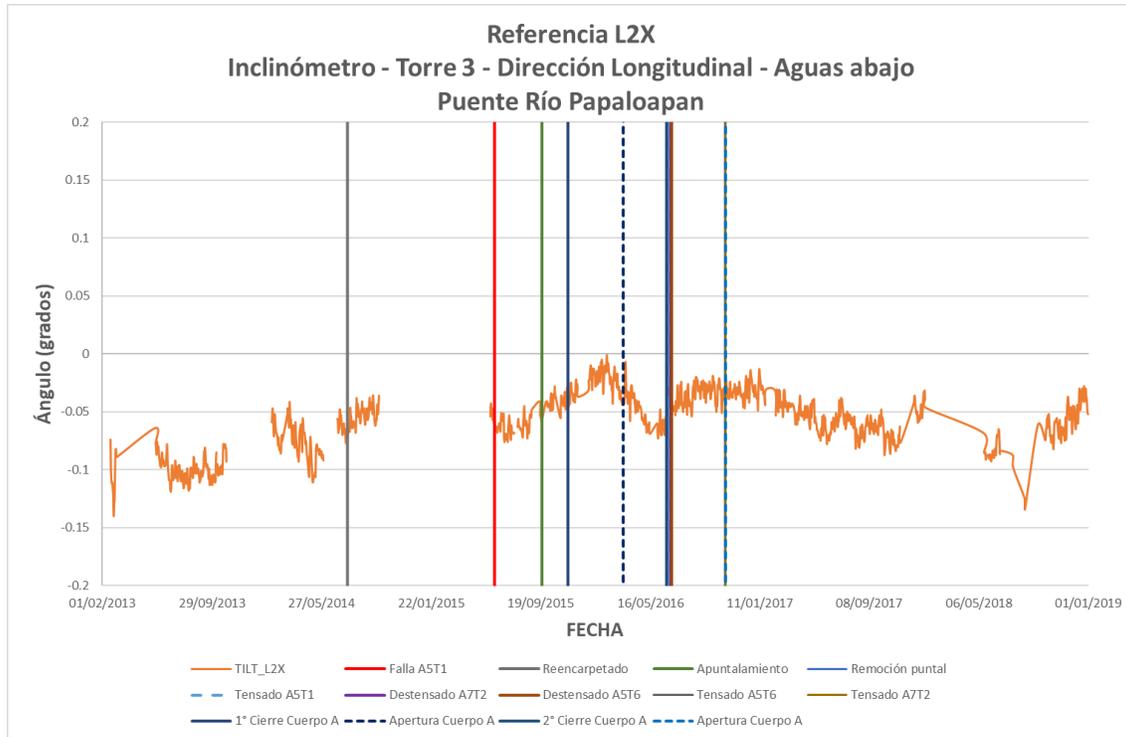
**Figura 3.29** Valores de inclinación en el plano YZ del sensor L1Y.



**Figura 3.30 Valores de inclinación en el plano XZ del sensor L2X.**



**Figura 3.31 Valores de inclinación en el plano YZ del sensor L2Y.**



**Figura 3.32 Valores de inclinación en el plano XZ del sensor L2X.**

La instalación del sistema de monitoreo incluye 16 acelerómetros, ocho de ellos colocados en los tirantes 4 y 11 de las ocho semi-arpas (ver figura 2.2), de la información obtenida de estos ocho sensores se ha realizado el monitoreo de las tensiones de los tirantes instrumentados en forma continua y se han detectado dos eventos importantes: el primero, en junio de 2014, cuando se hizo el mantenimiento de la carpeta asfáltica del puente que provocó un incremento de tensión de los tirantes en aproximadamente 1.5 toneladas; y el segundo, la falla del tirante 1, semi-arpa 5, el 10 de junio de 2015.

En las figuras 3.33 a 3.48, se muestran las gráficas de los valores de la media estadística de las tensiones calculadas en periodos de 15 días, con mediciones de 3 minutos cada una. Cabe aclarar que, para cada tirante, el análisis se hace según el tipo de distribución que mejor ajusta en cada caso; por lo tanto, las distribuciones estadísticas pueden ser distintas para cada tirante, pero el valor reportado corresponde a la media de esas distribuciones.

Como puede observarse de los gráficos, las tensiones bajo condiciones de operación normal, después de la falla del tirante 1 de la semi-arpa 5, solo se modificaron en los tirantes 4 de las semi arpas 4, 5 y 6. En el caso de los dos primeros, semi arpa 4 y 5, su carga axial incrementó en promedio 2 y 14 toneladas respectivamente y en el tirante 4 de la semi arpa 6 se registró una pérdida de carga axial de 6 toneladas.

Posterior a la rehabilitación del Puente Río Papaloapan que consistió en el cambio de los elementos de anclaje 1 de la semi arpa 5, 6 de la semi arpa 5 y 2 de la semi arpa 7 se pueden observar cambios en la tensión de los tirantes instrumentados con respecto a su condición antes del daño menores a 4 toneladas, con excepción del tirante 4 de la semi arpa 7, que registró un cambio de 8 toneladas, debido a la cercanía del tirante 2 de la semi arpa 7, el cual fue sustituido.

De las mediciones realizadas en 2018 no se observan cambios en las tensiones de los tirantes instrumentados mayores al 5%. Por lo que se puede concluir que no existen cambios que afecten la integridad del puente Río Papaloapan.

Algunos sensores de aceleración dejaron de adquirir datos debido a que durante los trabajos de rehabilitación los cables de fibra óptica fueron dañados por lo que se requiere dar mantenimiento para recuperar la información de estos sensores.

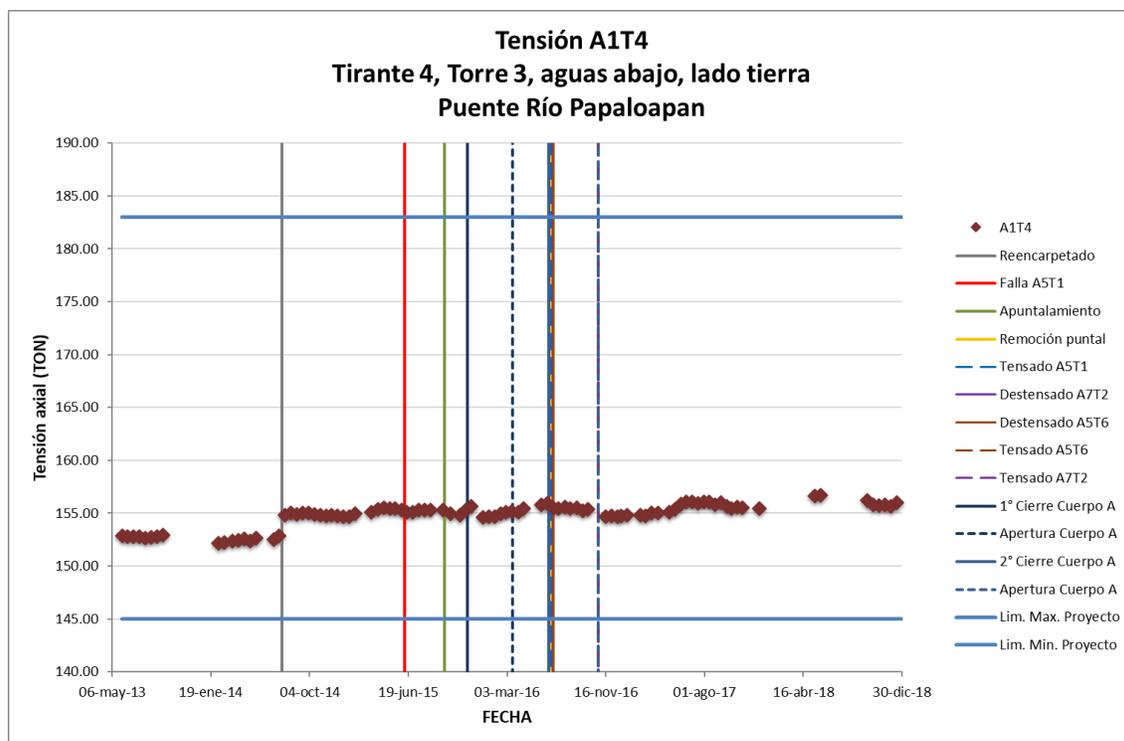


Figura 3.33 Tensión del tirante 4 de la semi arpa 1.

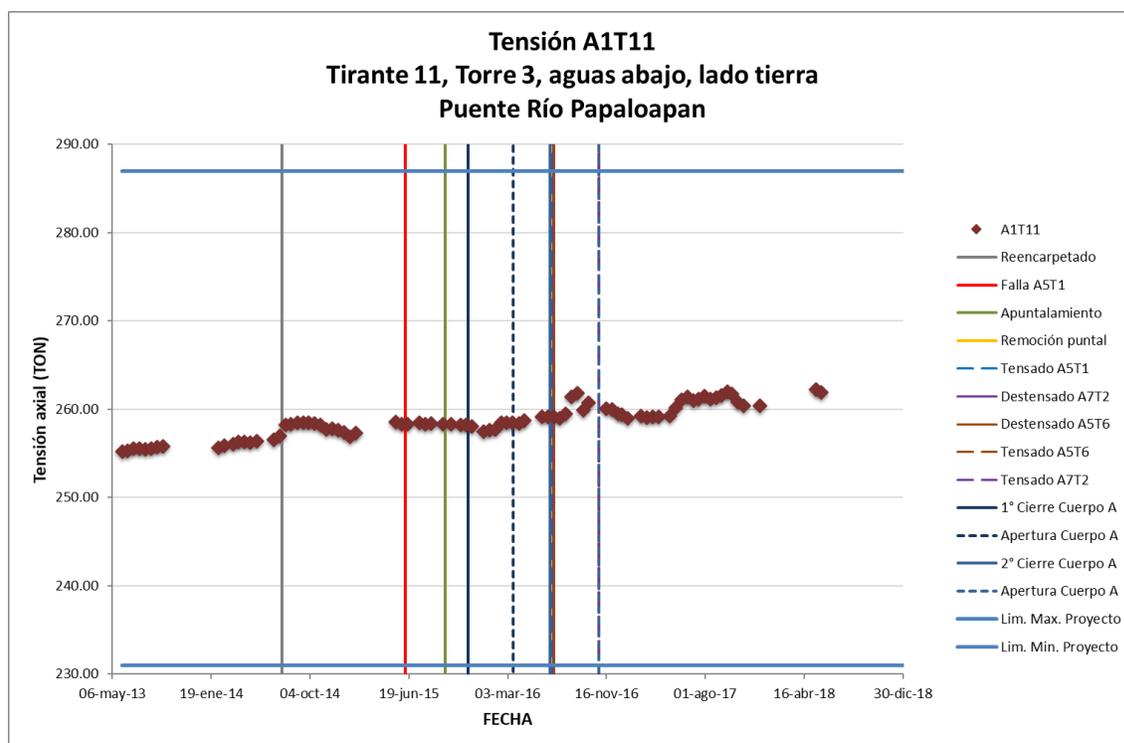


Figura 3.34 Tensión del tirante 11 de la semi arpa 1.

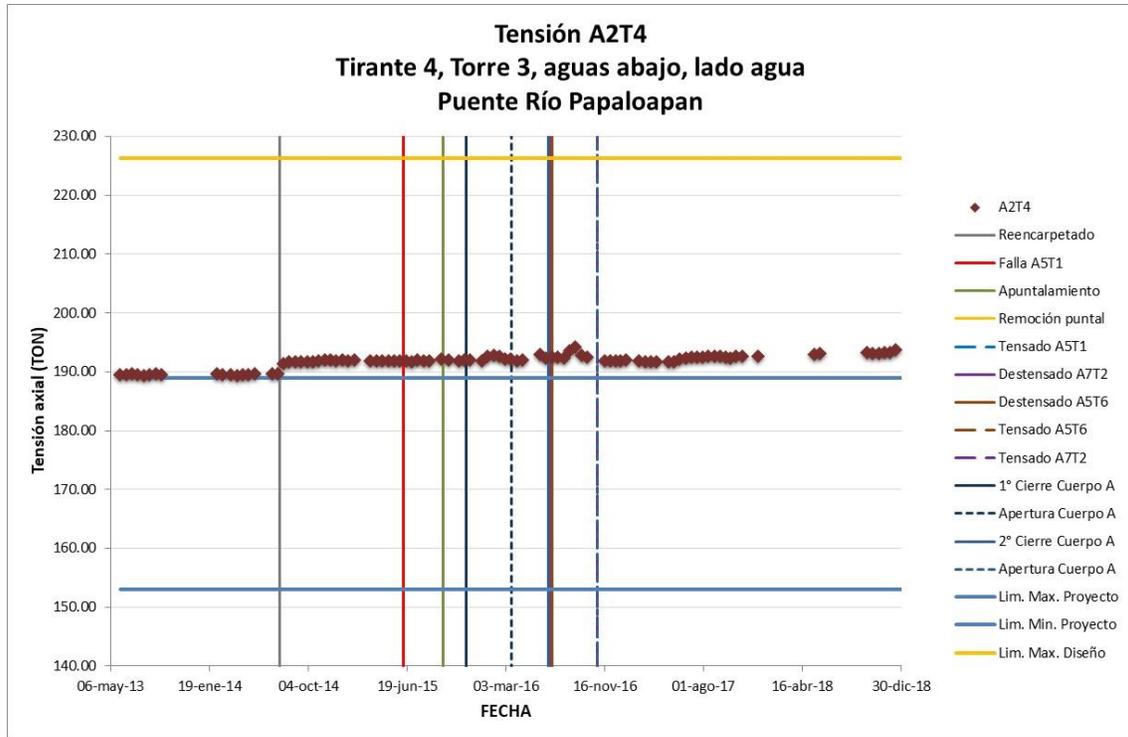


Figura 3.35 Tensión del tirante 4 de la semi arpa 2.

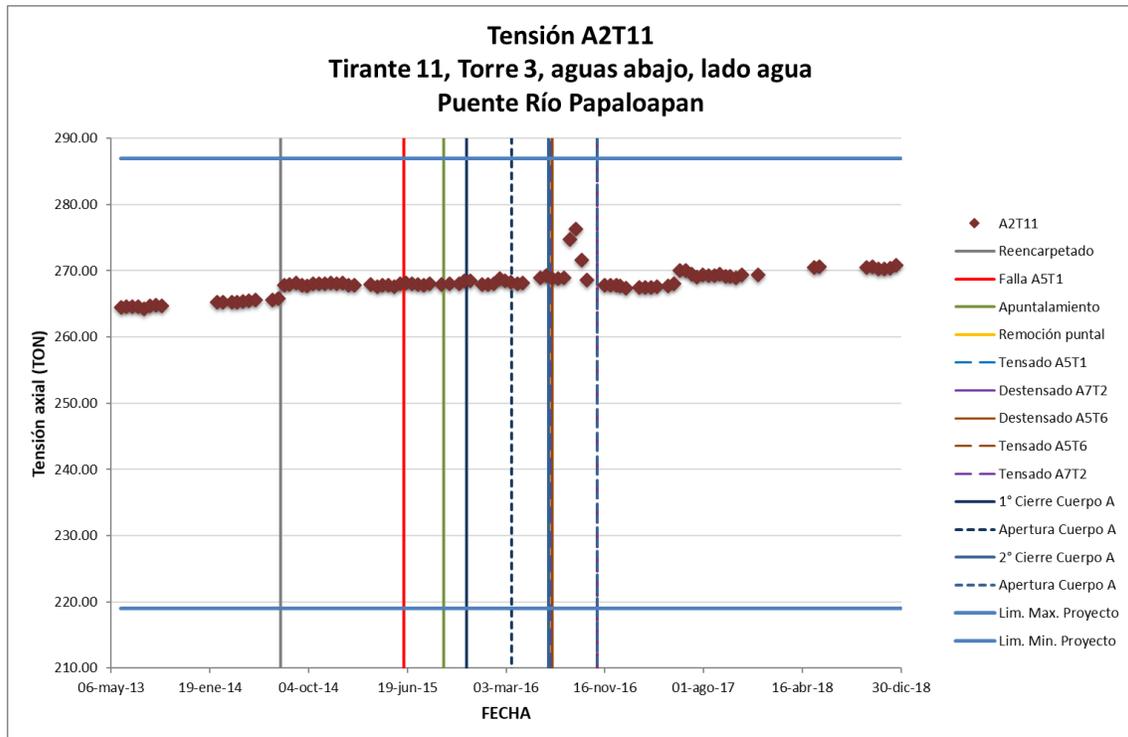


Figura 3.36 Tensión del tirante 11 de la semi arpa 2.

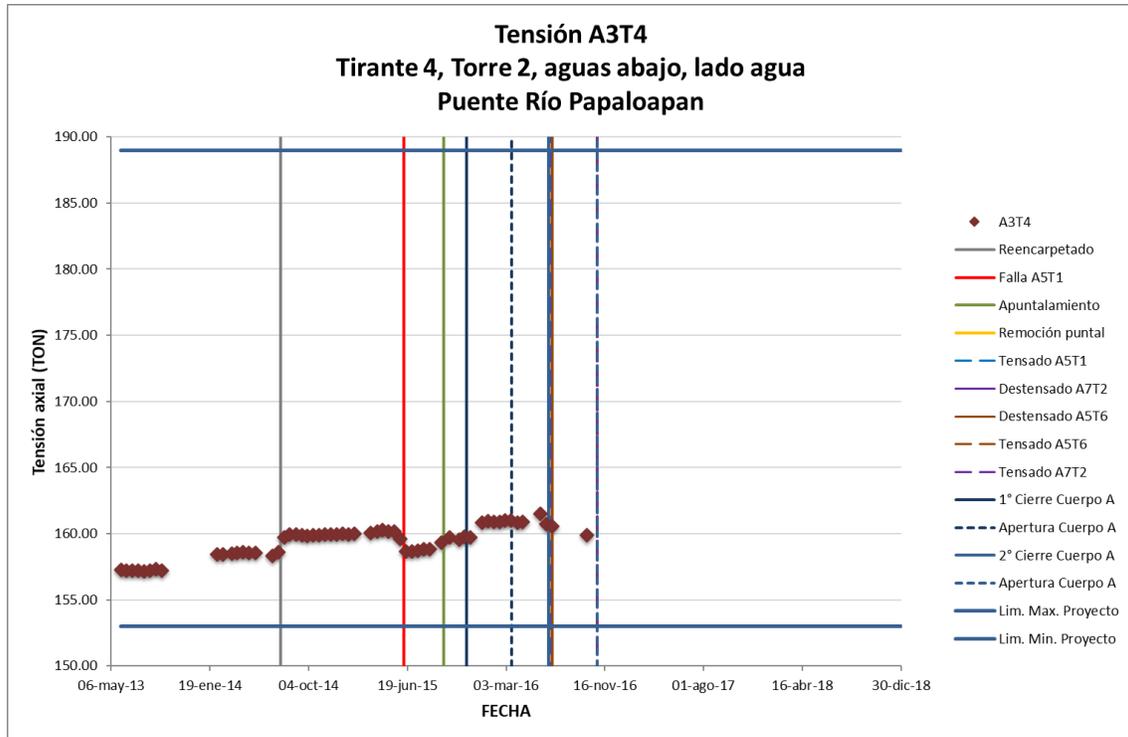


Figura 3.37 Tensión del tirante 4 de la semi arpa 3.

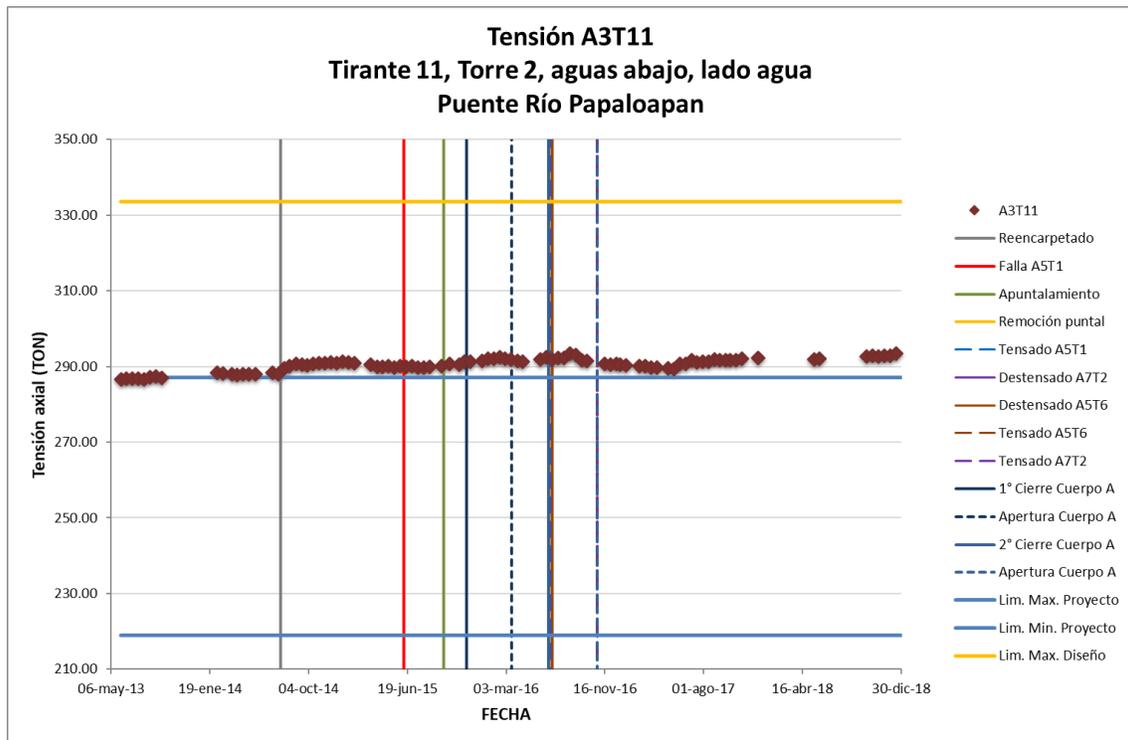


Figura 3.38 Tensión del tirante 11 de la semi arpa 3.

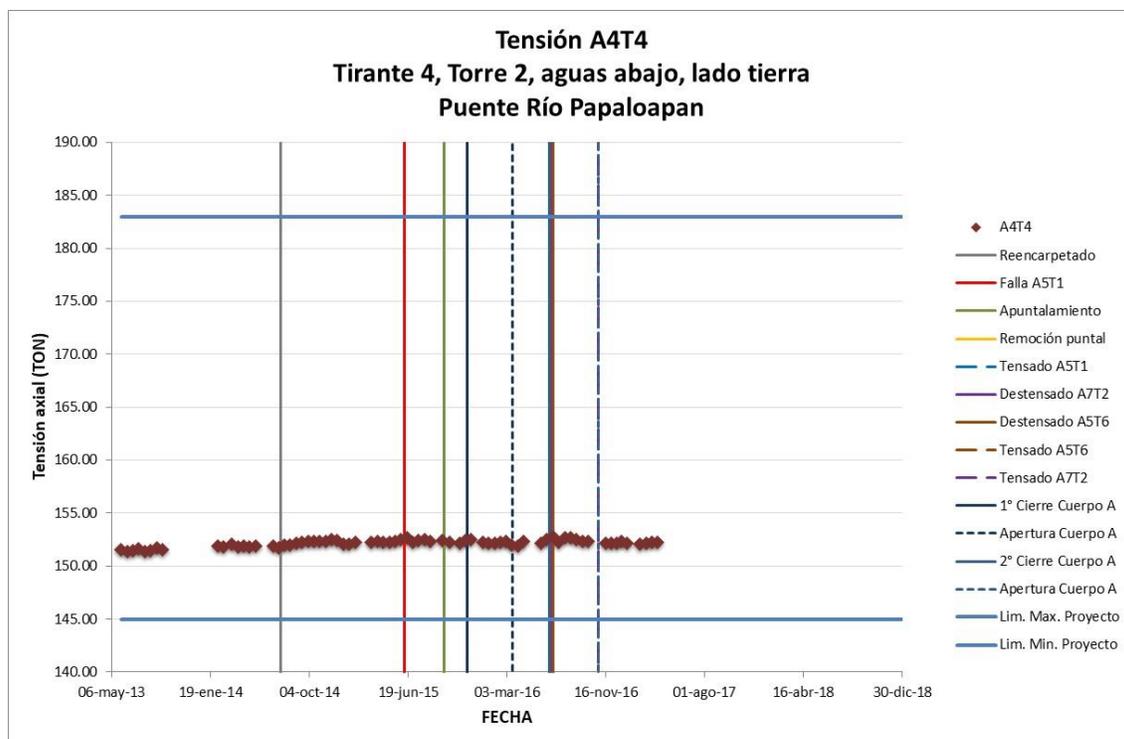


Figura 3.39 Tensión del tirante 4 de la semi arpa 4.

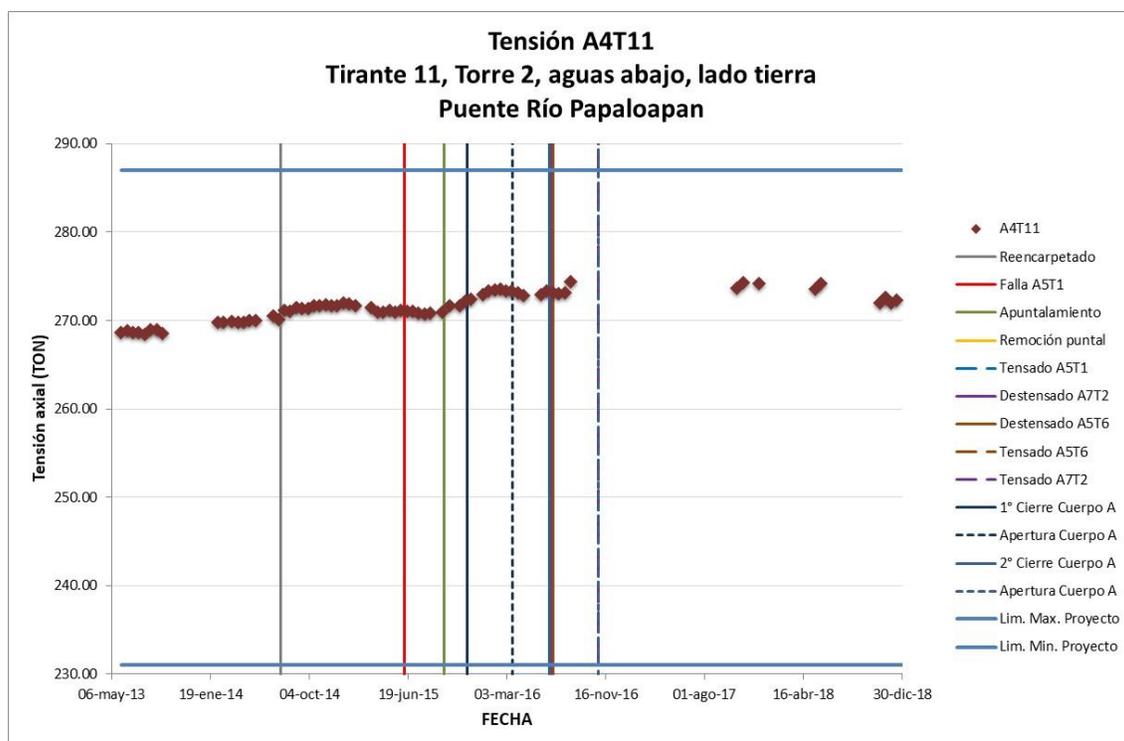


Figura 3.40 Tensión del tirante 11 de la semi arpa 4.

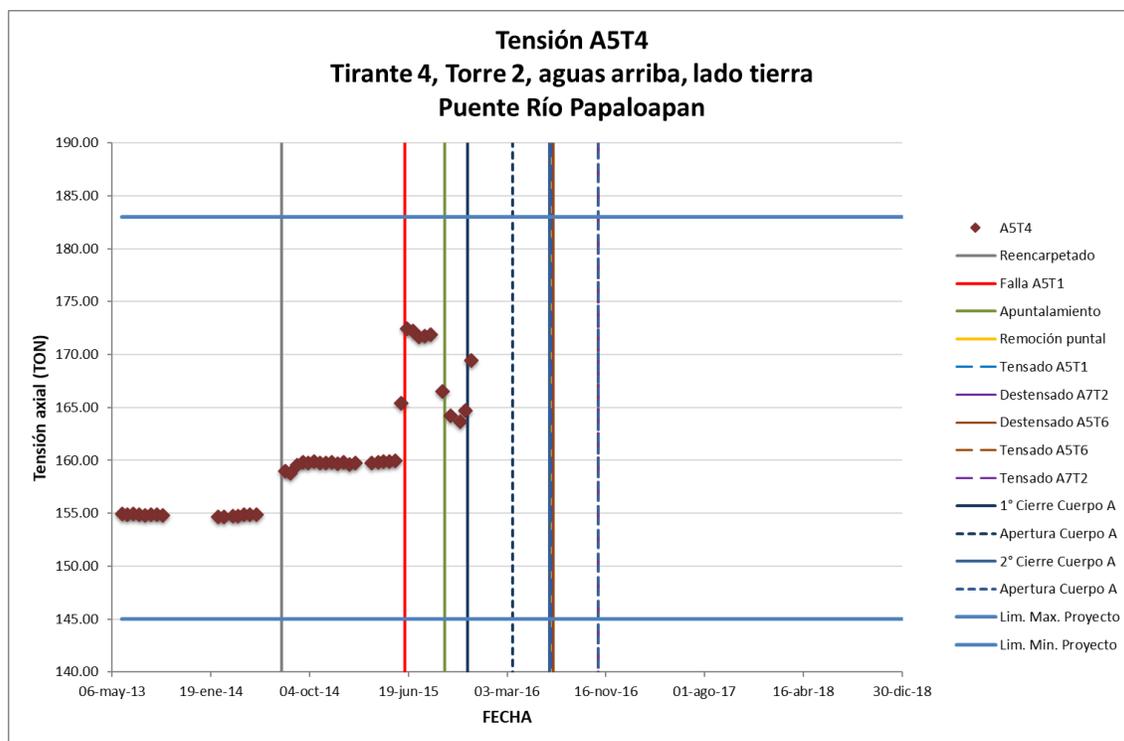


Figura 3.41 Tensión del tirante 4 de la semi arpa 5.

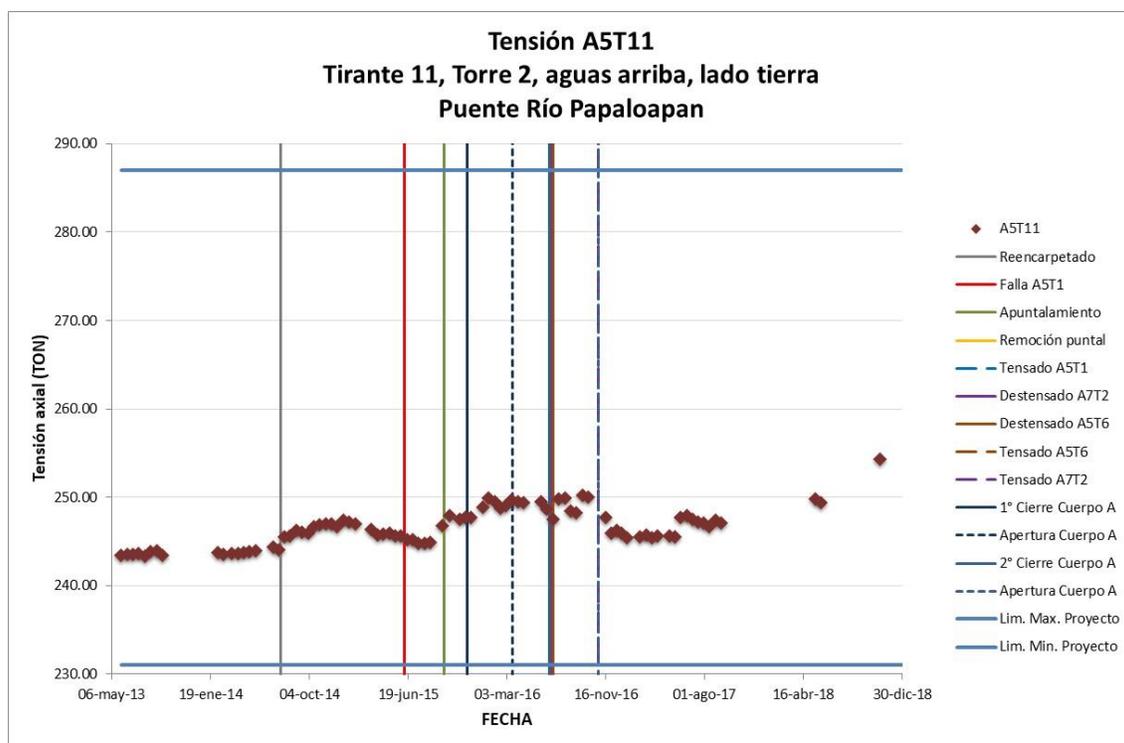


Figura 3.42 Tensión del tirante 11 de la semi arpa 5.

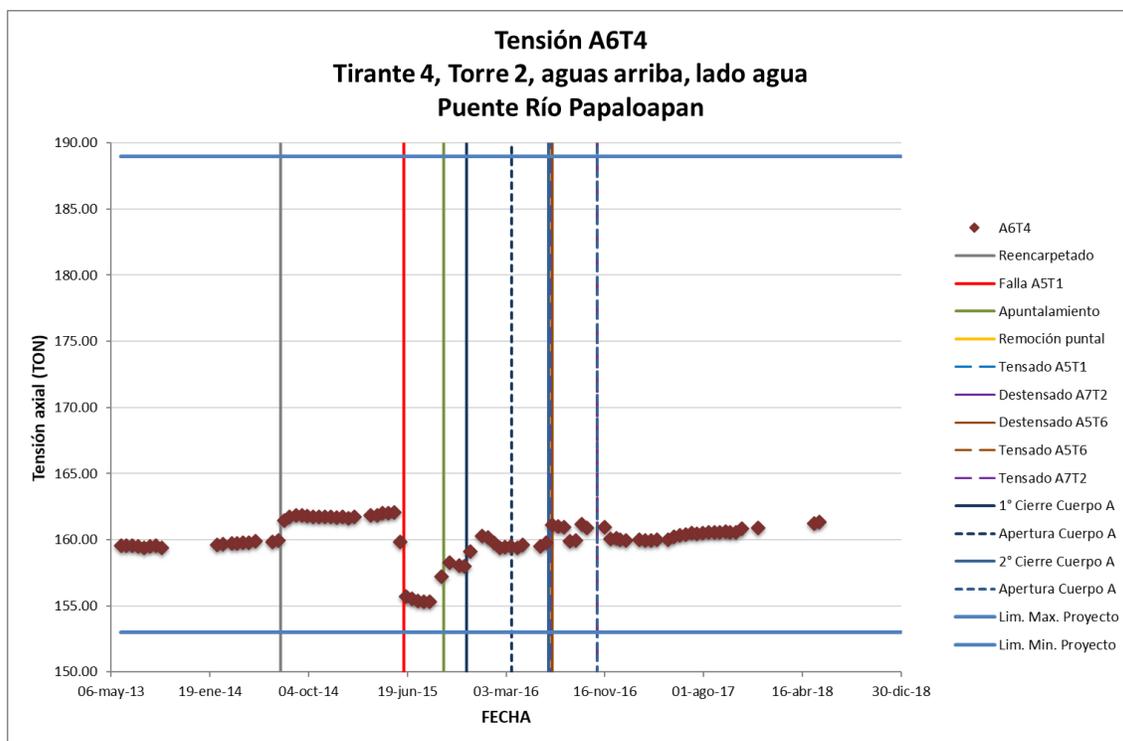


Figura 3.43 Tensión del tirante 4 de la semi arpa 6.

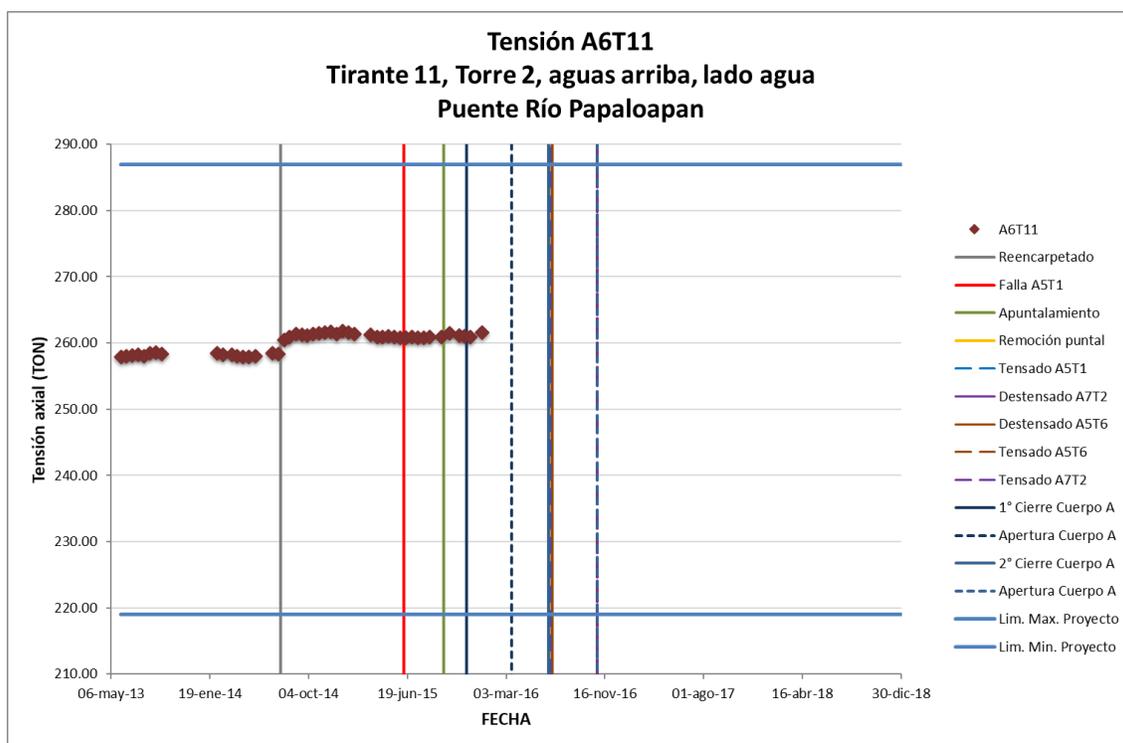


Figura 3.44 Tensión del tirante 11 de la semi arpa 6.

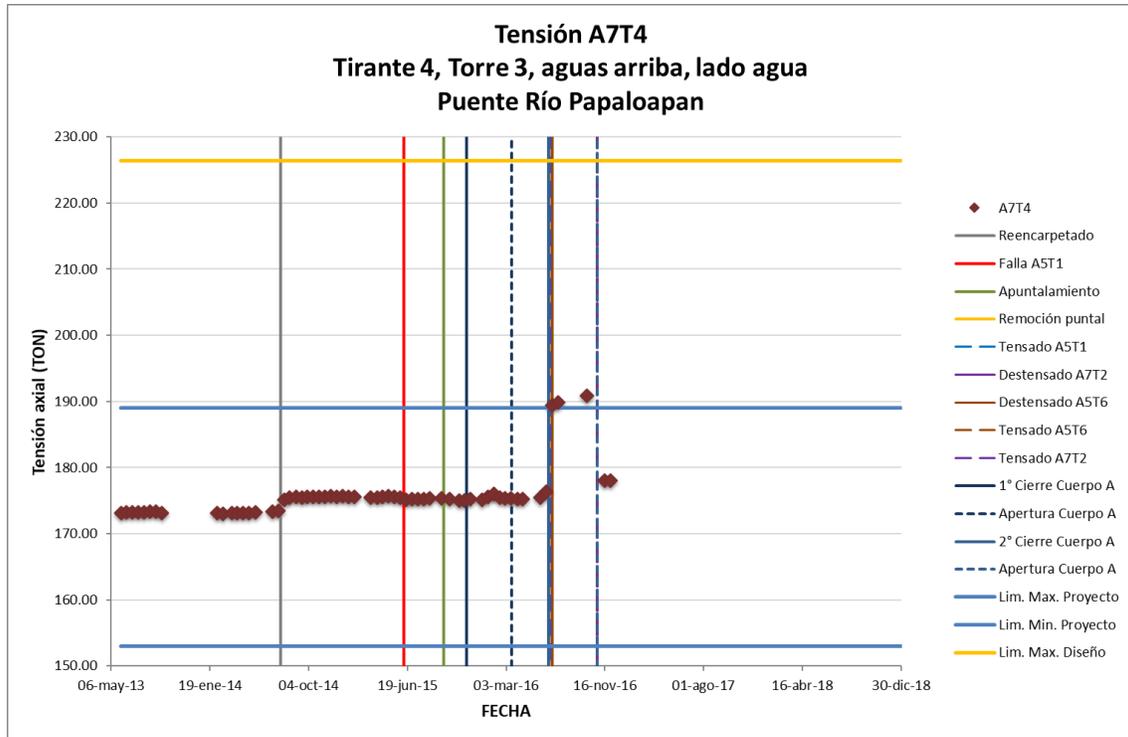


Figura 3.45 Tensión del tirante 4 de la semi arpa 7.

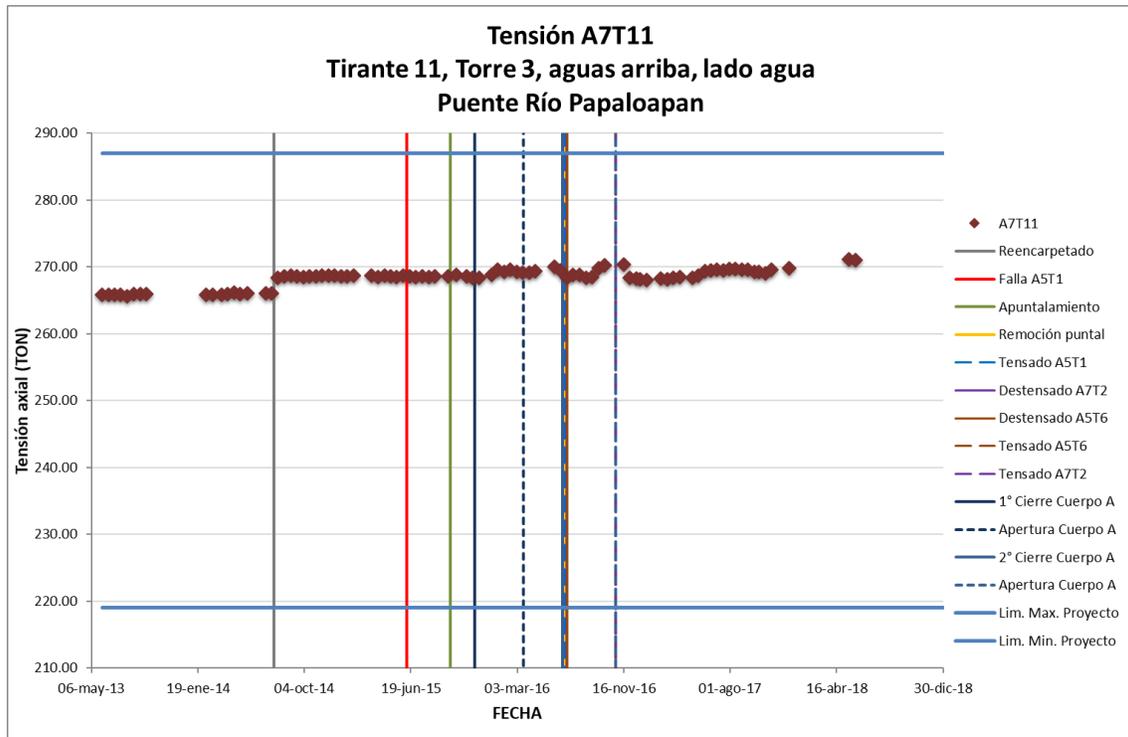


Figura 3.46 Tensión del tirante 11 de la semi arpa 7.

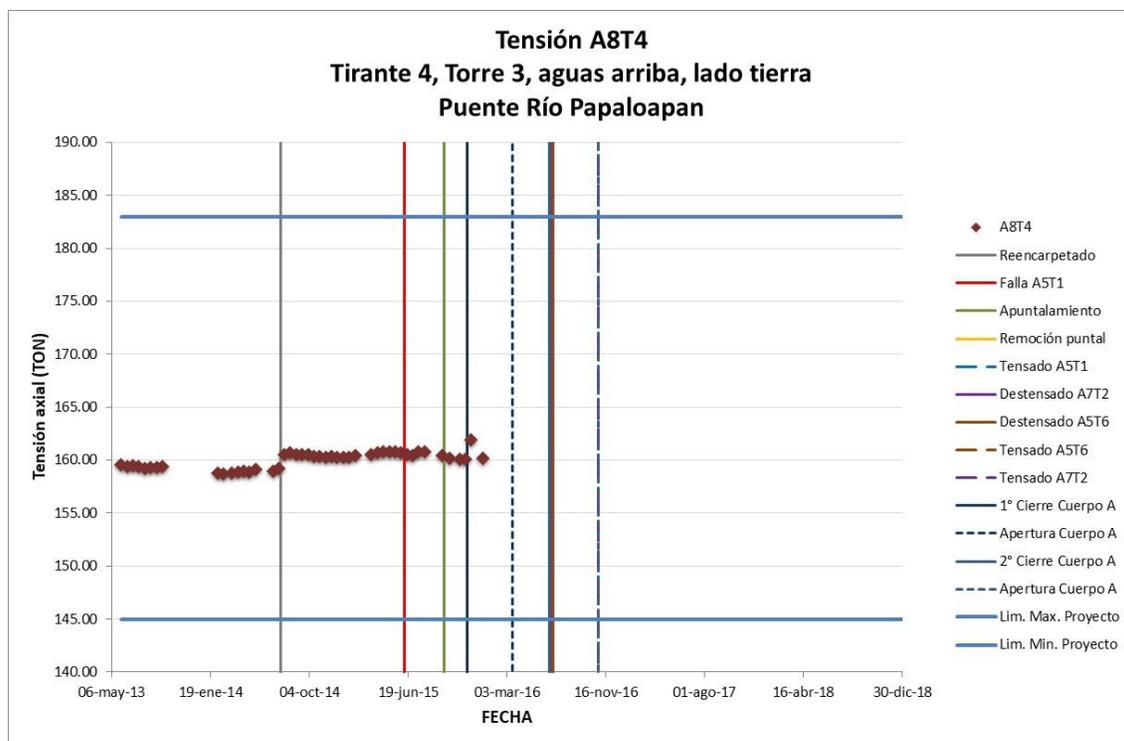


Figura 3.47 Tensión del tirante 4 de la semi arpa 8.

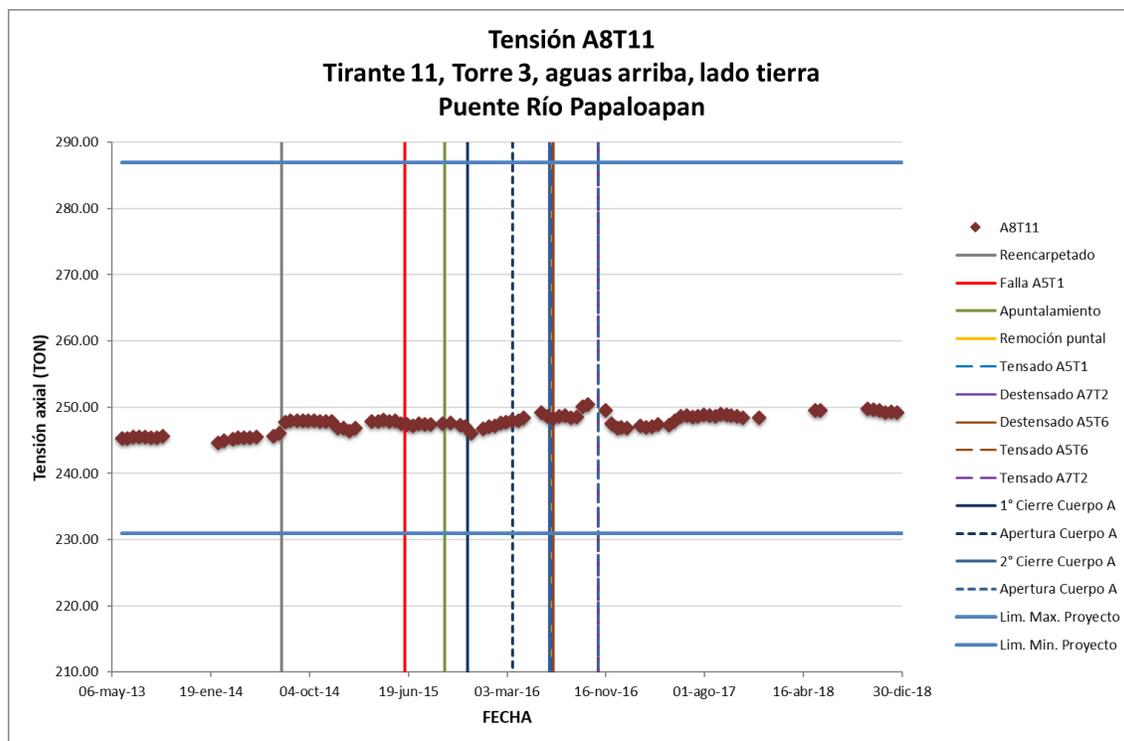


Figura 3.48 Tensión del tirante 11 de la semi arpa 8.

Durante el segundo semestre del año 2018 se realizó el pesaje indirecto de los 112 tirantes del puente Río Papaloapan, para dar un seguimiento puntual antes de comenzar la sustitución de los 10 elementos de anclaje del mantenimiento mayor del puente Río Papaloapan. Para la cual se obtuvo la medición de la tensión de los 112 cables cada mes a partir del mes de julio de 2018. Asimismo, se recalibró el método indirecto de medición de las tensiones considerando como valores de referencia los datos del último pesaje realizado por Freyssinet de México SA de CV en el año 2016. Los valores de las tensiones obtenidas por el pesaje directo del año 2016 se pueden observar en la tabla 3.1

Para estas pruebas se utiliza un equipo portátil de medición de vibraciones con un acelerómetro inalámbrico. Con este equipo se miden las vibraciones de los tirantes durante 2 minutos bajo condiciones normales de operación del puente. De la medición de vibraciones, se identifican las frecuencias naturales de los tres primeros modos de vibrar de cada uno de los 112 tirantes y utilizando un modelo calibrado para cada tirante se calcula la tensión correspondiente [8]. En la tabla 3.2 se muestran los valores de las tensiones correspondientes al pesaje dinámico obtenido en el mes de diciembre de 2018.

**Tabla 3.1 Tensión en los tirantes del puente Río Papaloapan finales.**

Tirante	Semi-Arpa (Tensión en toneladas)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	244	212	211	239	216	206	247	229
2	134	138	148	145	141	140	111	137
3	165	191	185	176	177	201	189	164
4	169	206	170	166	176	171	189	176
5	192	207	180	166	172	183	207	183
6	190	209	182	190	201	191	207	187
7	202	227	218	223	221	202	221	212
8	242	242	222	261	249	253	243	240
9	266	258	257	276	261	241	252	248
10	278	275	289	301	289	289	278	259
11	282	279	303	293	262	281	289	263
12	277	302	303	299	318	316	305	278
13	248	283	295	277	276	301	244	234
14	291	223	248	272	312	285	198	272

**Tabla 3.2 Tensión en los tirantes del puente Río Papaloapan registradas en el mes de diciembre de 2018.**

Tirante	Semi-Arpa (Tensión en toneladas)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	241	211	203	239	220	200	236	227
2	135	136	150	147	143	140	109	138
3	166	191	177	175	181	200	193	164
4	171	207	170	168	172	167	184	173
5	193	203	178	167	172	180	205	185
6	190	206	181	188	195	187	206	180
7	208	224	218	222	217	196	221	207
8	250	240	224	259	243	250	242	232
9	273	258	259	270	256	236	247	242
10	268	280	292	299	293	281	282	256
11	284	281	305	292	273	278	290	260
12	284	304	306	298	318	309	307	277
13	253	287	295	280	284	299	249	231
14	293	219	254	272	317	284	209	264

El valor de las tensiones registradas en diciembre de 2018 para cada semi arpa con los límites de diseño y máximas de proyecto para cada tirante se pueden ver en las gráficas de las figuras 3.49 a 3.56.

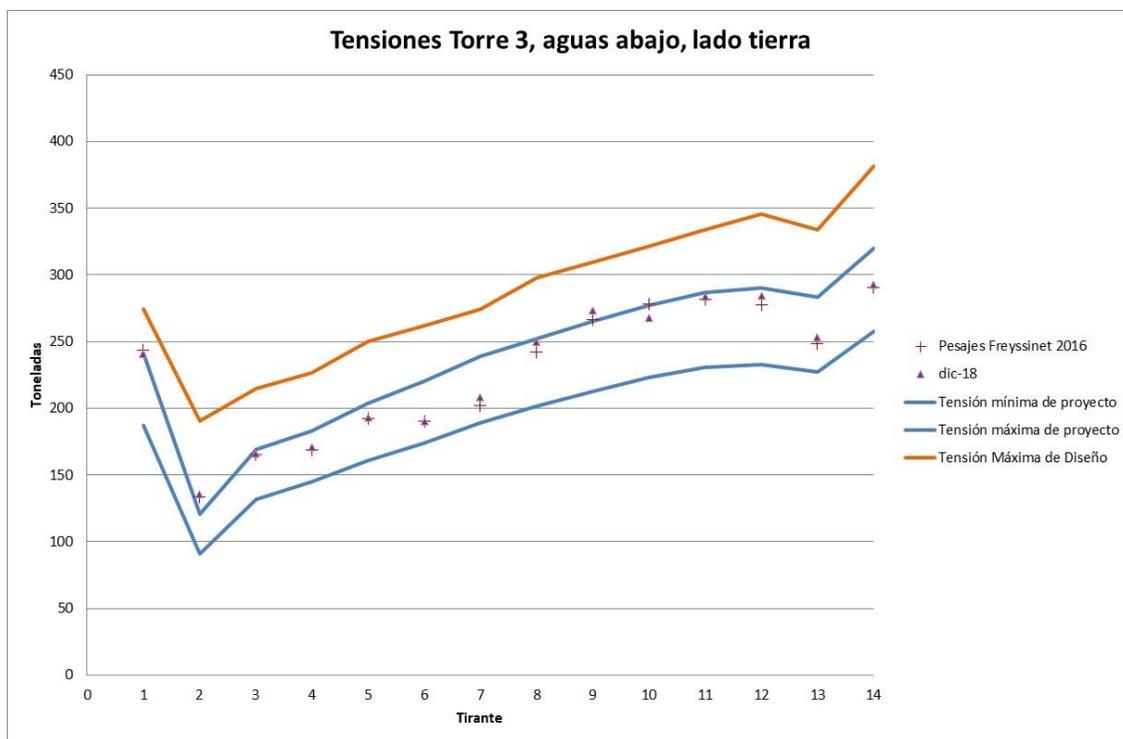


Figura 3.49 Semi-arpa 1.

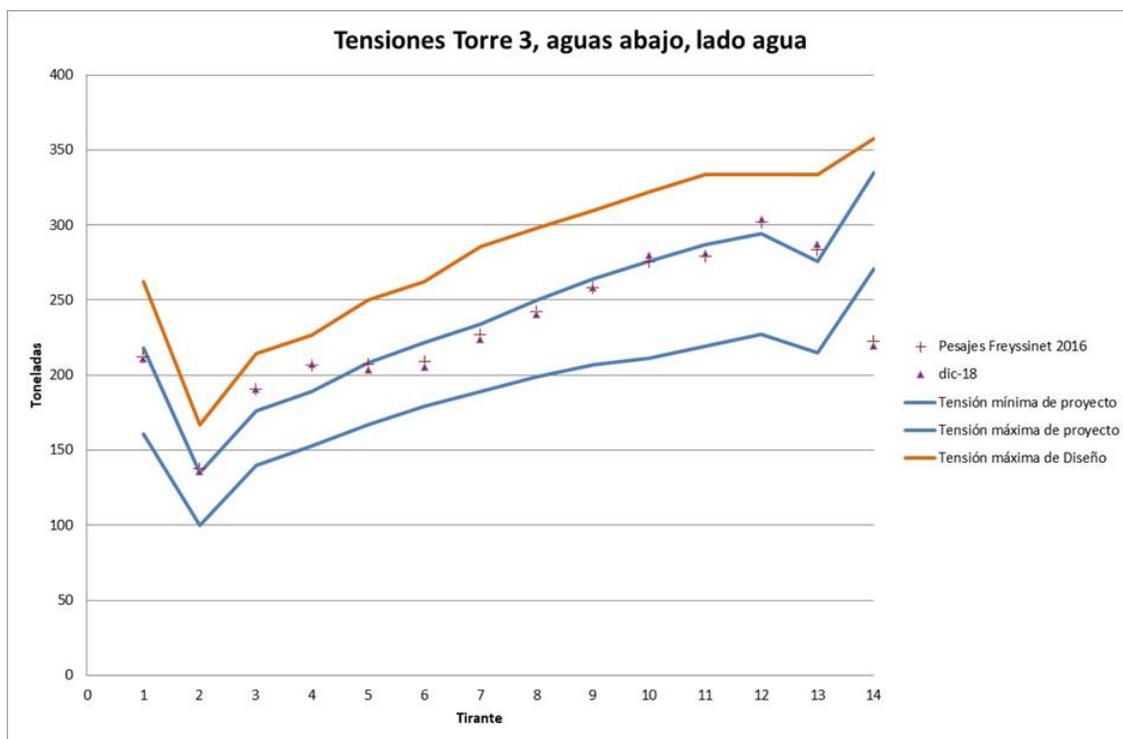


Figura 3.50 Semi-arpa 2.

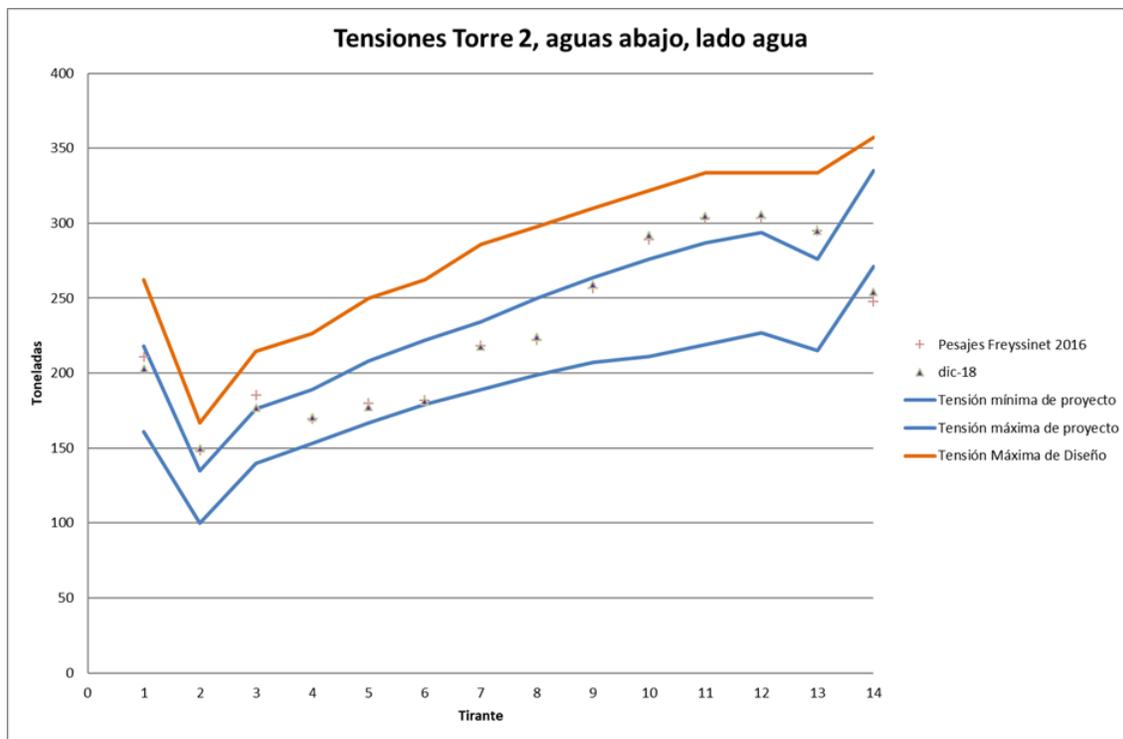


Figura 3.51 Semi-arpa 3.

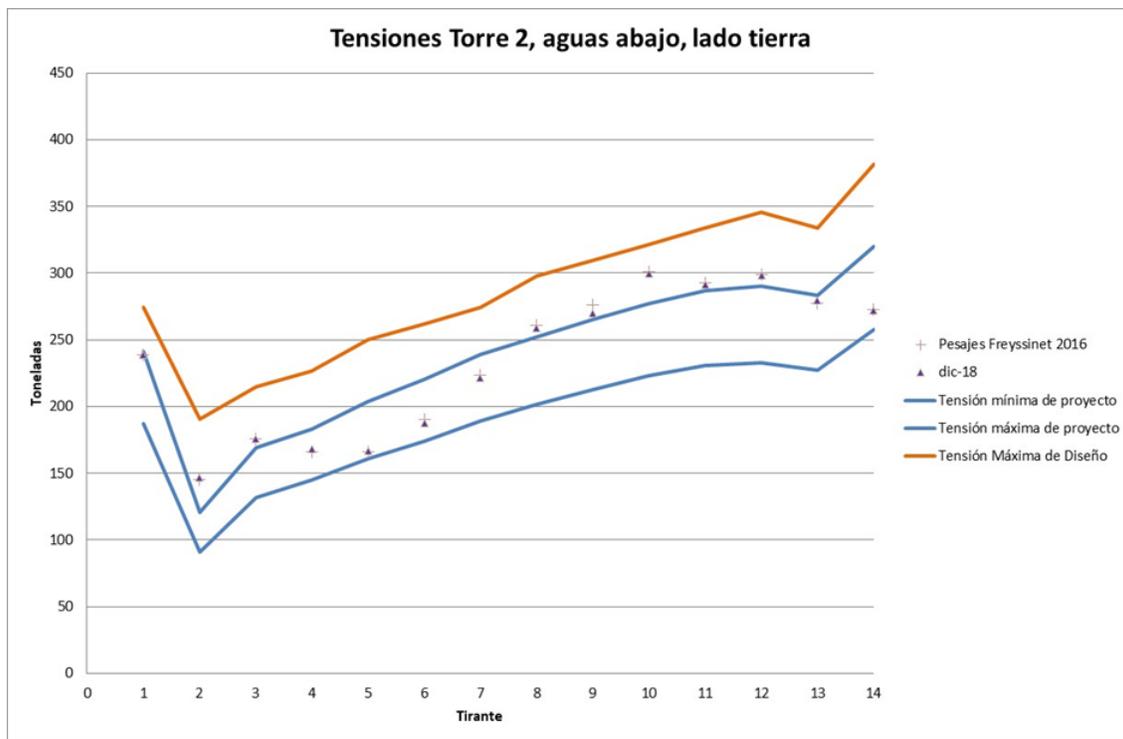


Figura 3.52 Semi-arpa 4.

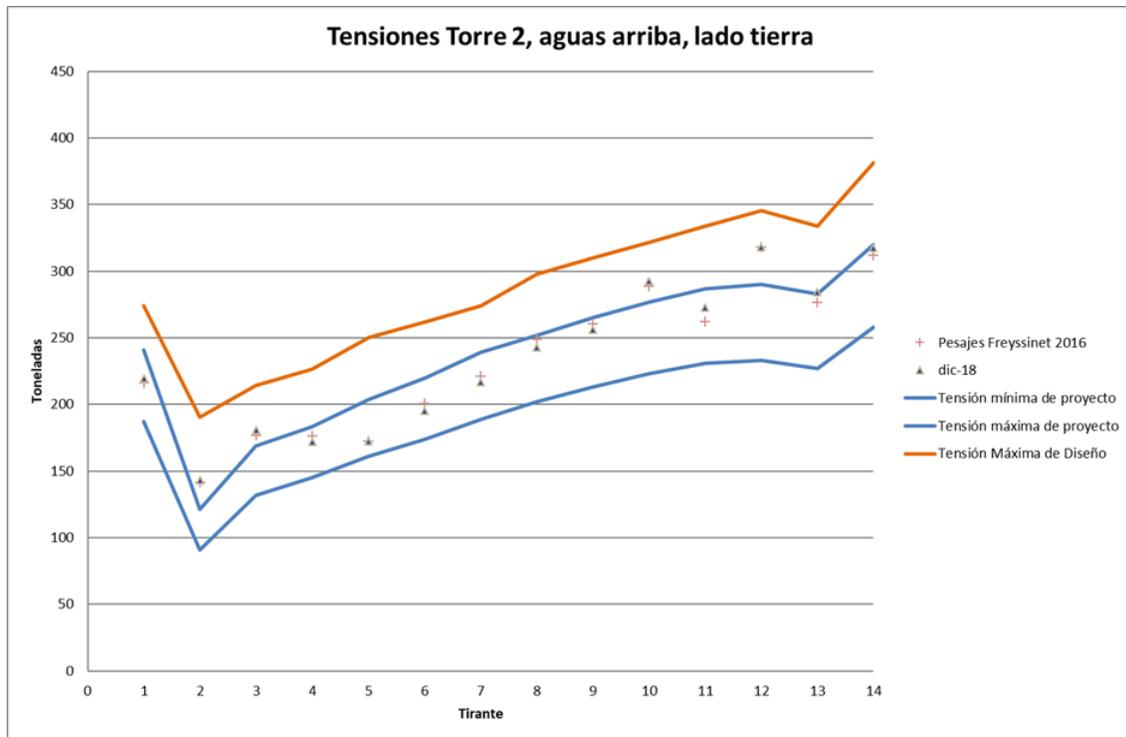


Figura 3.53 Semi-arpa 5.

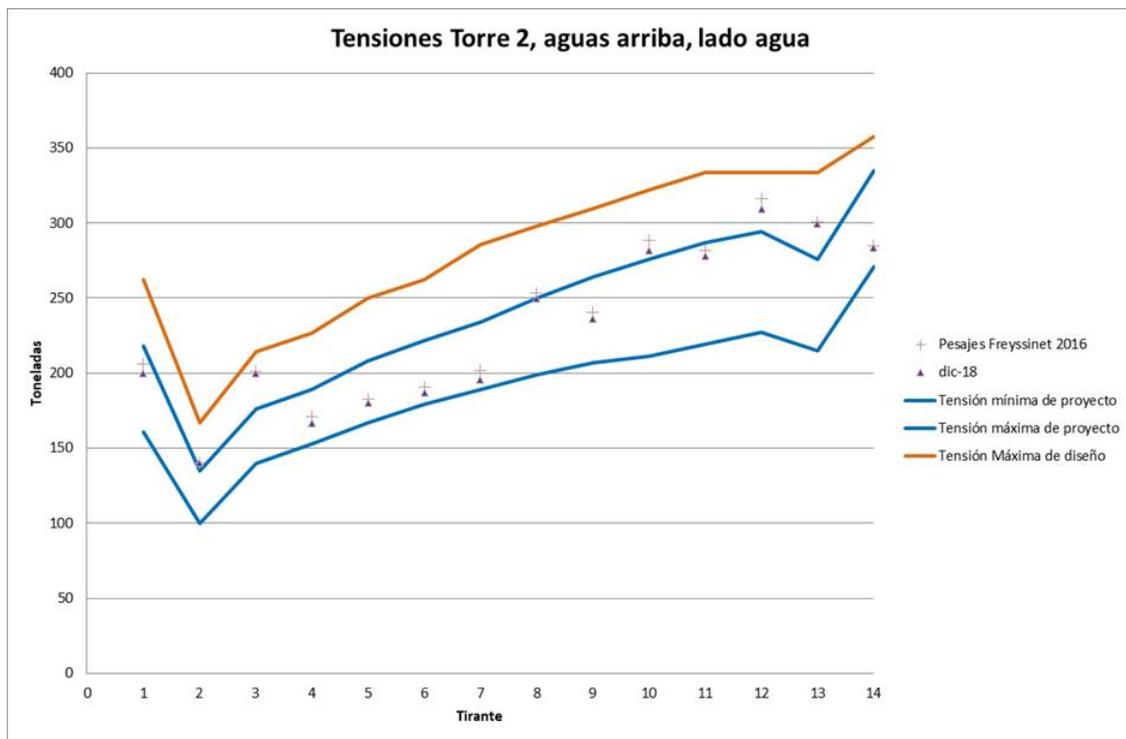


Figura 3.54 Semi-arpa 6.

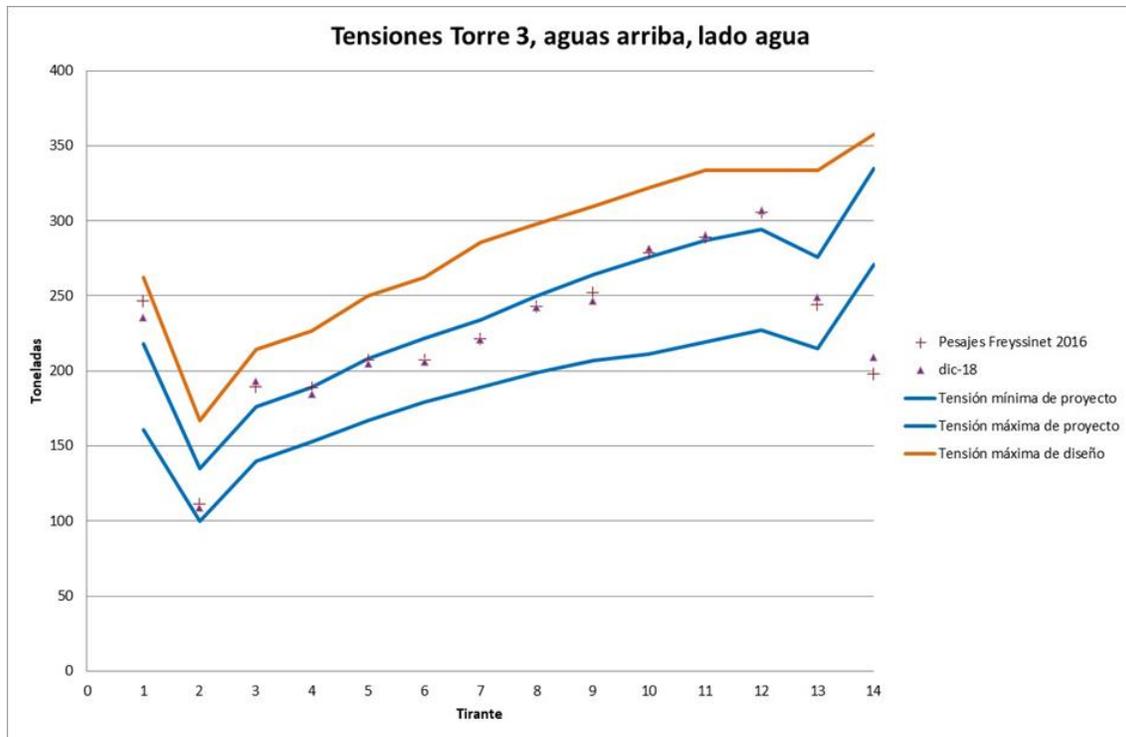


Figura 3.55 Semi-arpa 7.

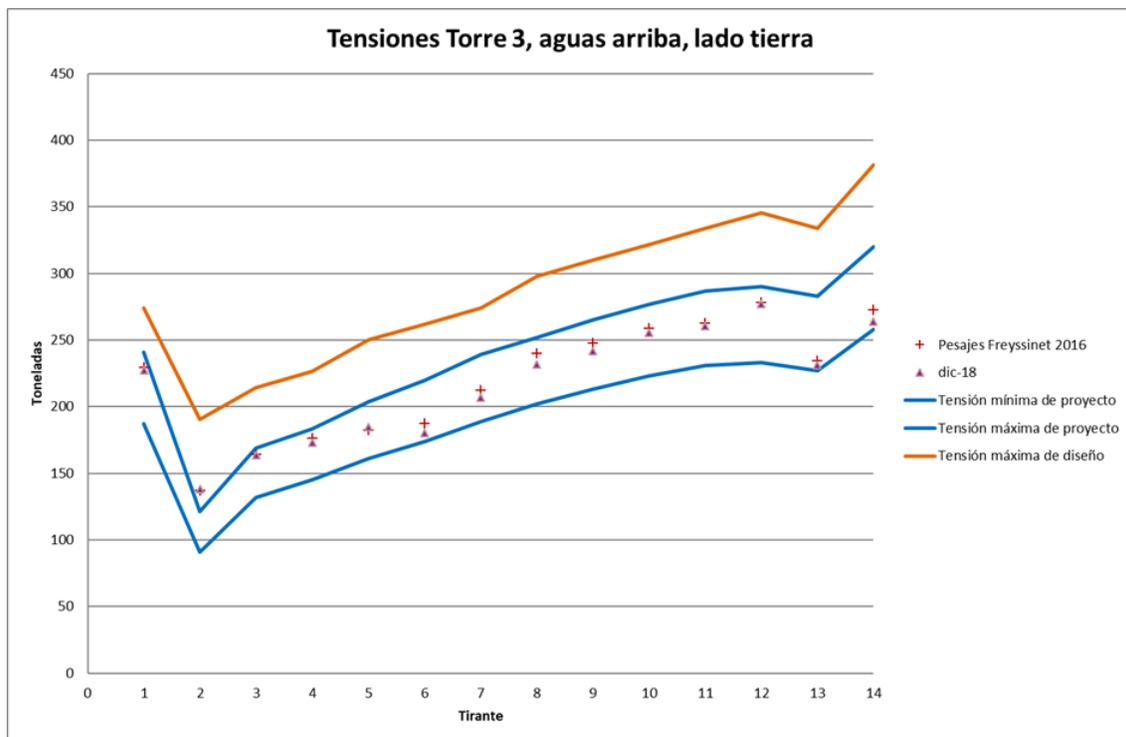


Figura 3.56 Semi-arpa 8.

Se puede concluir que los valores de las tensiones de los 112 tirantes del puente Río Papaloapan se mantienen estables y el mayor cambio se observa en el tirante 14 de la semi arpa 7 con una diferencia del 5.63% respecto a la medición inicial realizada por Freyssinet en el año de 2016. De acuerdo a los valores de tensión registrados anteriormente este porcentaje se encuentra dentro del rango de variación de las mediciones por lo que no representa ningún riesgo para la estructura.

Otro de las variables a considerar durante el monitoreo estructural del puente Río Papaloapan, es el valor de la media estadística de deformación unitaria provocada por las cargas vivas (vehículos que circulan por el puente Río Papaloapan), el cual es un parámetro bastante sensible a los mantenimientos realizados y a los cierres parciales de cuerpos o carriles. Siempre que un vehículo circula sobre el puente se genera un esfuerzo sobre las vigas principales a tensión y después a compresión, el valor absoluto de estos registros, a tensión y compresión, es utilizado para construir una distribución estadística para cada sensor. Los datos corresponden a bloques de 15 días de medición, y todos los sensores, para cargas vivas, cumplen con una distribución estadística del tipo Gauss Inversa.

Las gráficas de las figuras de la 3.57 a la 3.104 muestran el valor de la media de cada sensor a tensión y compresión desde el año de 2013.

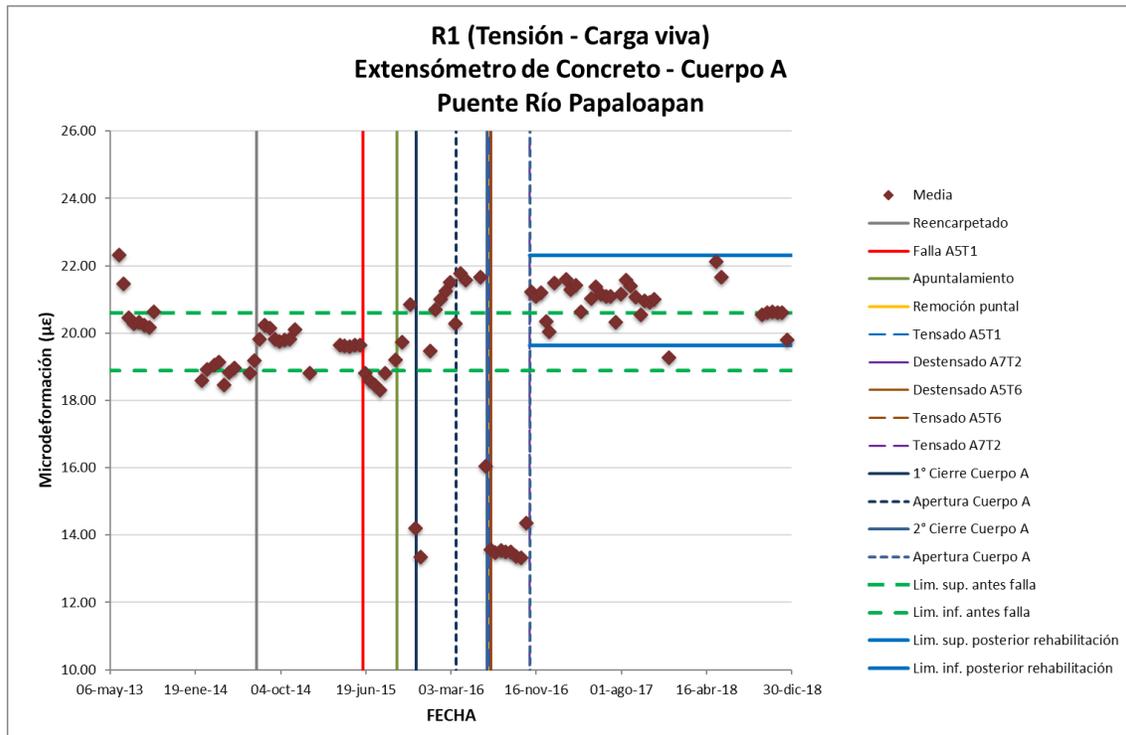


Figura 3.57 Media estadística del extensómetro R1 a tensión.

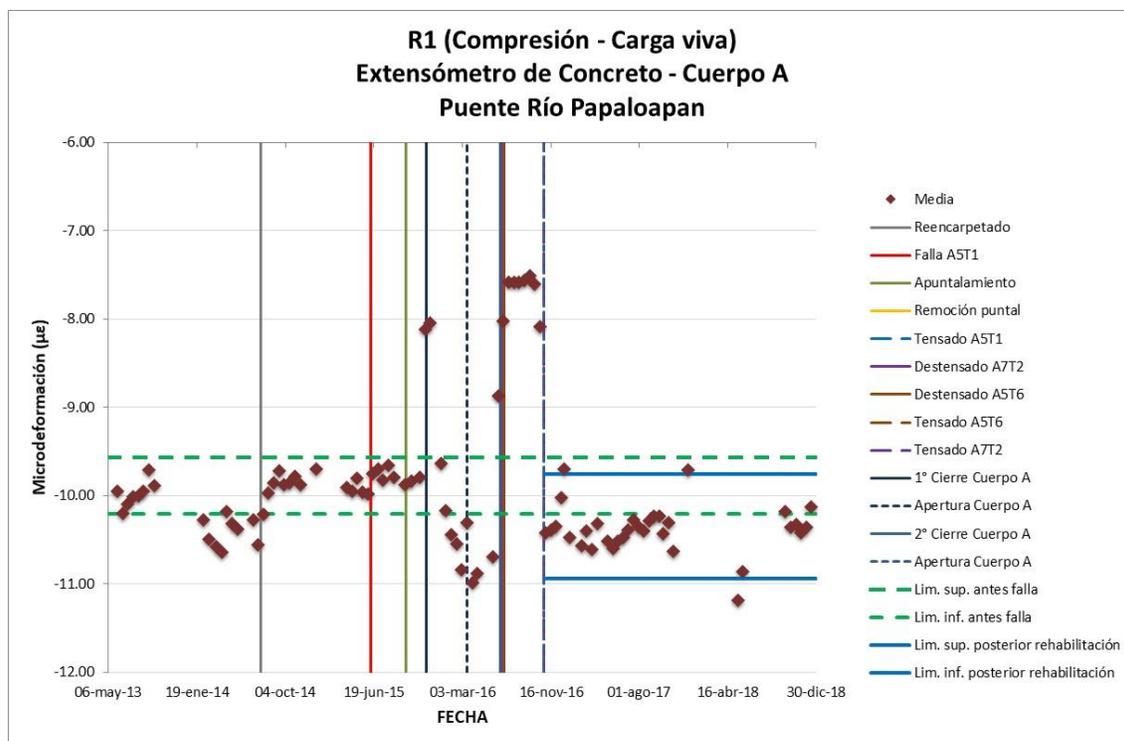


Figura 3.58 Media estadística del extensómetro R1 a compresión.

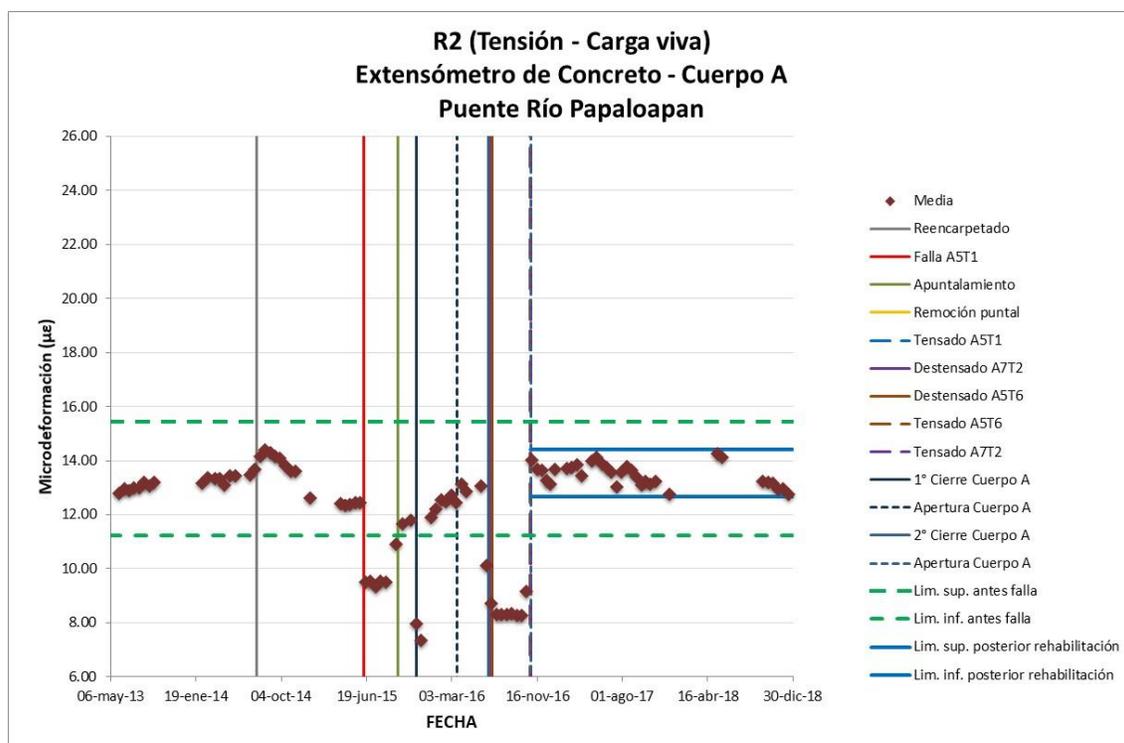


Figura 3.59 Media estadística del extensómetro R2 a tensión.

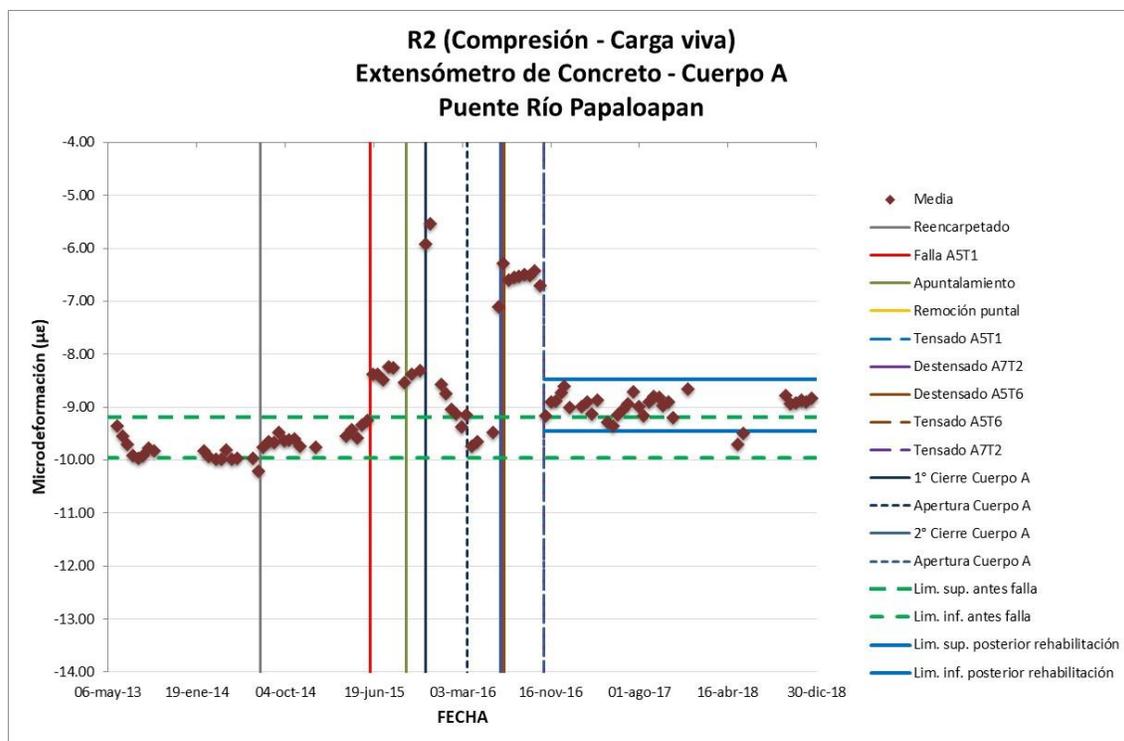


Figura 3.60 Media estadística del extensómetro R2 a compresión.

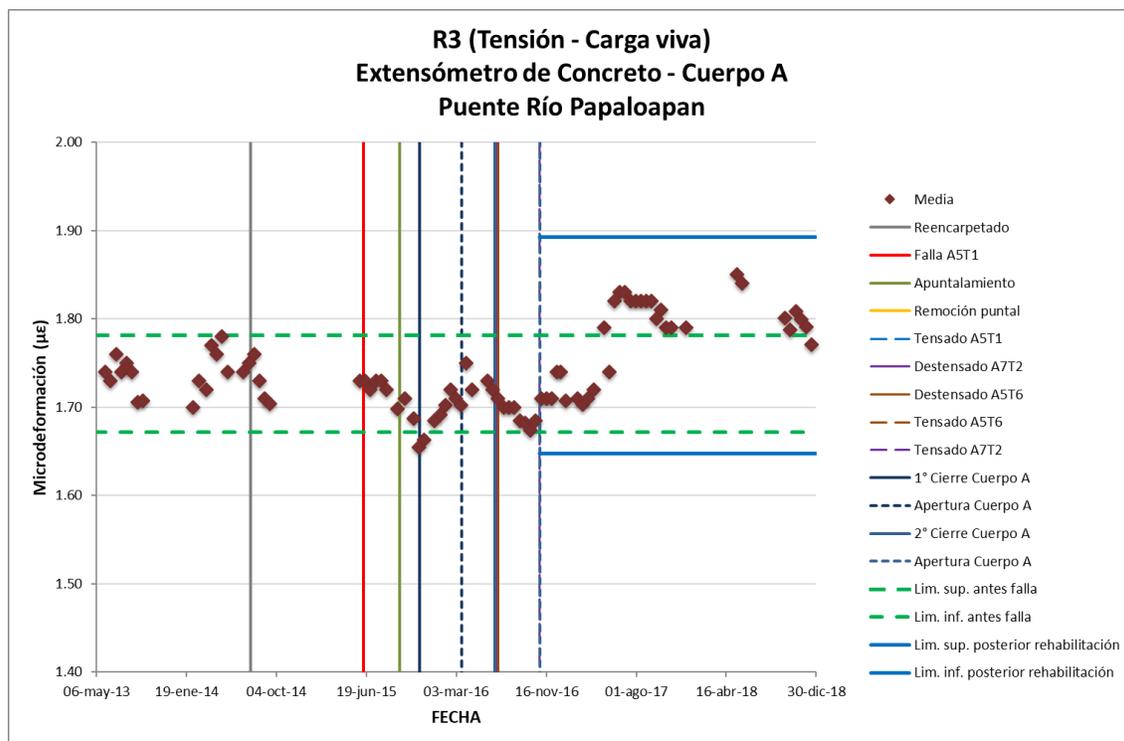


Figura 3.61 Media estadística del extensómetro R3 a tensión.

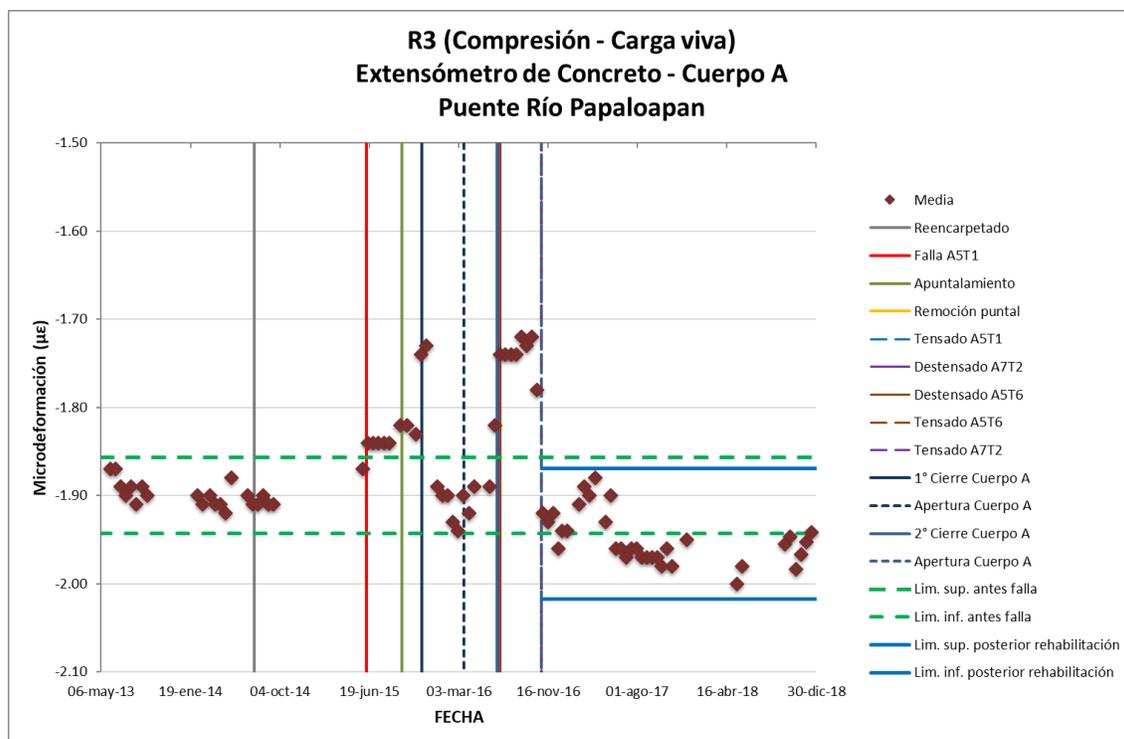


Figura 3.62 Media estadística del extensómetro R3 a compresión.

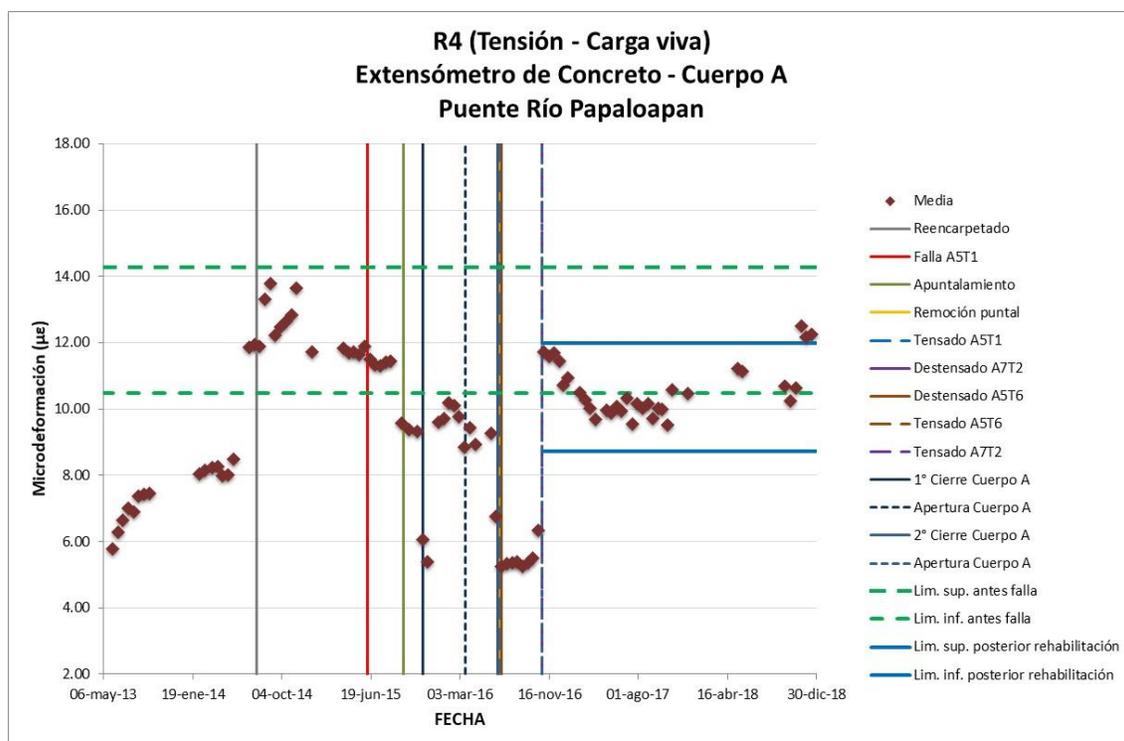


Figura 3.63 Media estadística del extensómetro R4 a tensión.

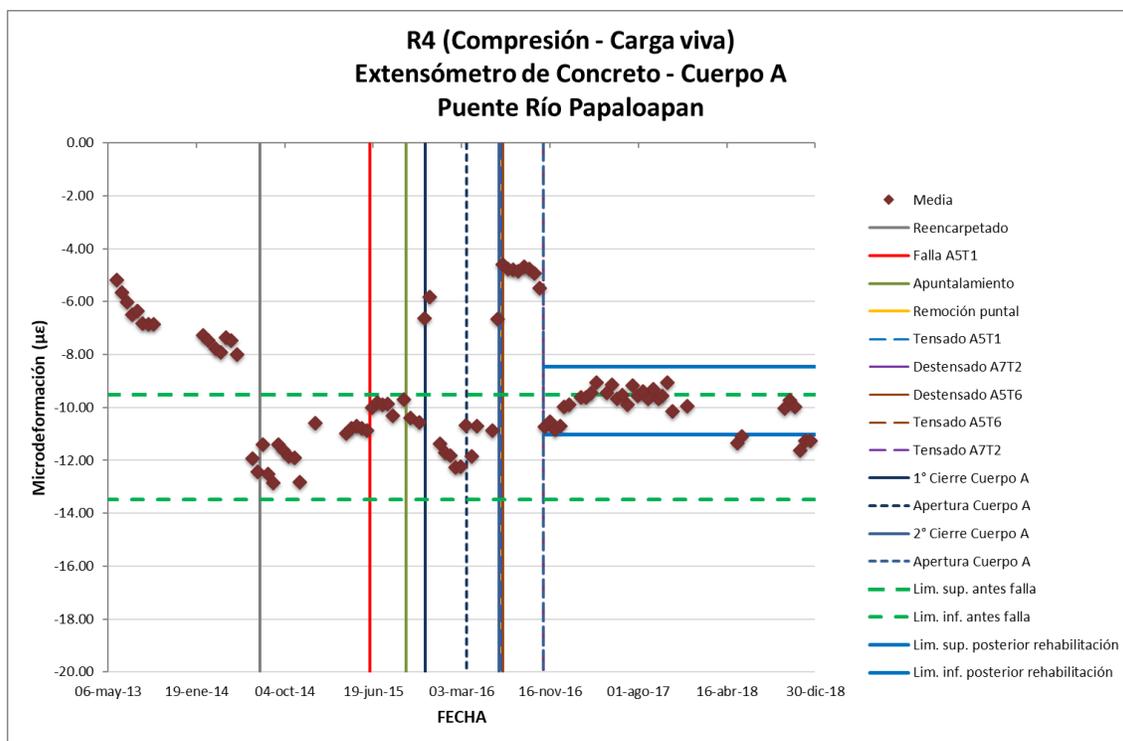


Figura 3.64 Media estadística del extensómetro R4 a compresión.

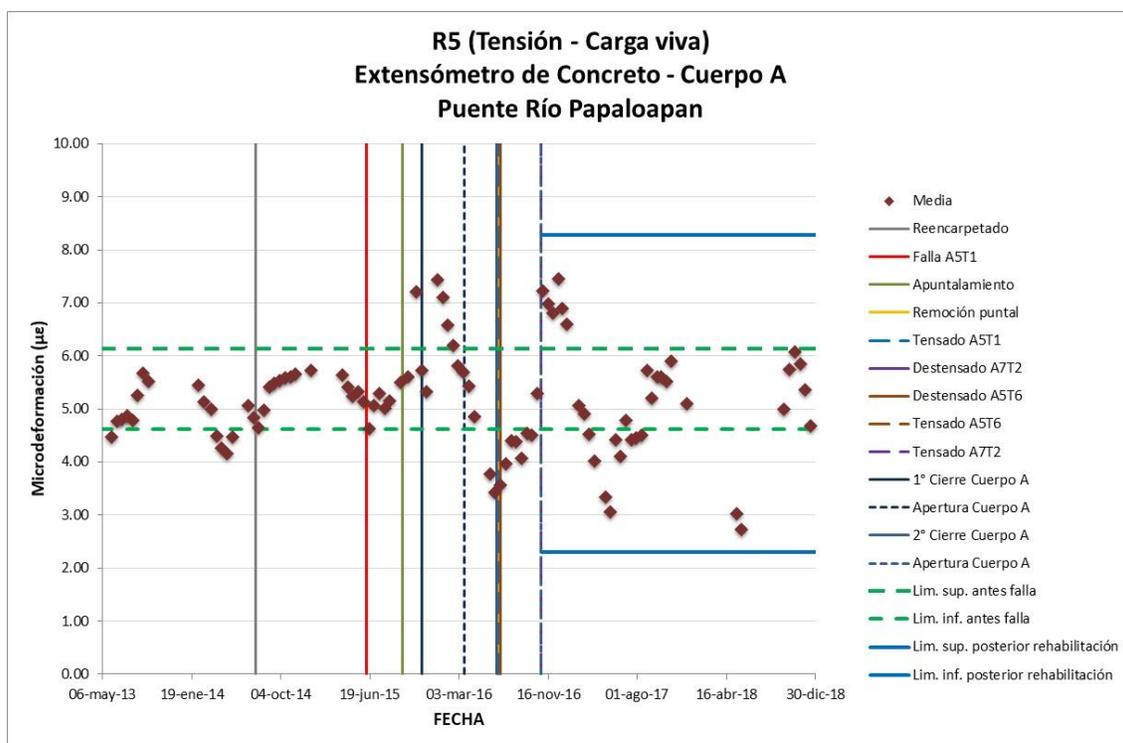


Figura 3.65 Media estadística del extensómetro R5 a tensión.

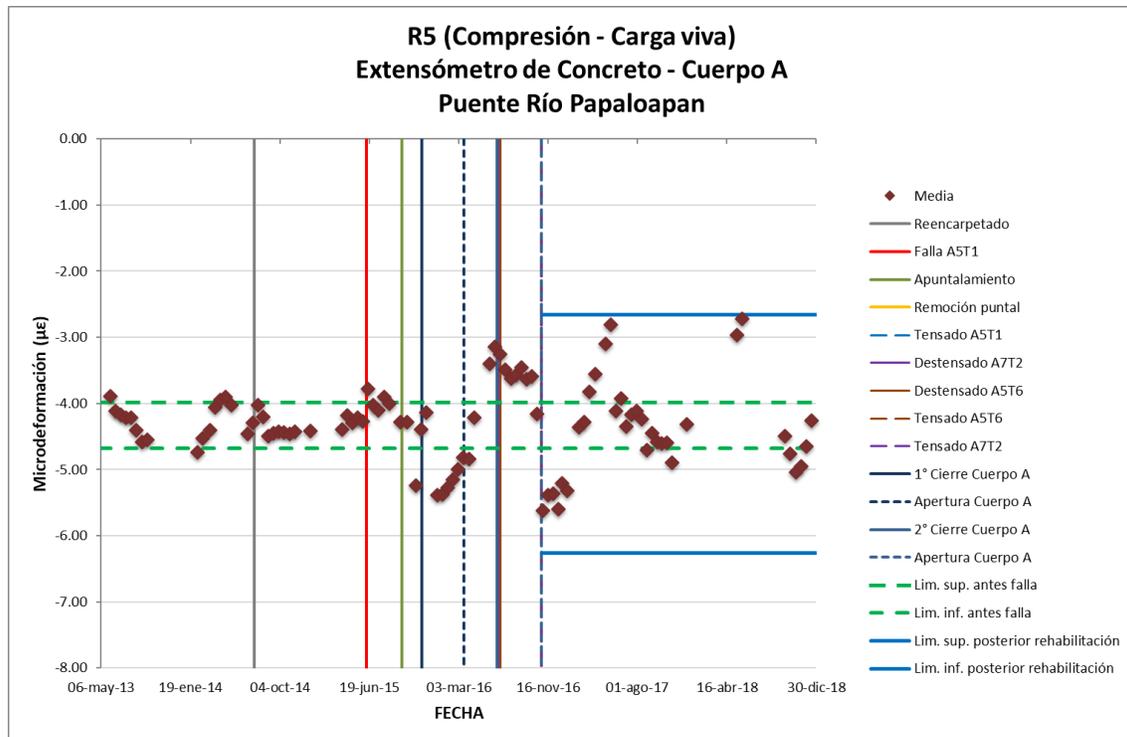


Figura 3.66 Media estadística del extensómetro R5 a compresión.

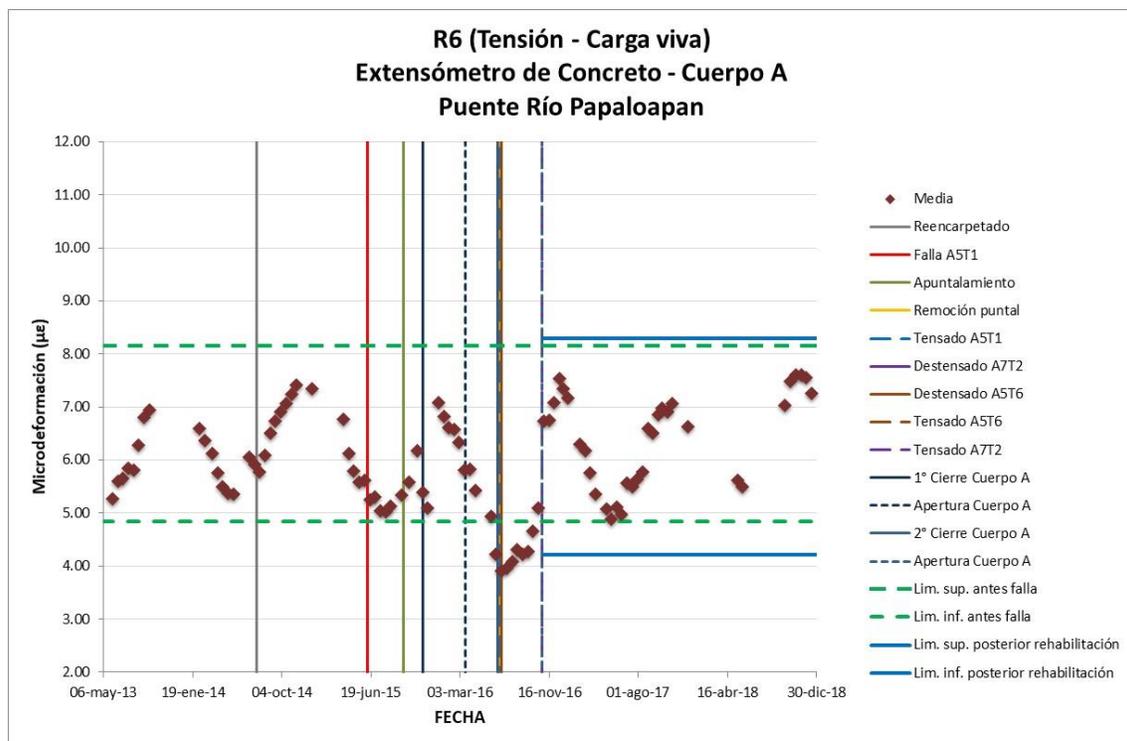


Figura 3.67 Media estadística del extensómetro R6 a tensión.

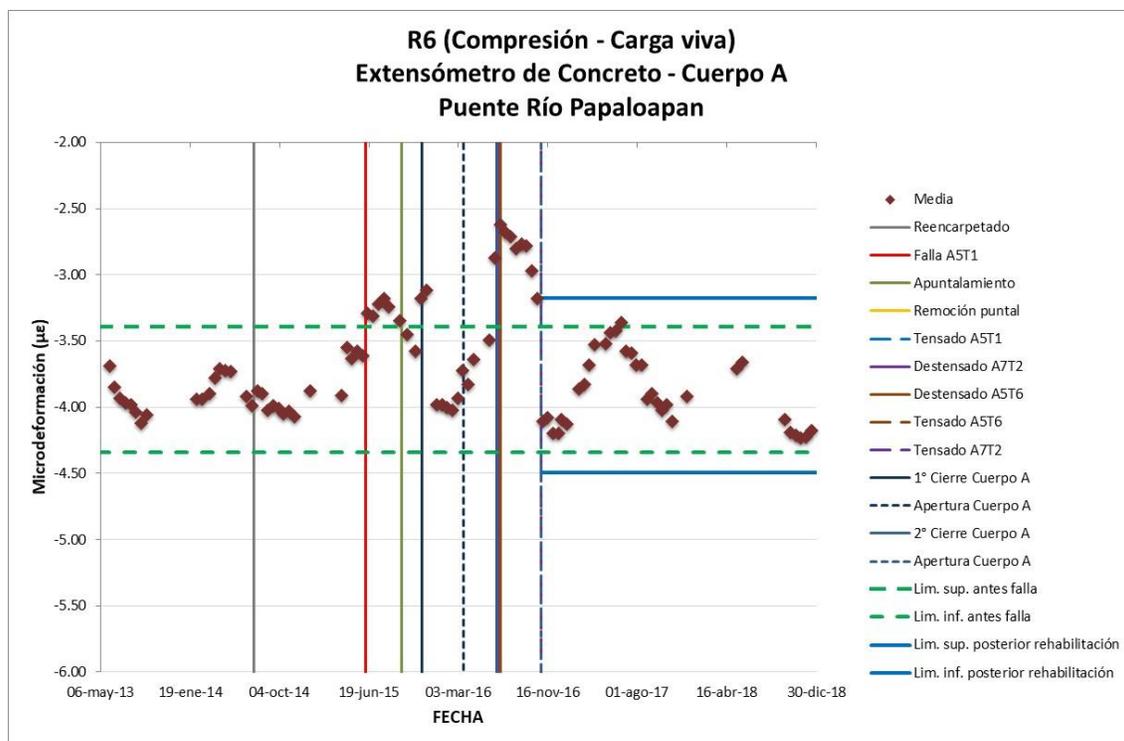


Figura 3.68 Media estadística del extensómetro R6 a compresión.

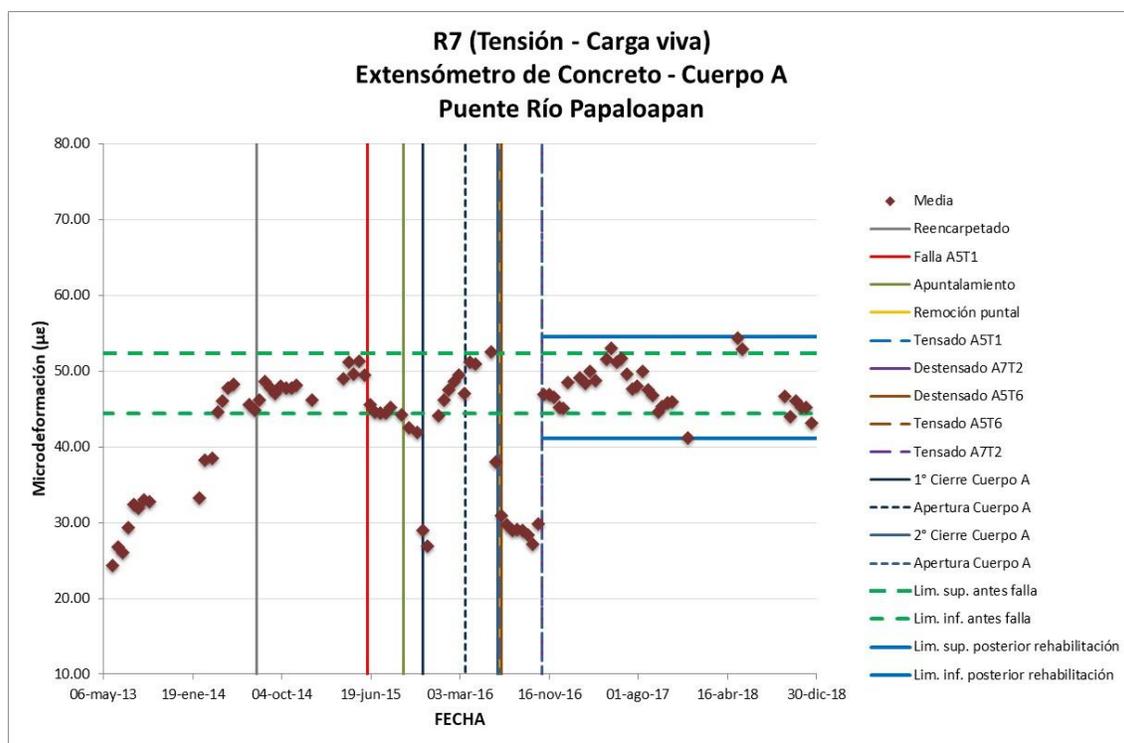


Figura 3.69 Media estadística del extensómetro R7 a tensión.

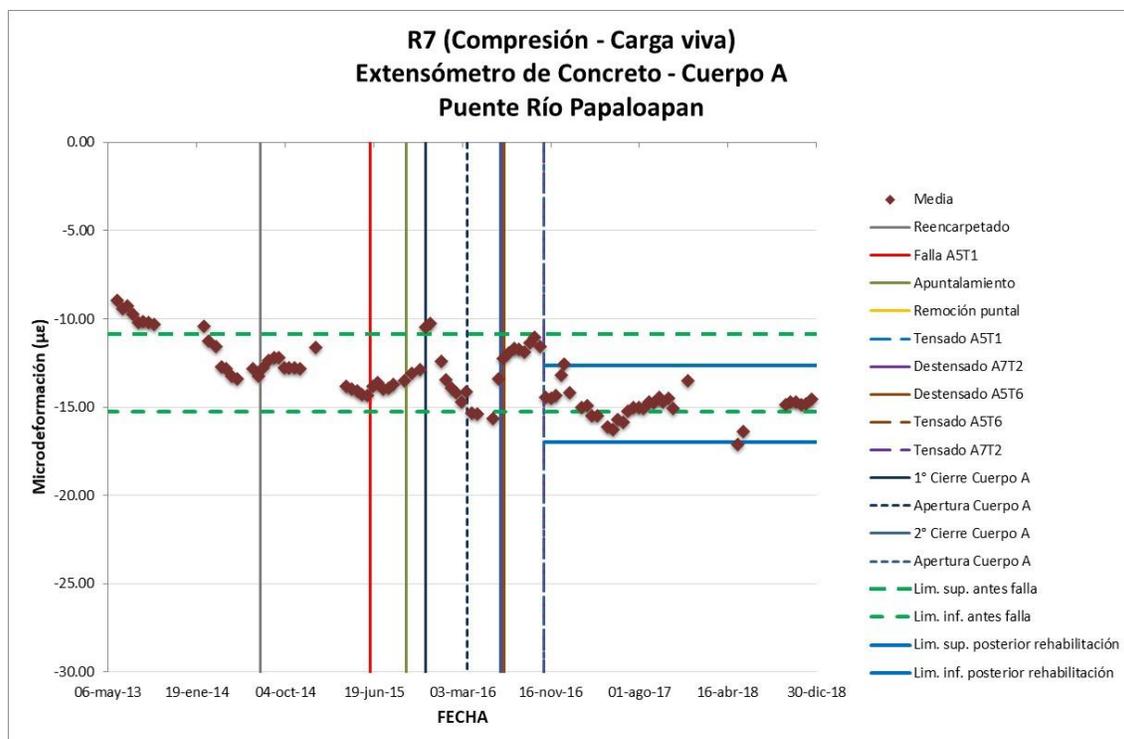


Figura 3.70 Media estadística del extensómetro R7 a compresión.

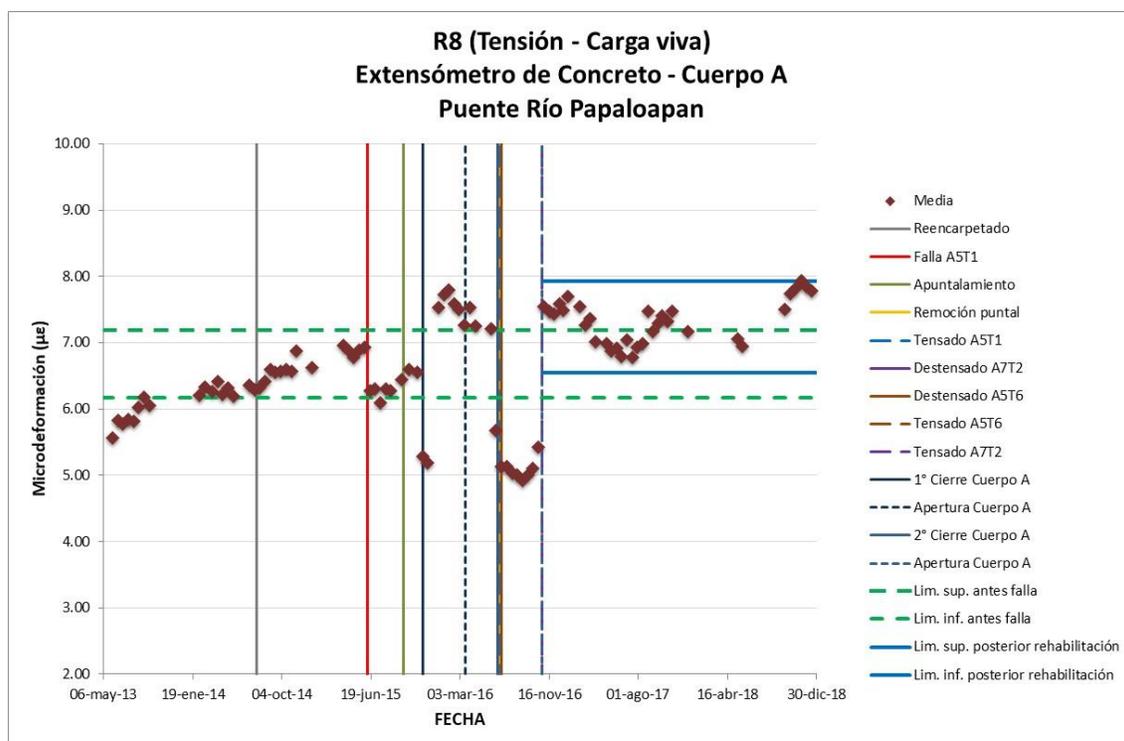


Figura 3.71 Media estadística del extensómetro R8 a tensión.

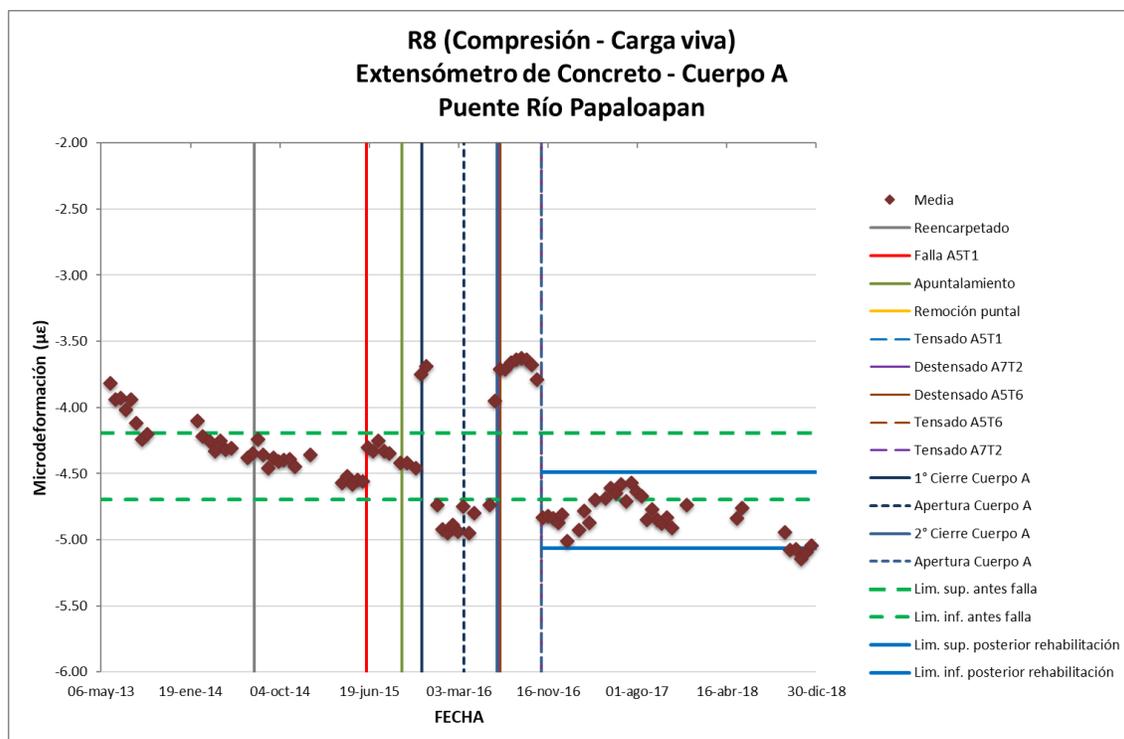


Figura 3.72 Media estadística del extensómetro R8 a compresión.

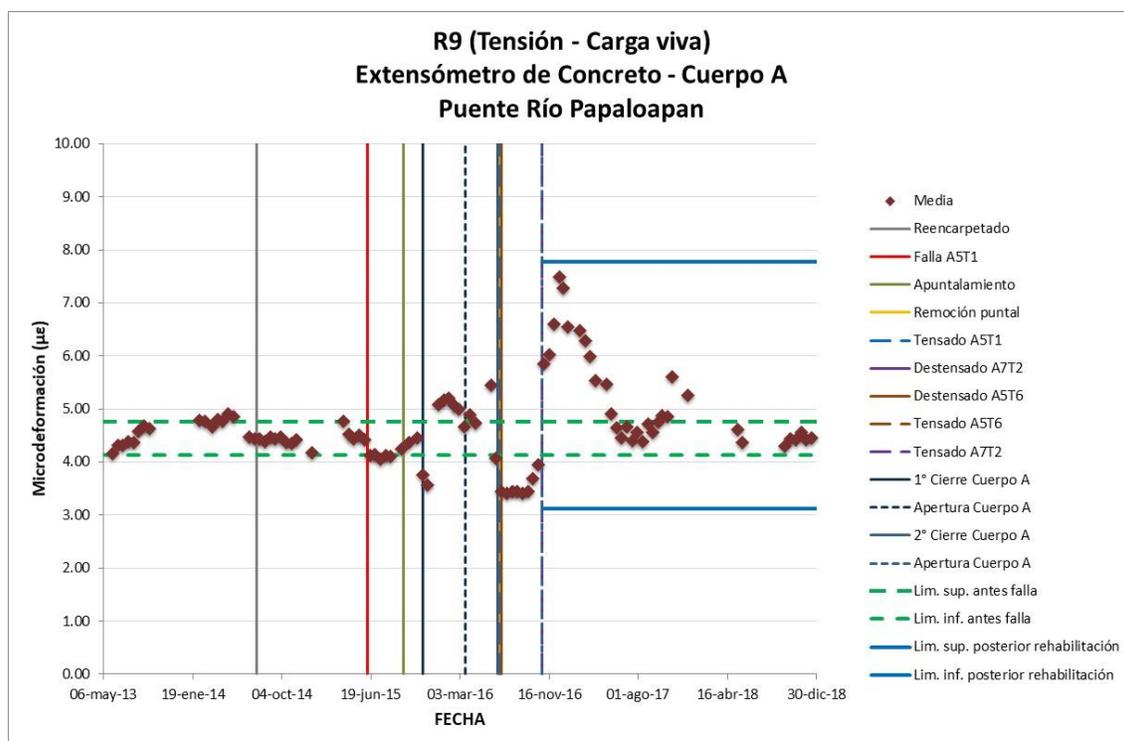


Figura 3.73 Media estadística del extensómetro R9 a tensión.

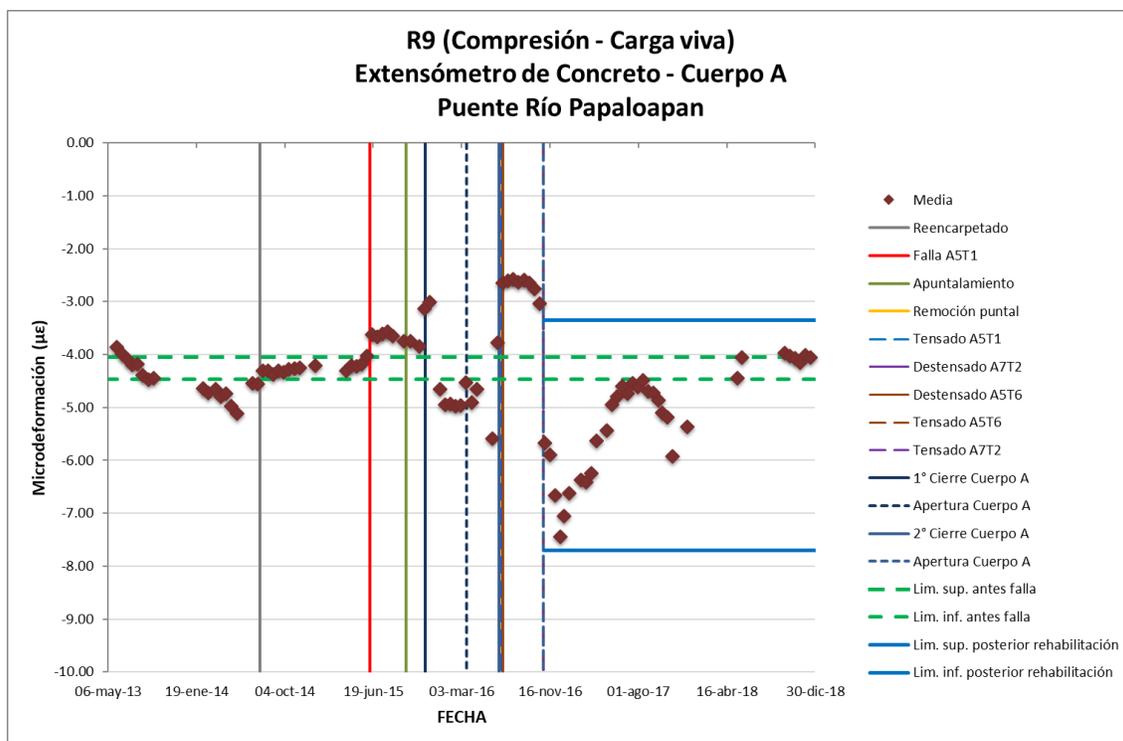


Figura 3.74 Media estadística del extensómetro R9 a compresión.

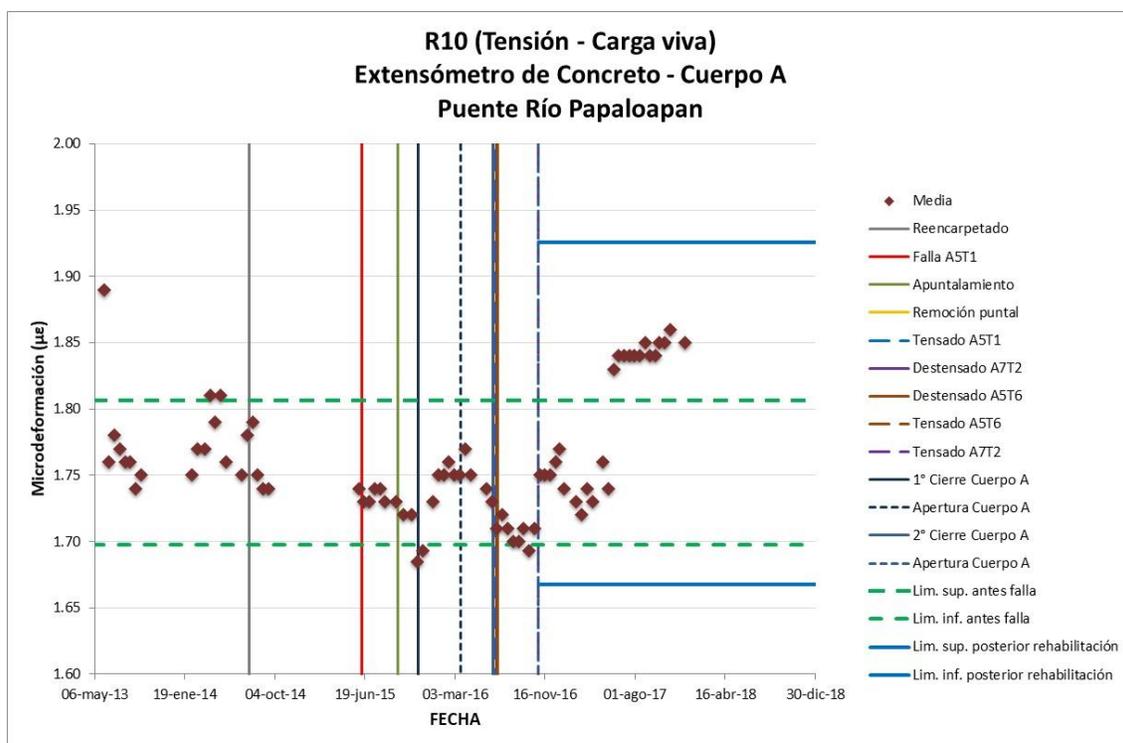


Figura 3.75 Media estadística del extensómetro R10 a tensión.

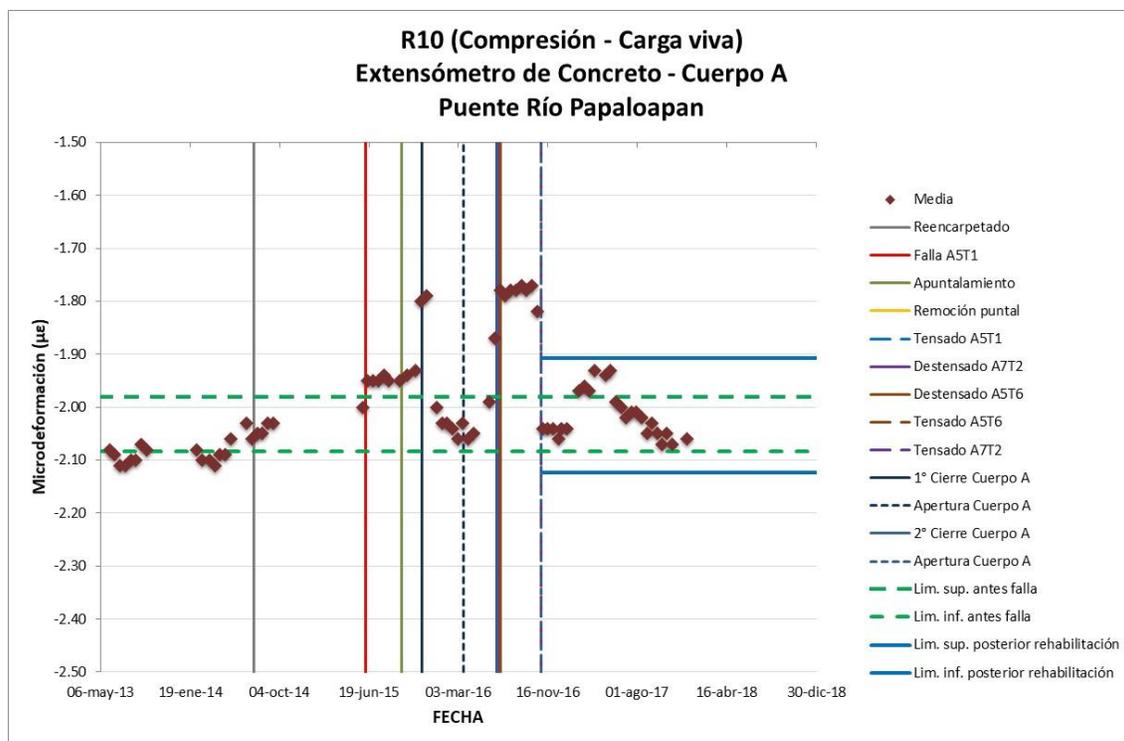


Figura 3.76 Media estadística del extensómetro R10 a compresión.

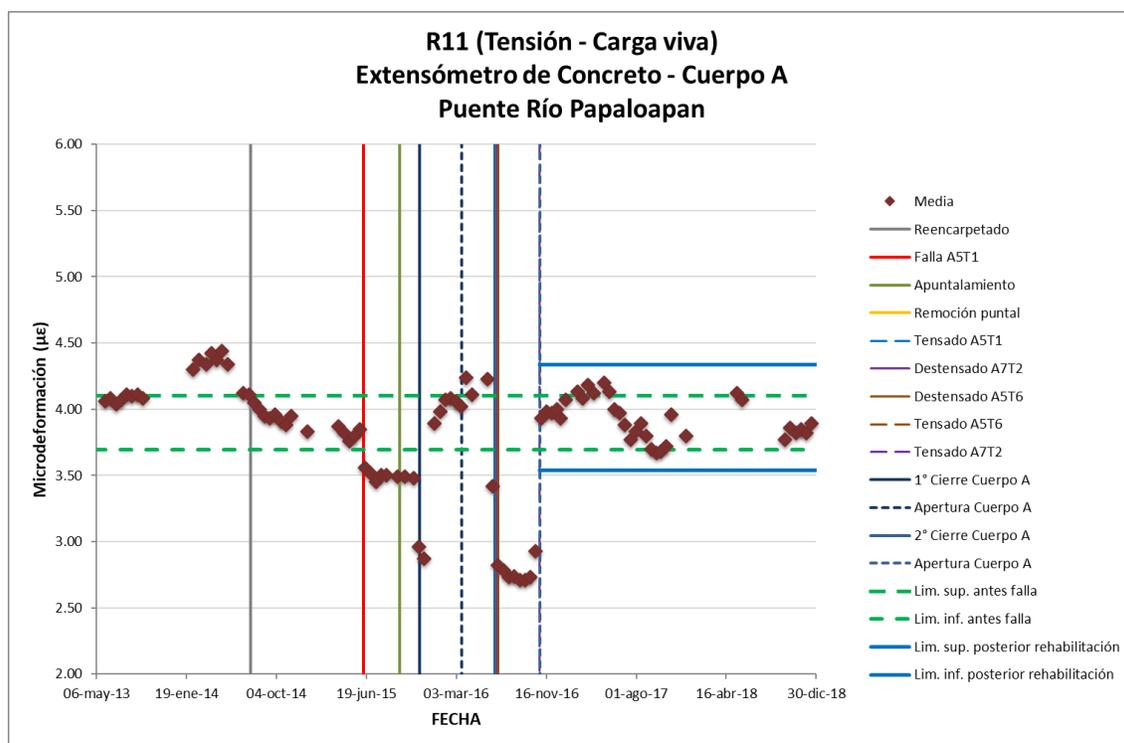


Figura 3.77 Media estadística del extensómetro R11 a tensión.

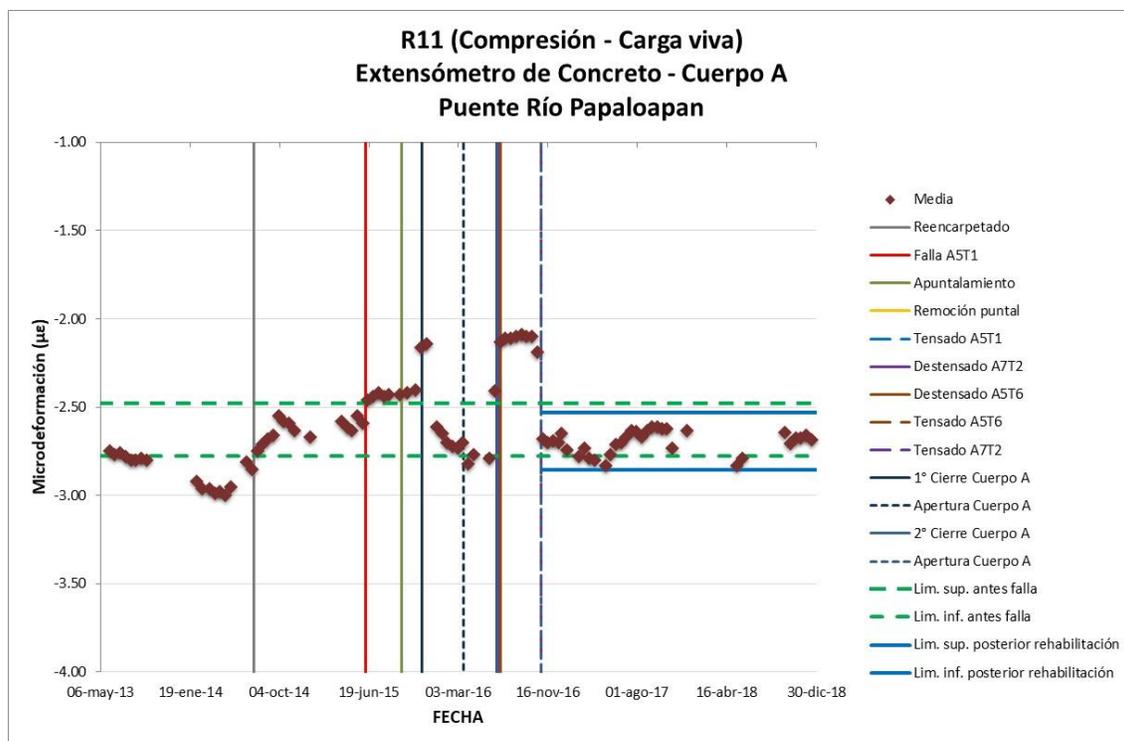


Figura 3.78 Media estadística del extensómetro R11 a compresión.

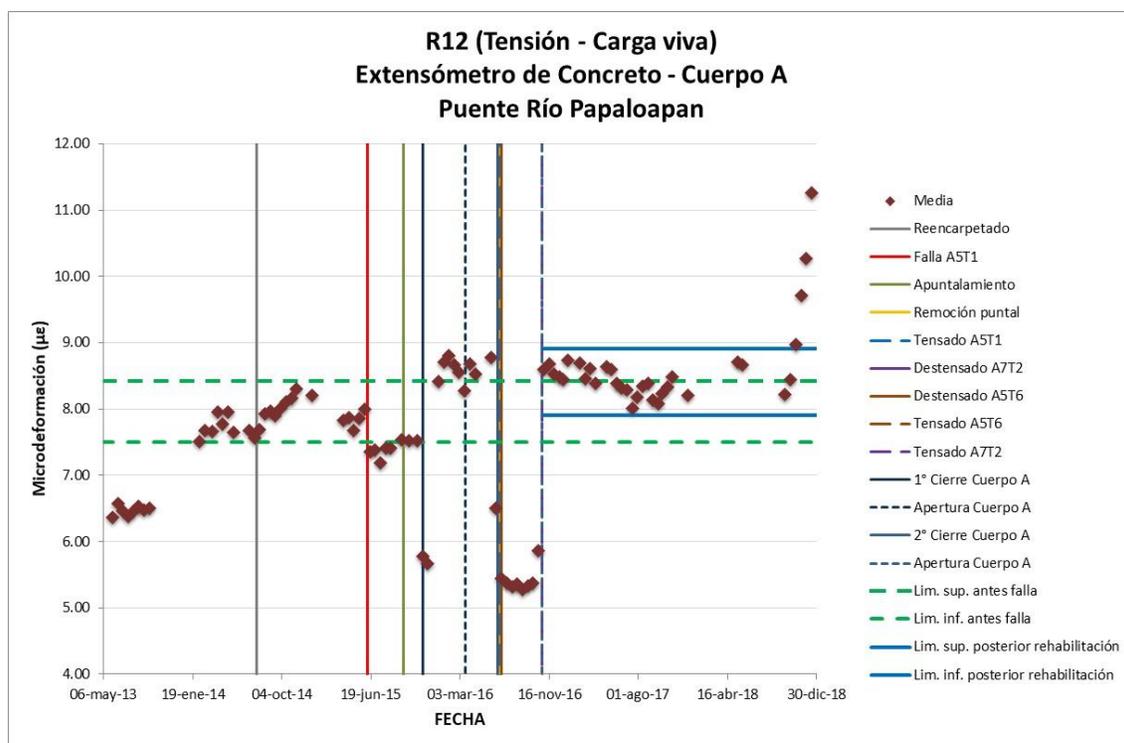


Figura 3.79 Media estadística del extensómetro R12 a tensión.

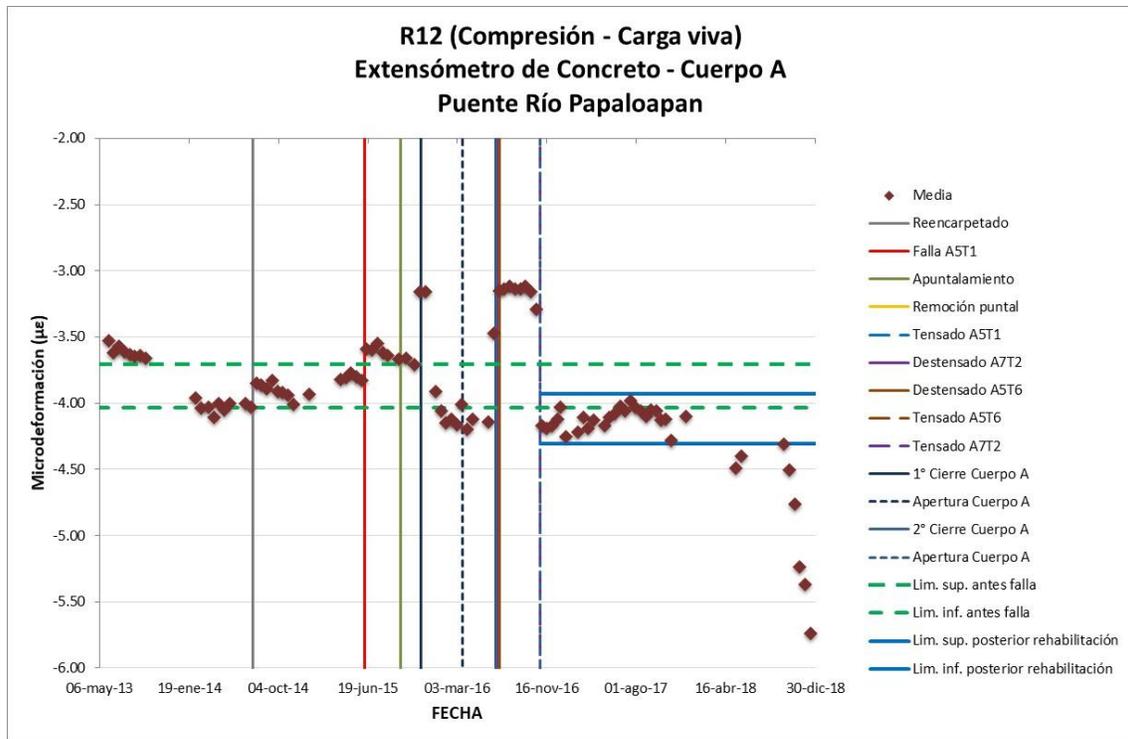


Figura 3.80 Media estadística del extensómetro R12 a compresión.

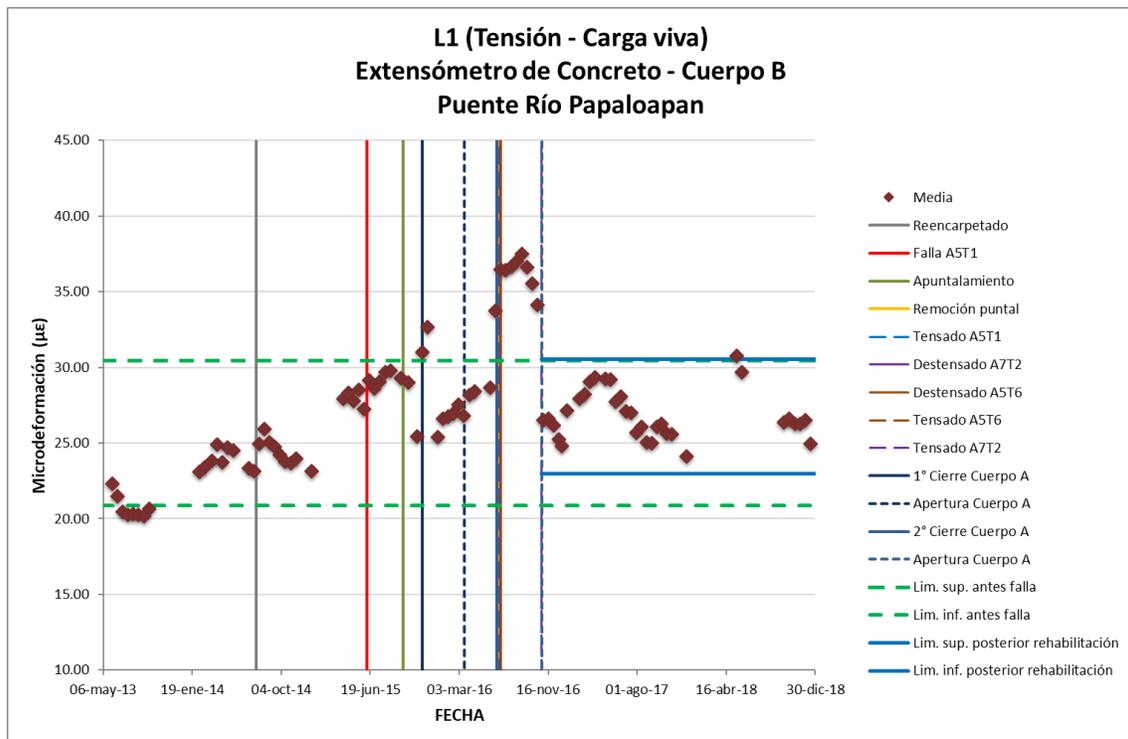


Figura 3.81 Media estadística del extensómetro L1 a tensión.

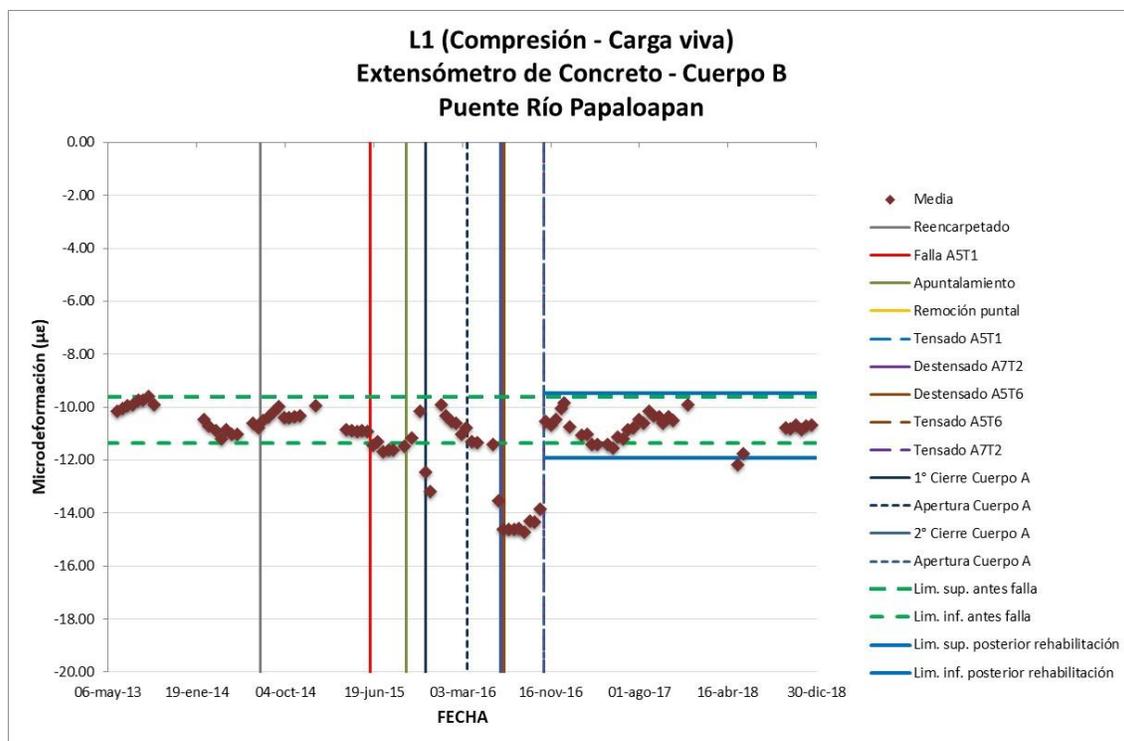


Figura 3.82 Media estadística del extensómetro L1 a compresión.

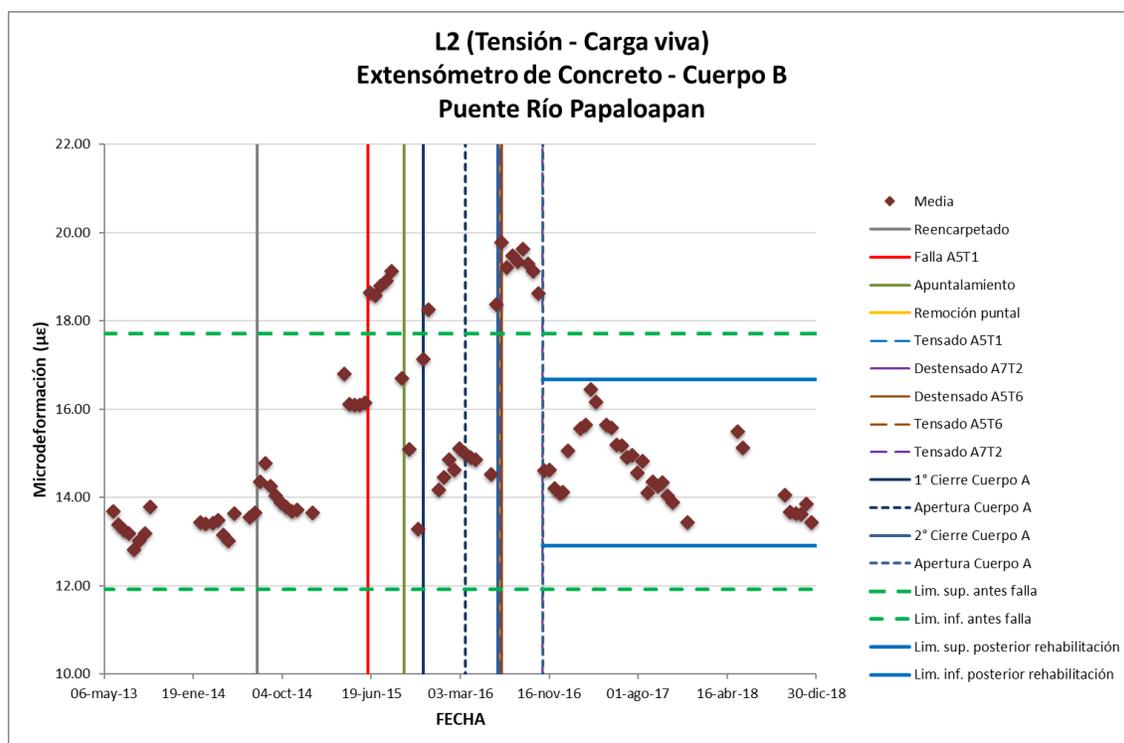


Figura 3.83 Media estadística del extensómetro L2 a tensión.

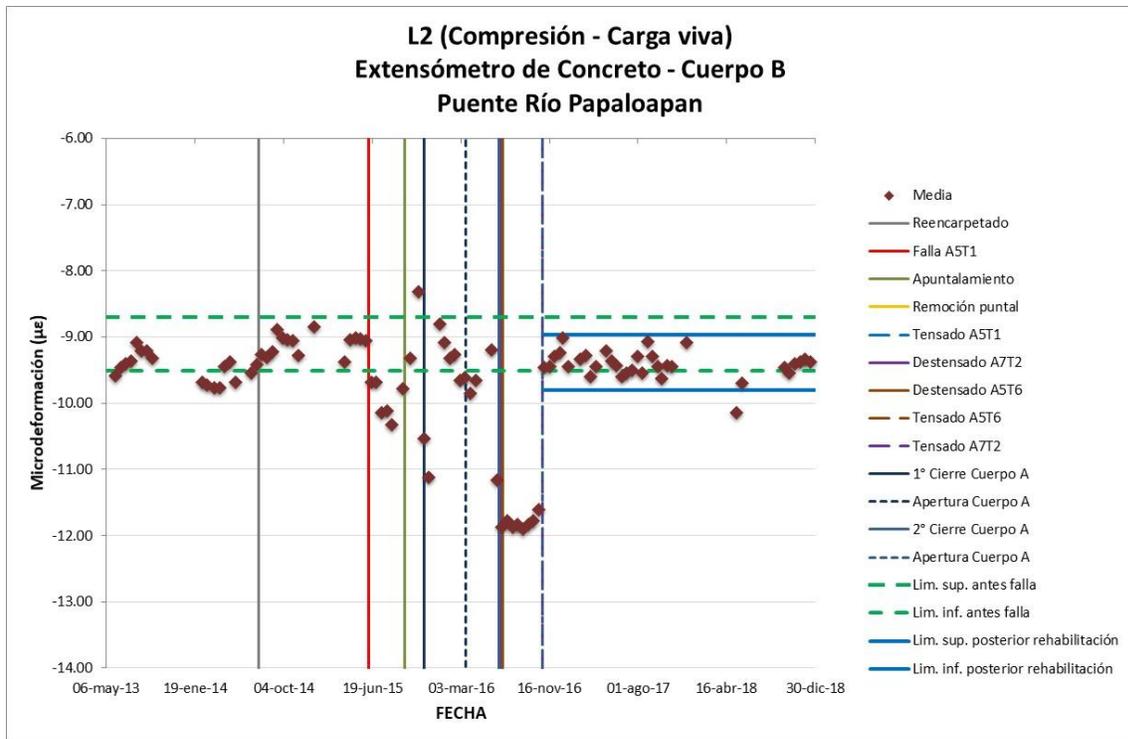


Figura 3.84 Media estadística del extensómetro L2 a compresión.

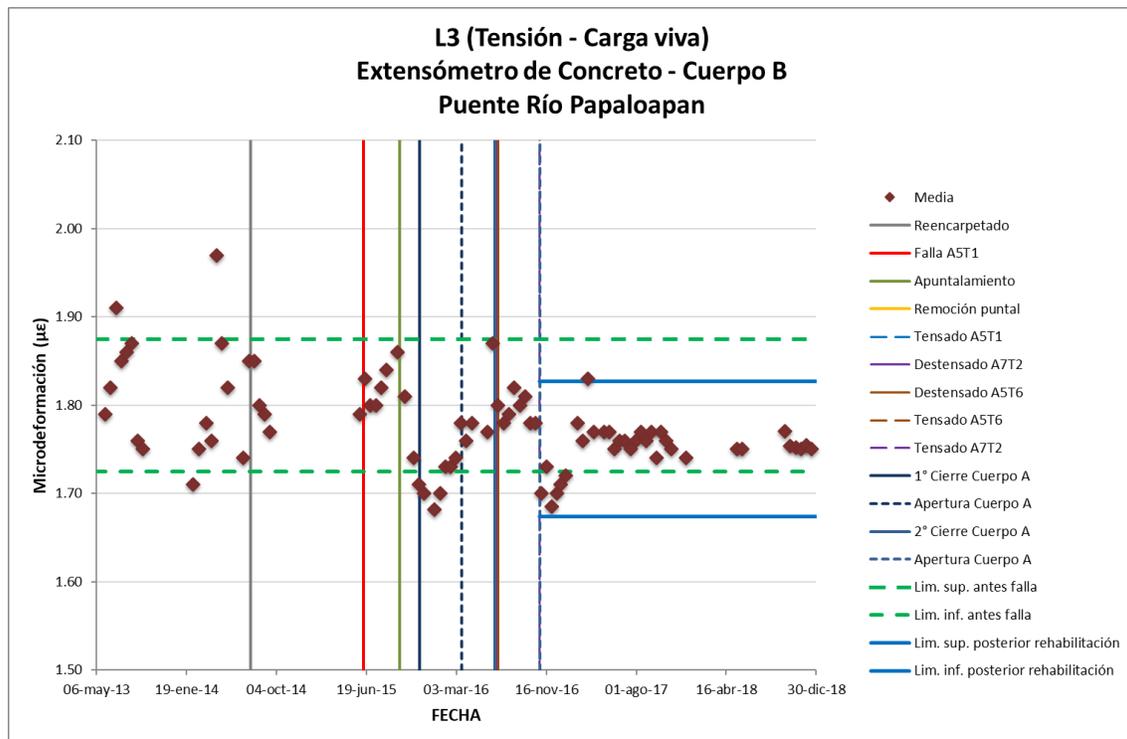


Figura 3.85 Media estadística del extensómetro L3 a tensión.

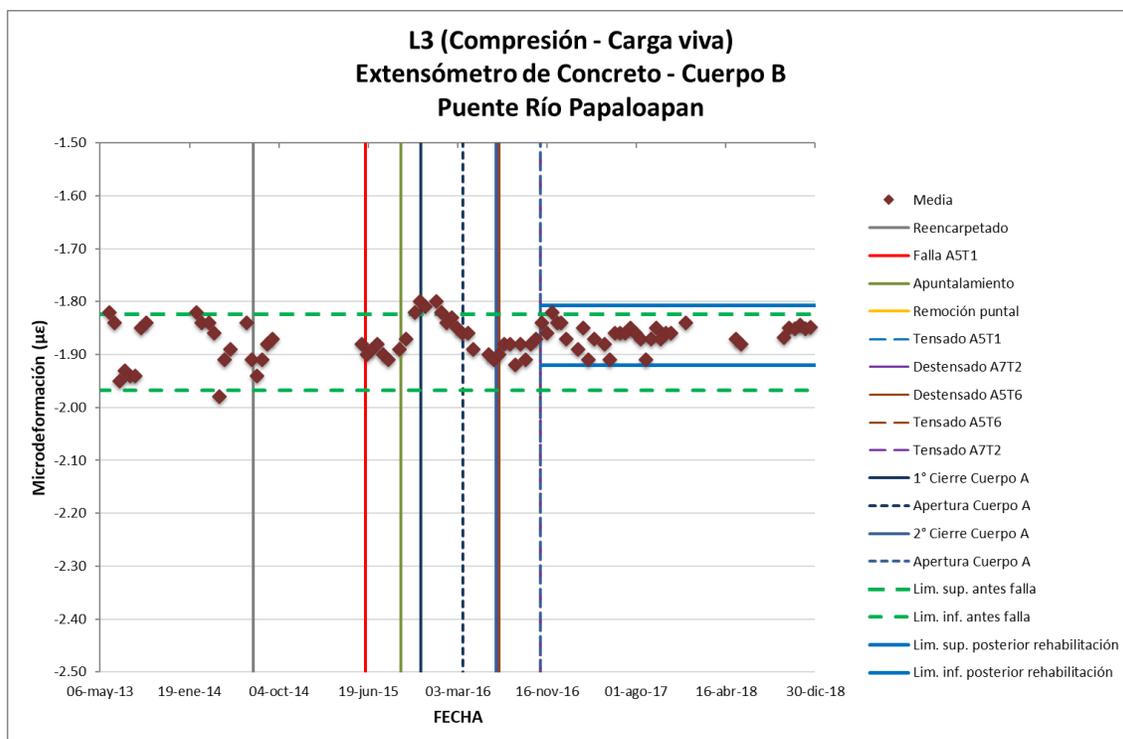


Figura 3.86 Media estadística del extensómetro L3 a compresión.

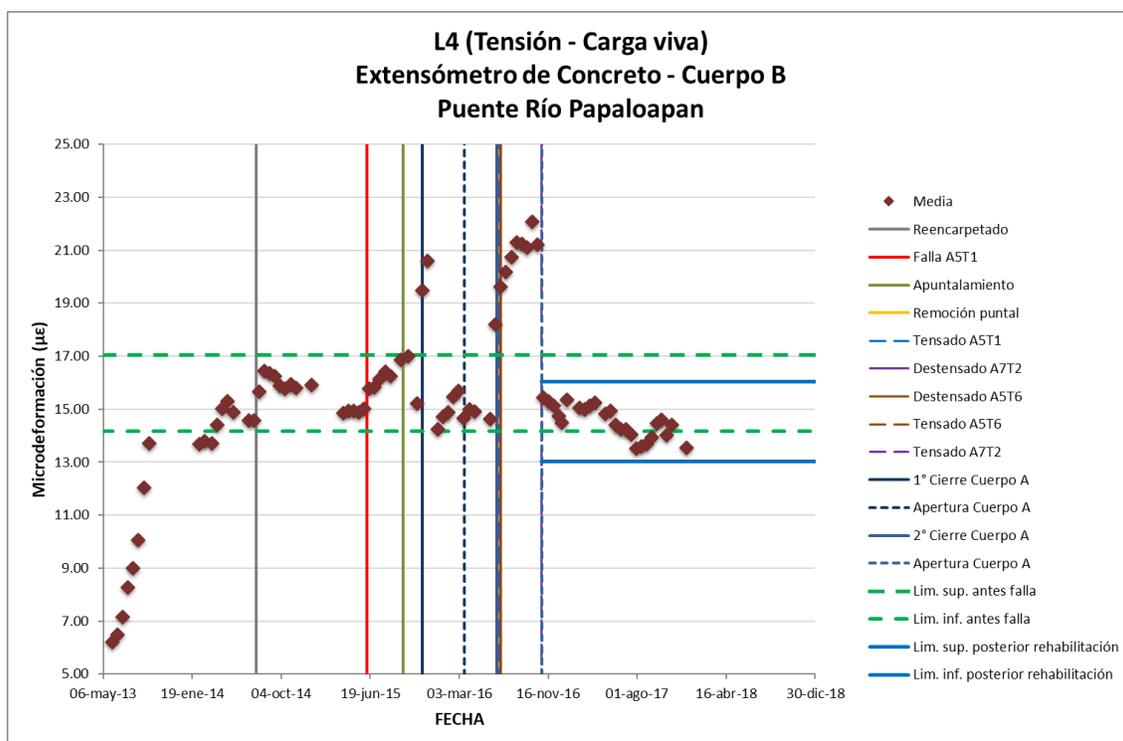


Figura 3.87 Media estadística del extensómetro L4 a tensión.

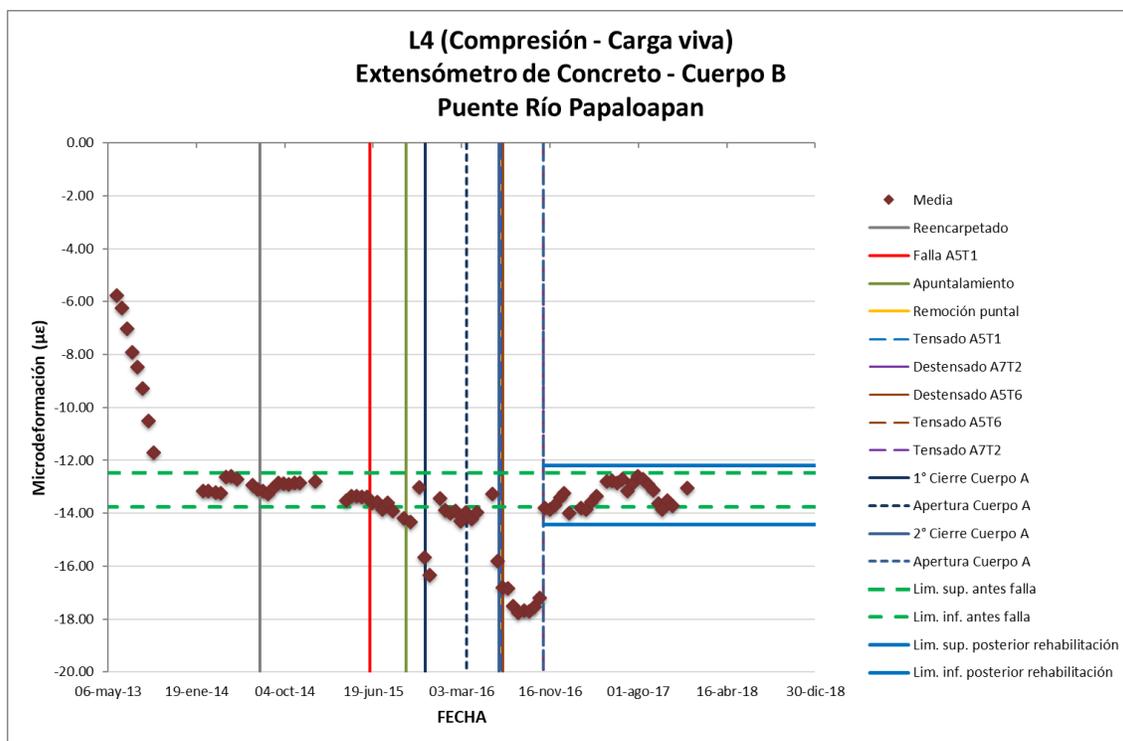


Figura 3.88 Media estadística del extensómetro L4 a compresión.

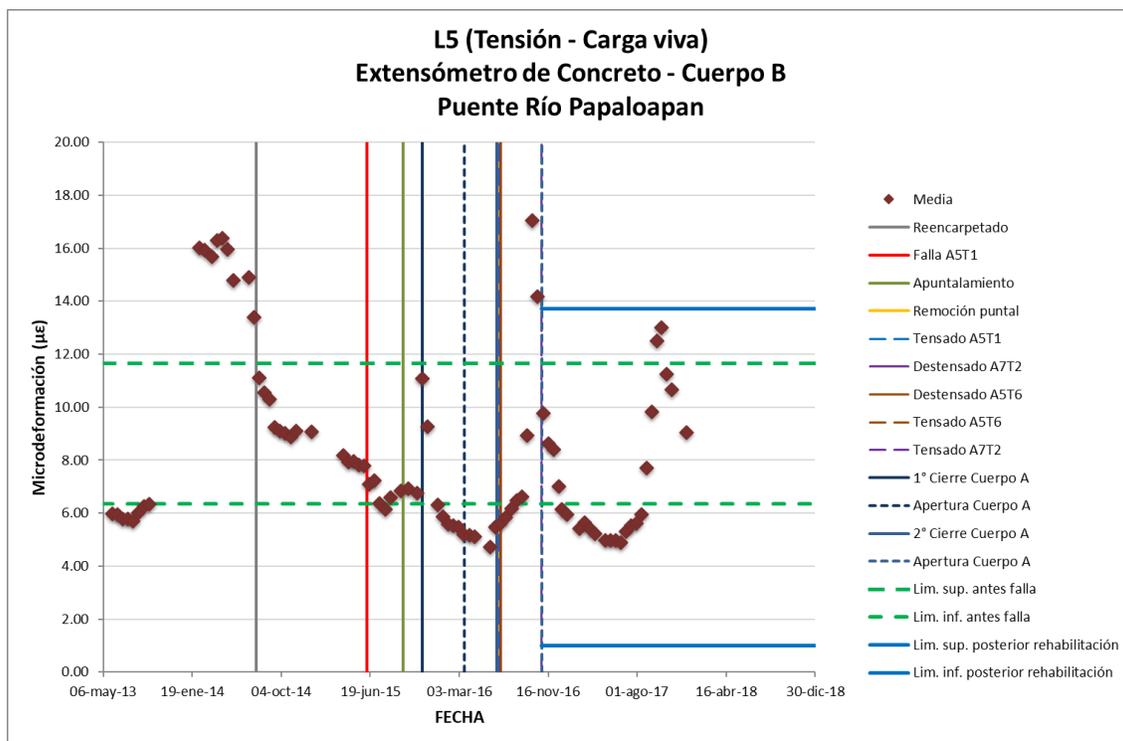


Figura 3.89 Media estadística del extensómetro L5 a tensión.

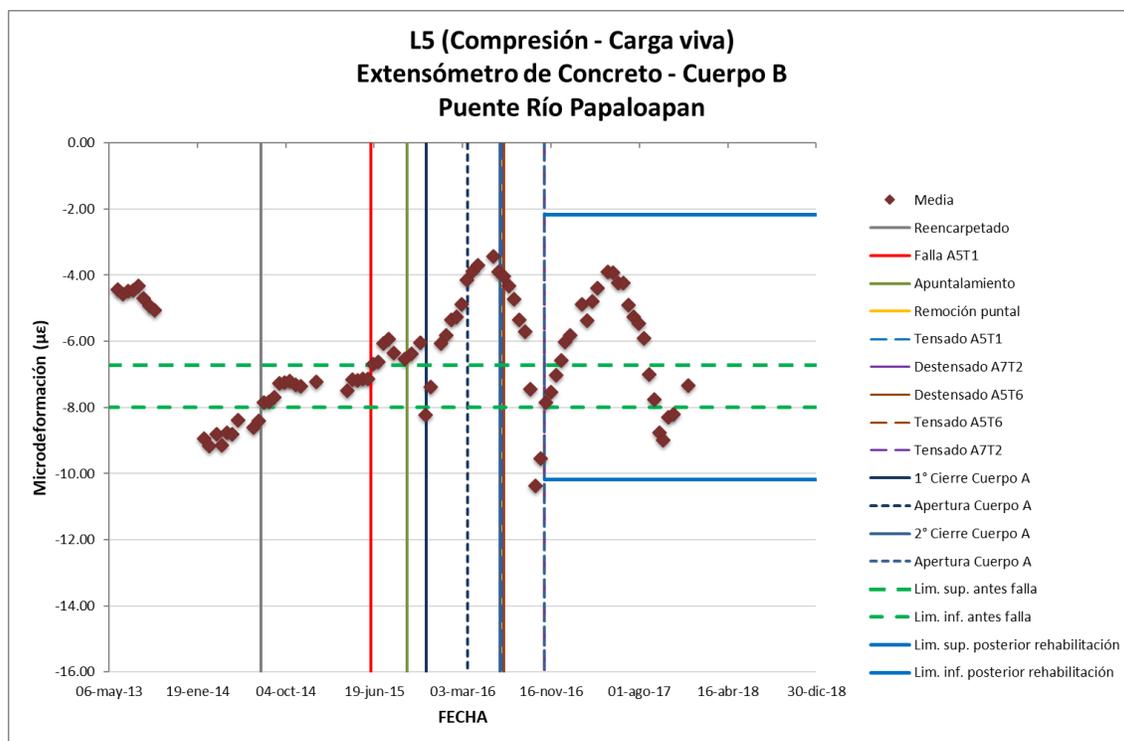


Figura 3.90 Media estadística del extensómetro L5 a compresión.

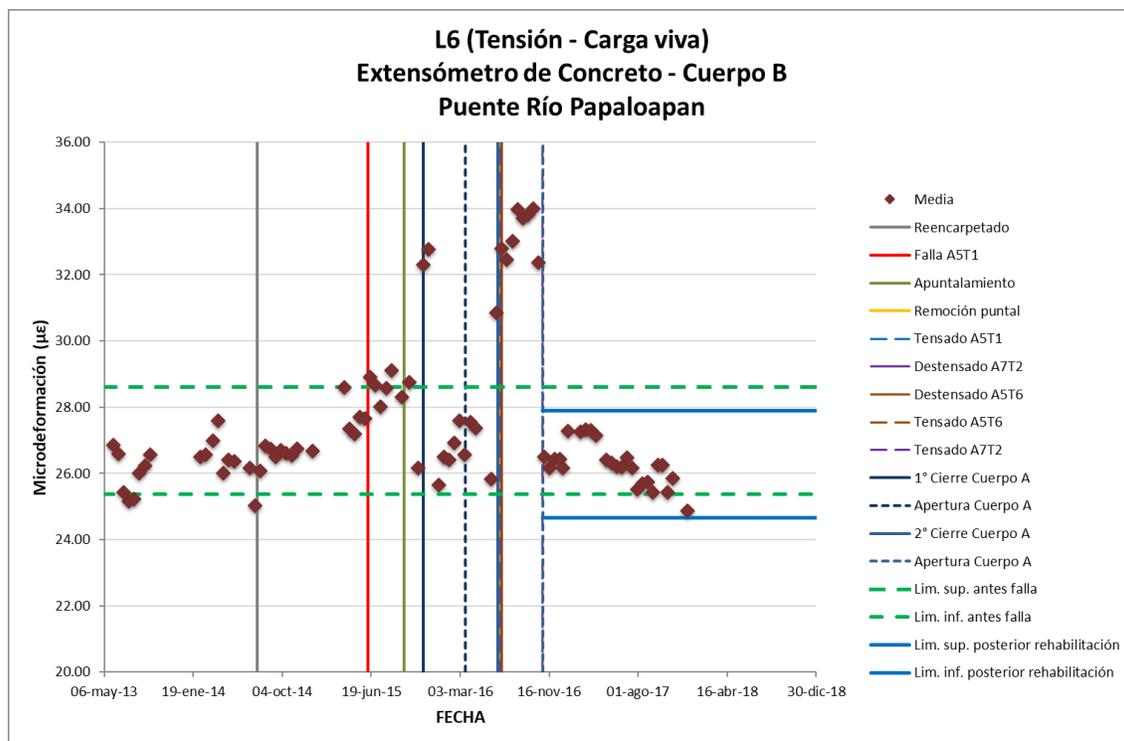


Figura 3.91 Media estadística del extensómetro L6 a tensión.

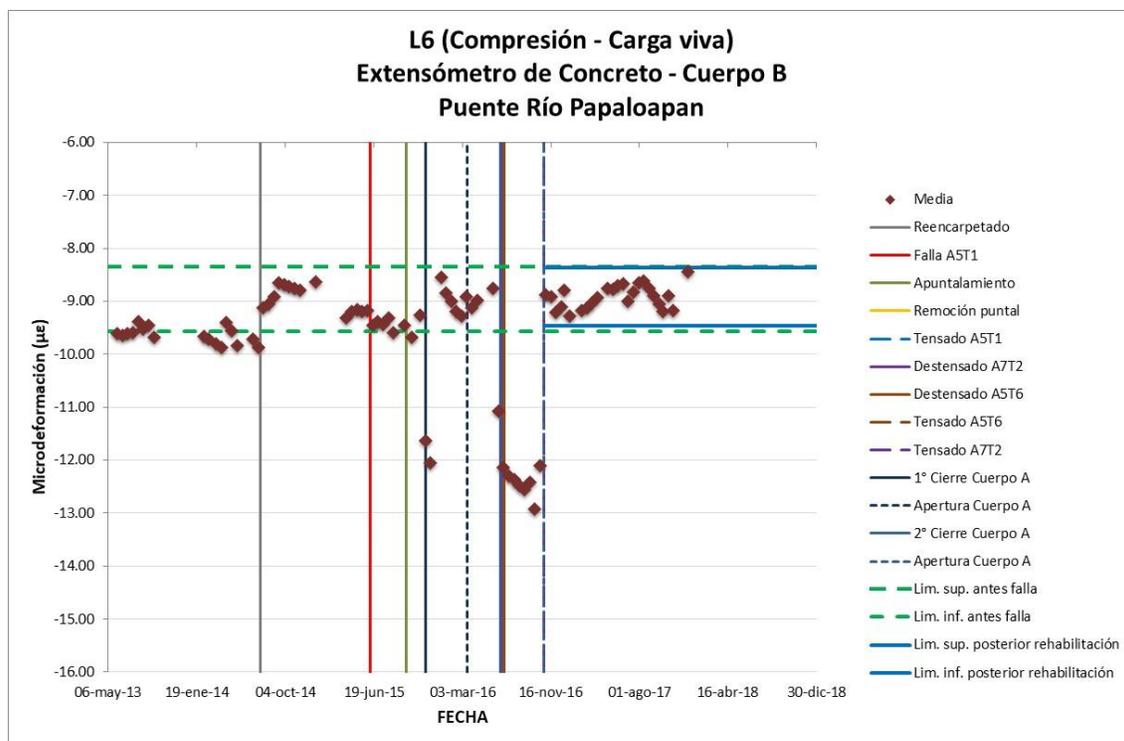


Figura 3.92 Media estadística del extensómetro L6 a compresión.

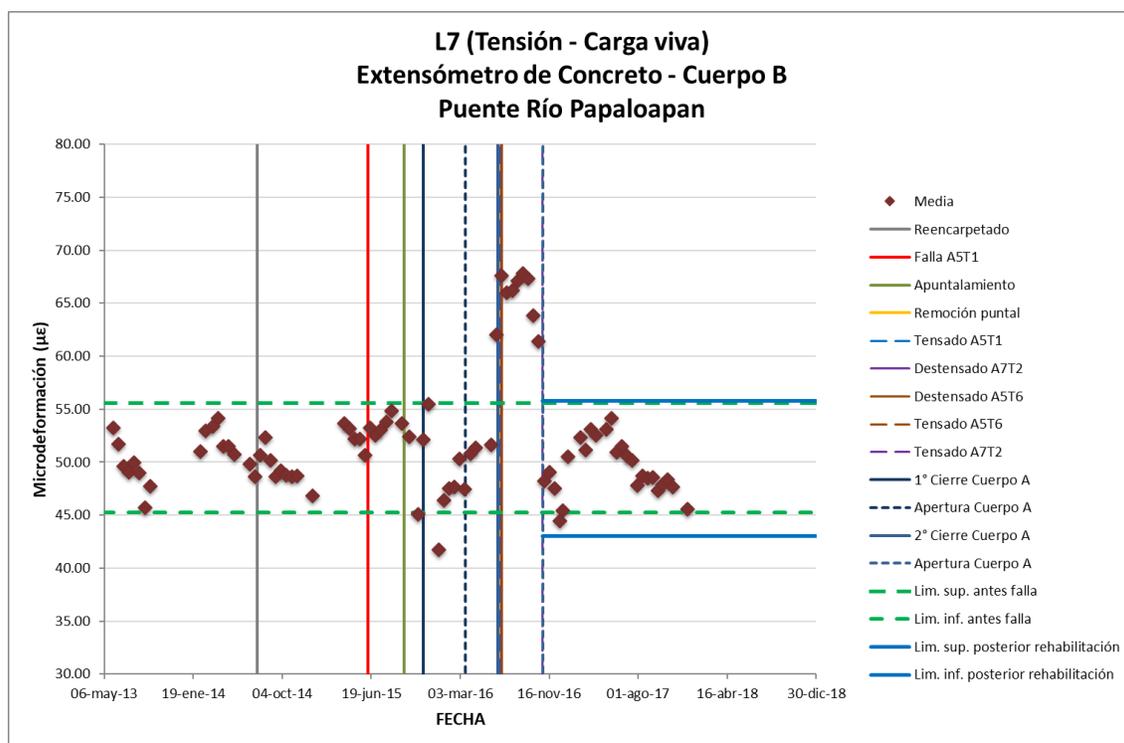


Figura 3.93 Media estadística del extensómetro L7 a tensión.

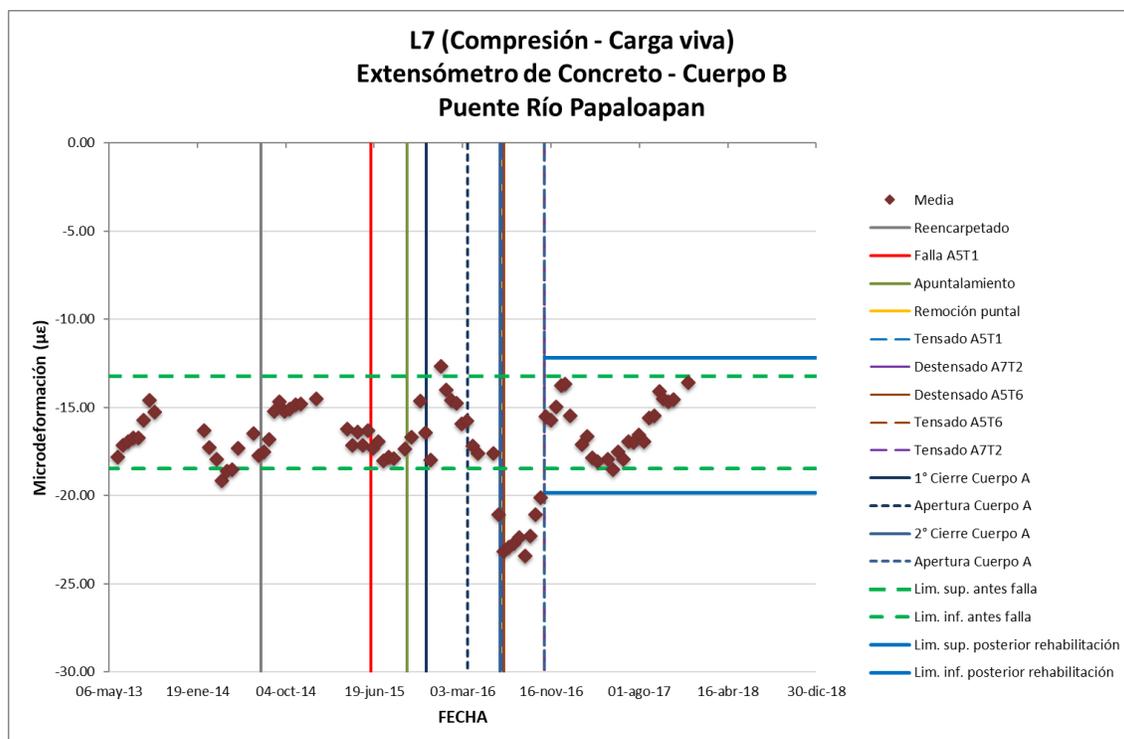


Figura 3.94 Media estadística del extensómetro L7 a compresión.

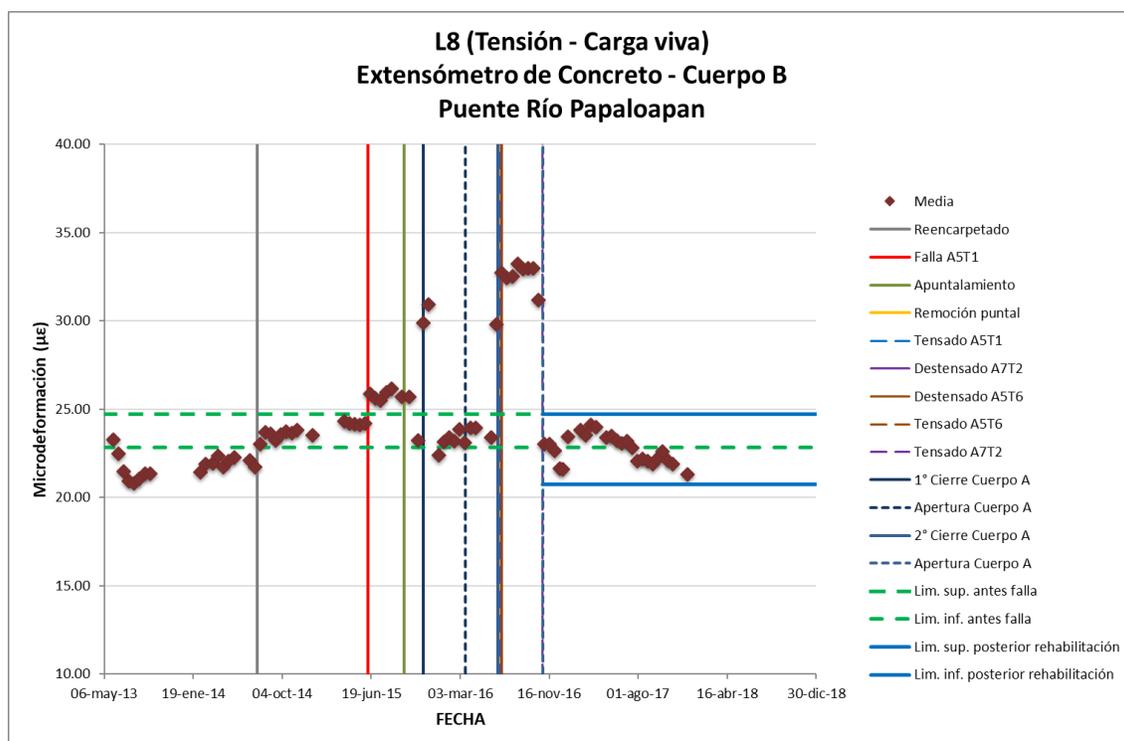


Figura 3.95 Media estadística del extensómetro L8 a tensión.

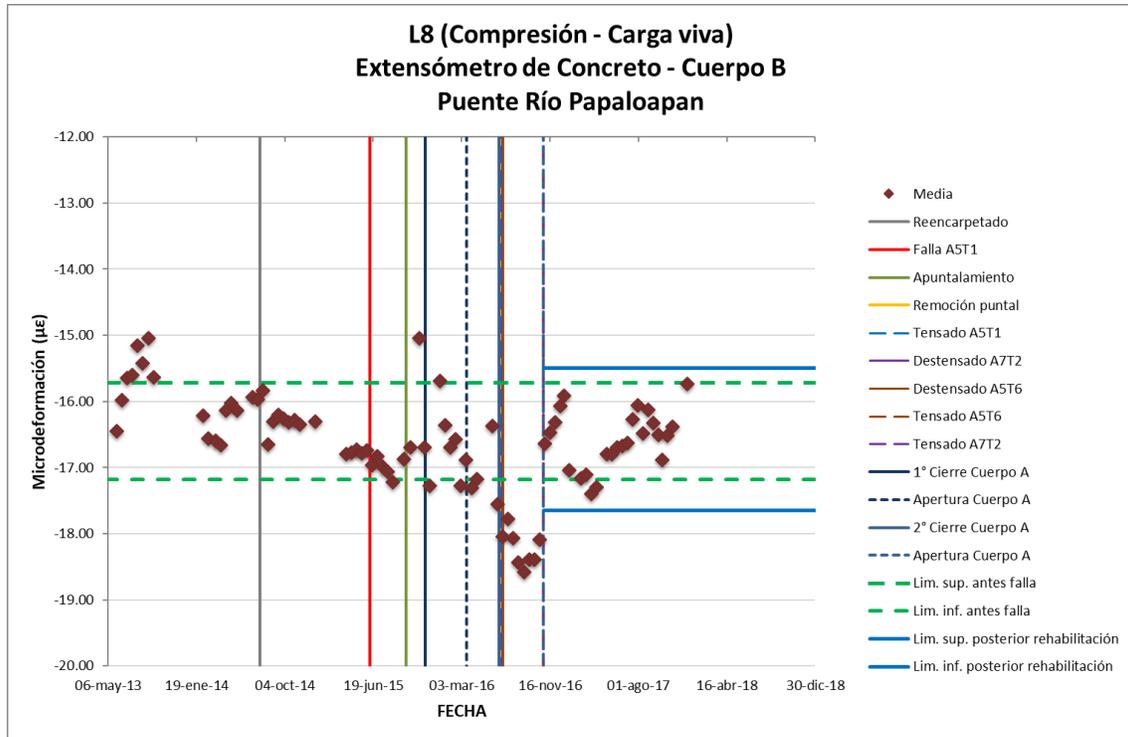


Figura 3.96 Media estadística del extensómetro L8 a compresión.

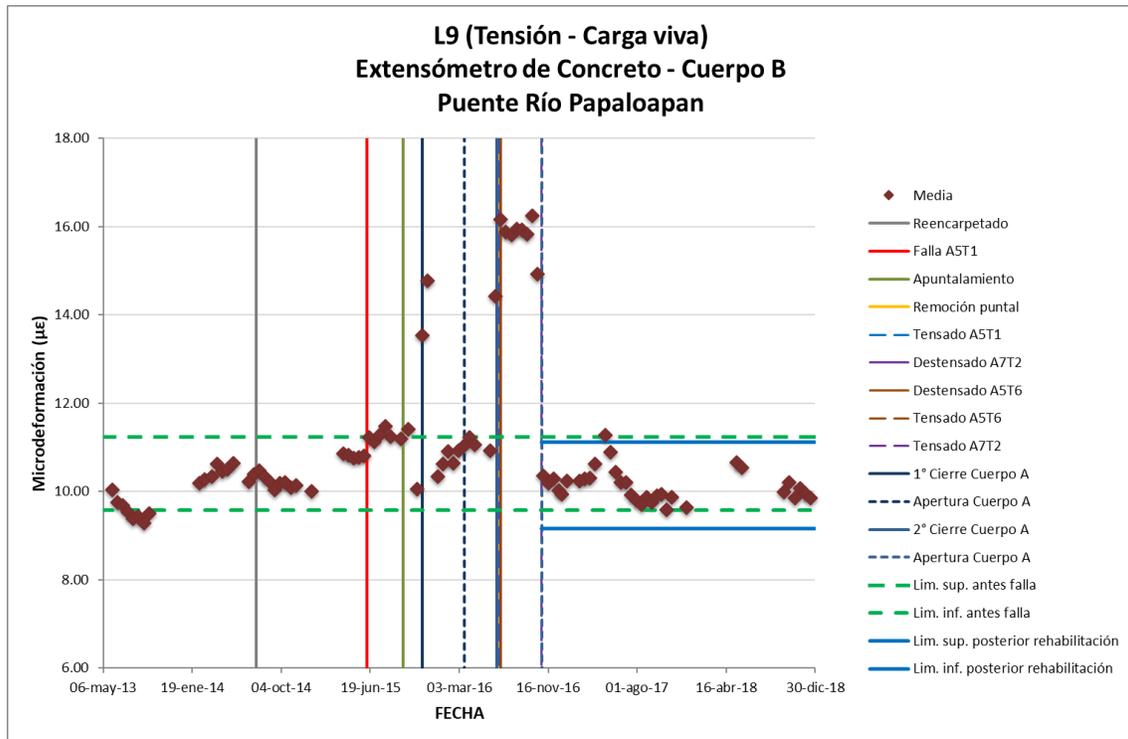


Figura 3.97 Media estadística del extensómetro L9 a tensión.

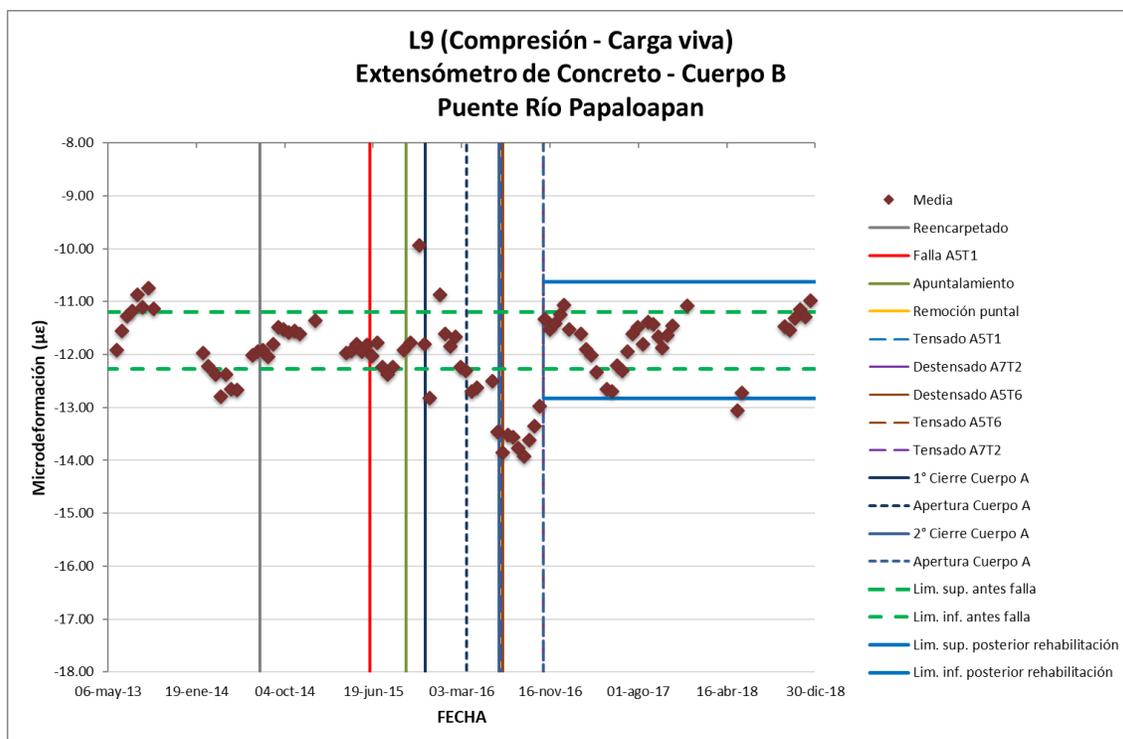


Figura 3.98 Media estadística del extensómetro L9 a compresión.

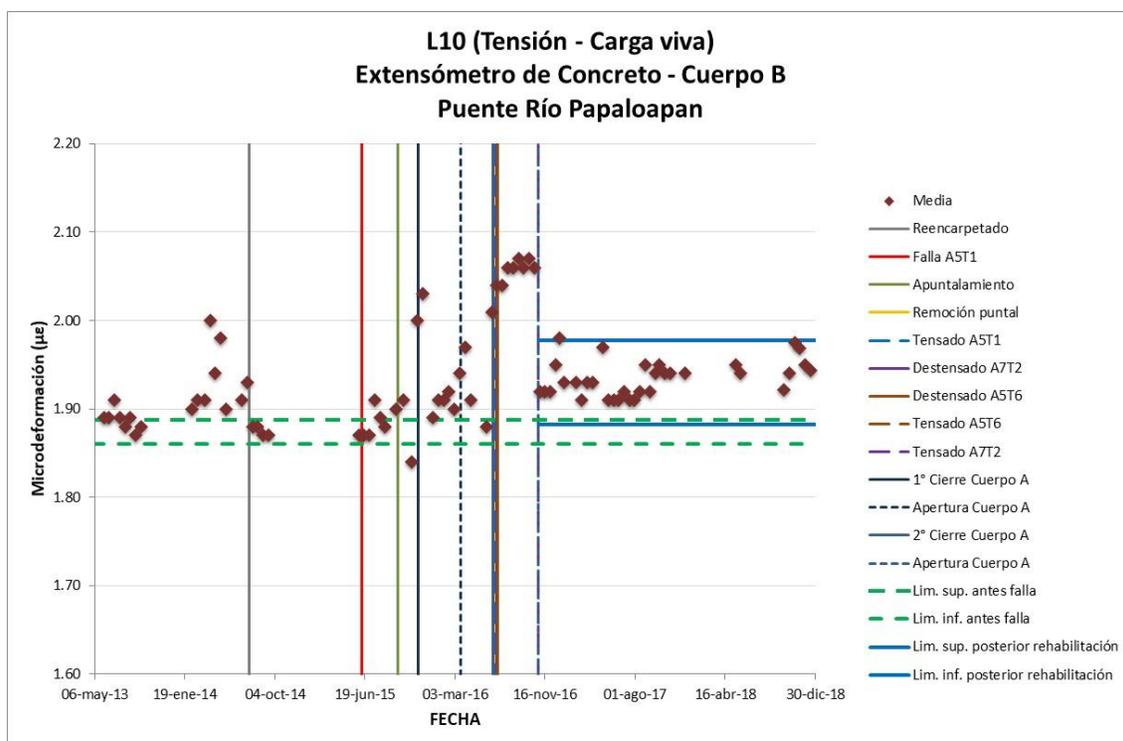


Figura 3.99 Media estadística del extensómetro L10 a tensión.

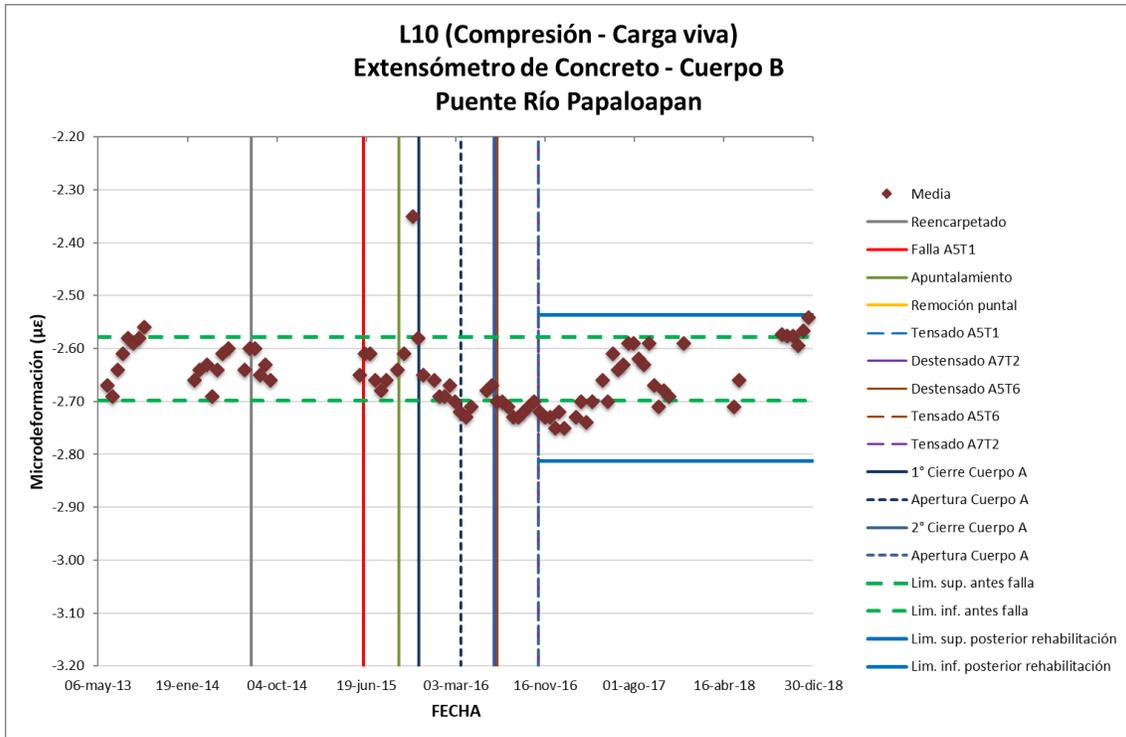


Figura 3.100 Media estadística del extensómetro L10 a compresión.

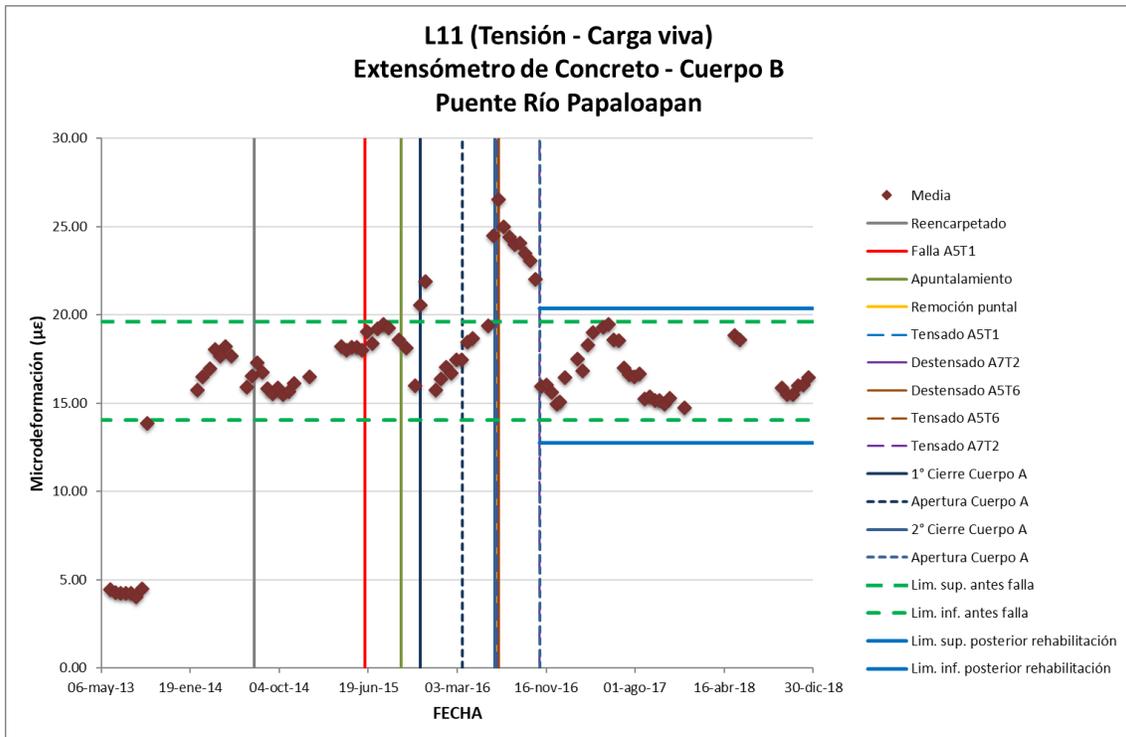


Figura 3.101 Media estadística del extensómetro L11 a tensión.

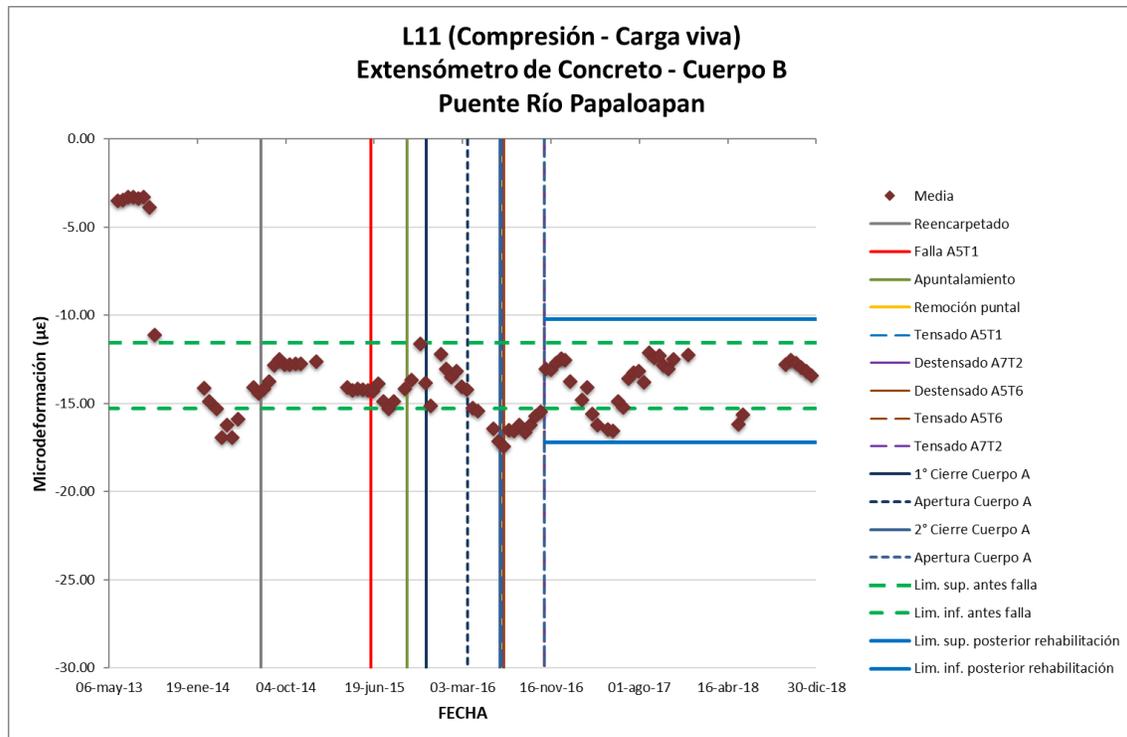


Figura 3.102 Media estadística del extensómetro L11 a compresión.

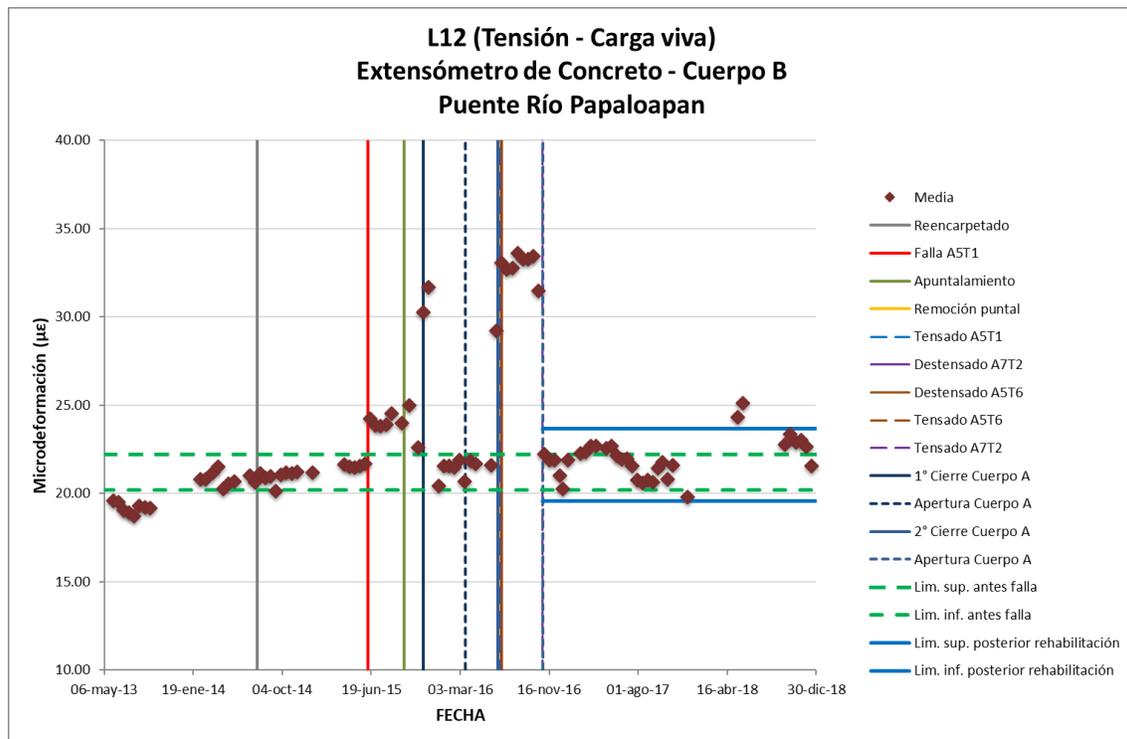
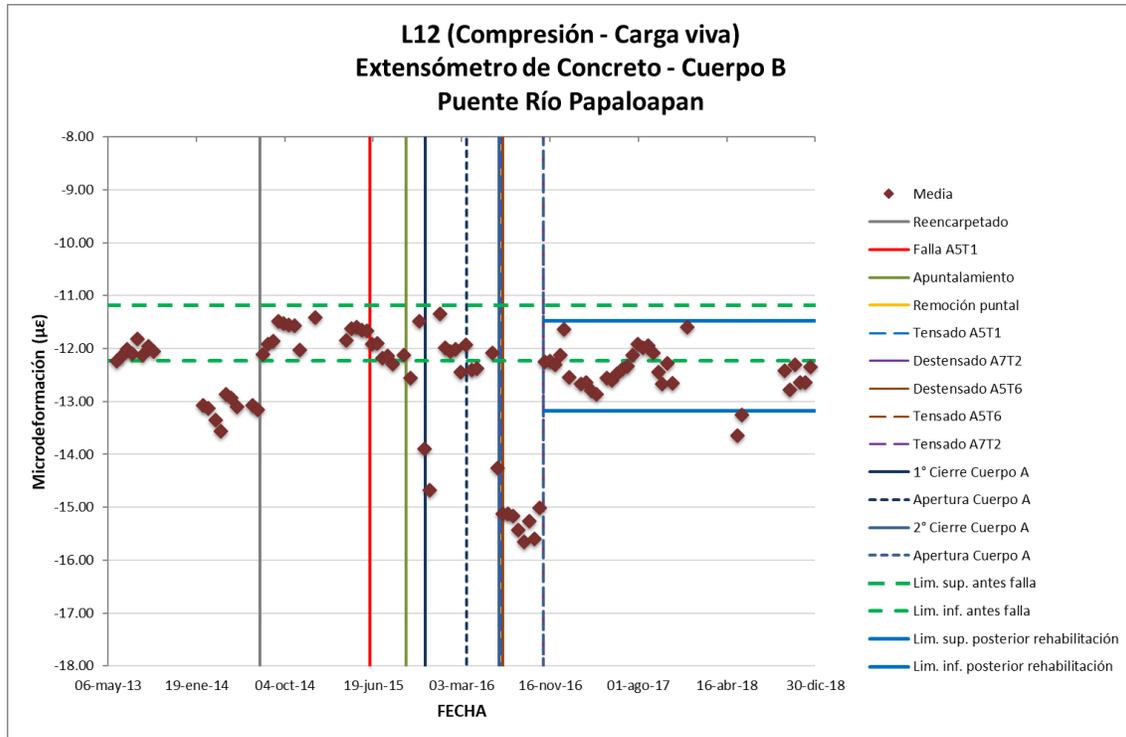
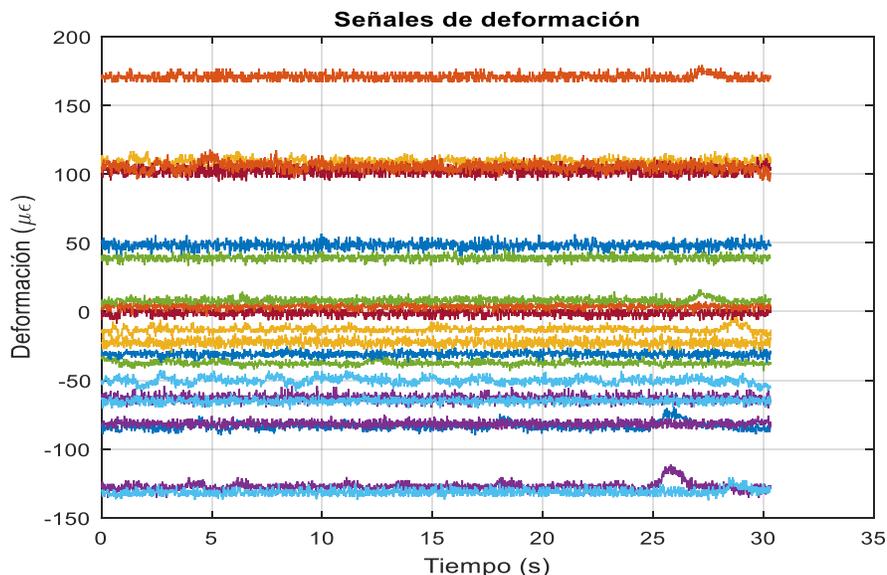


Figura 3.103 Media estadística del extensómetro L12 a tensión.

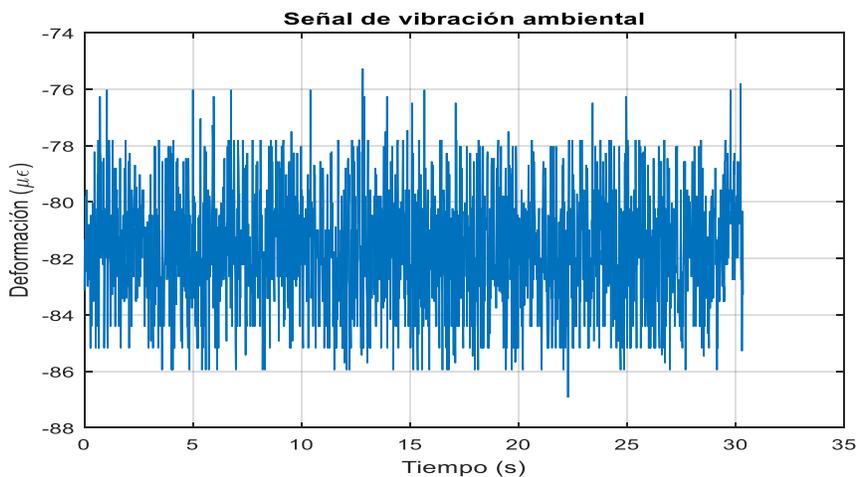


**Figura 3.104 Media estadística del extensómetro L12 a compresión.**

Para obtener las frecuencias naturales del puente Río Papaloapan y dar seguimiento a estos valores en el tiempo, se utilizaron las respuestas dinámicas de los sensores de deformación instalados en la parte inferior de las vigas principales. Los datos de los extensómetros fueron adquiridos a una frecuencia de muestreo de 62.5 Hz. De los bloques de datos obtenidos en tiempo real se identificó un intervalo de tiempo donde el puente se encontraba sin excitaciones por carga viva, es decir, únicamente sujeto a vibraciones ambientales como viento y las provocadas después del paso de un vehículo como las mostradas en la figura 3.105. En la figura 3.106 se puede observar la respuesta dinámica típica de un extensómetro.

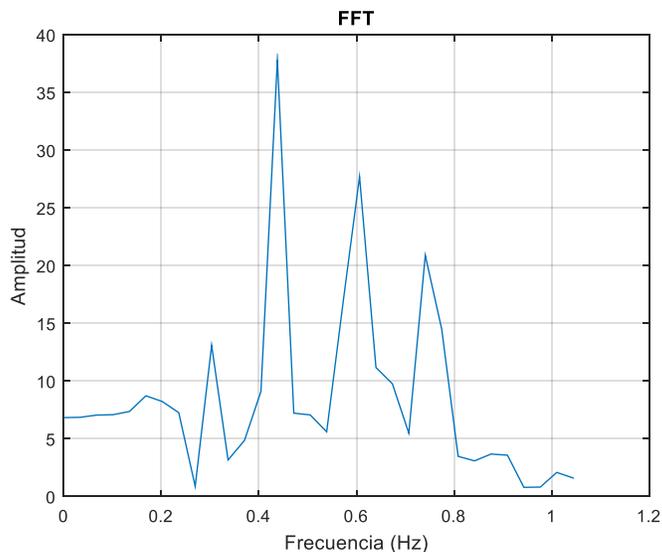


**Figura 3.105 Señales dinámicas de deformación producto de vibraciones ambientales.**

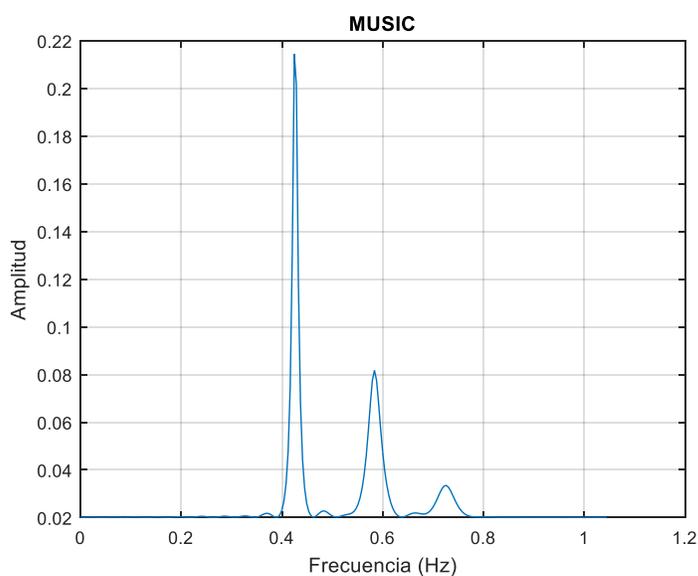


**Figura 3.106 Señal dinámica de un extensómetro producto de vibración ambiental.**

Las respuestas dinámicas fueron transformadas del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia a través de la transformada de Fourier (FFT) [9] para identificar las frecuencias y el ángulo de fase, adicionalmente se utilizó también la se utilizó la transformada MUSIC [10], que es un algoritmo de alta resolución para señales con altos niveles de ruido en la señal dinámica, las figuras 3.107 y 3.106 muestran la transformada de Fourier y la transformada MUSIC respectivamente.



**Figura 3.107 Espectro de Fourier para la señal de deformación.**



**Figura 3.108 Espectro de MUSIC para la señal de deformación.**

De los espectros se identificaron tres frecuencias naturales en un rango de 0-1 Hz, al obtener la amplitud y la fase de cada frecuencia para cada uno de los extensómetros y normalizándola con respecto al sensor de referencia L6, se obtuvieron las formas modales de deformación de los tres primeros modos de vibrar del puente Río Papaloapan (figuras 3.109, 3.110 y 3.111), que fueron comparadas a través del Criterio de Aseguramiento Modal (MAC) con las formas modales de un modelo de elemento finito.

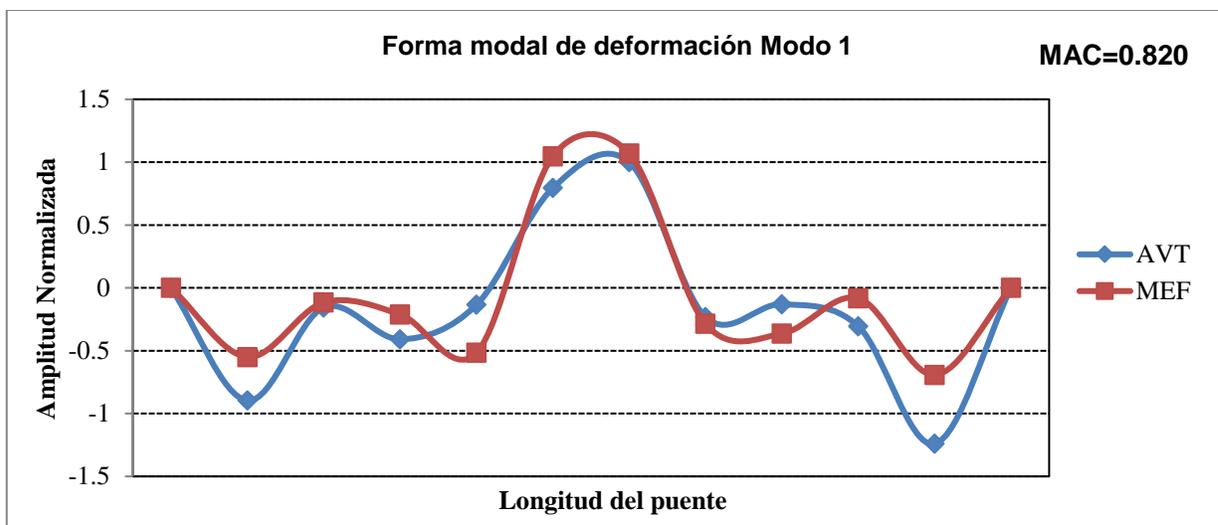


Figura 3.109 Forma modal del primer modo de vibración.

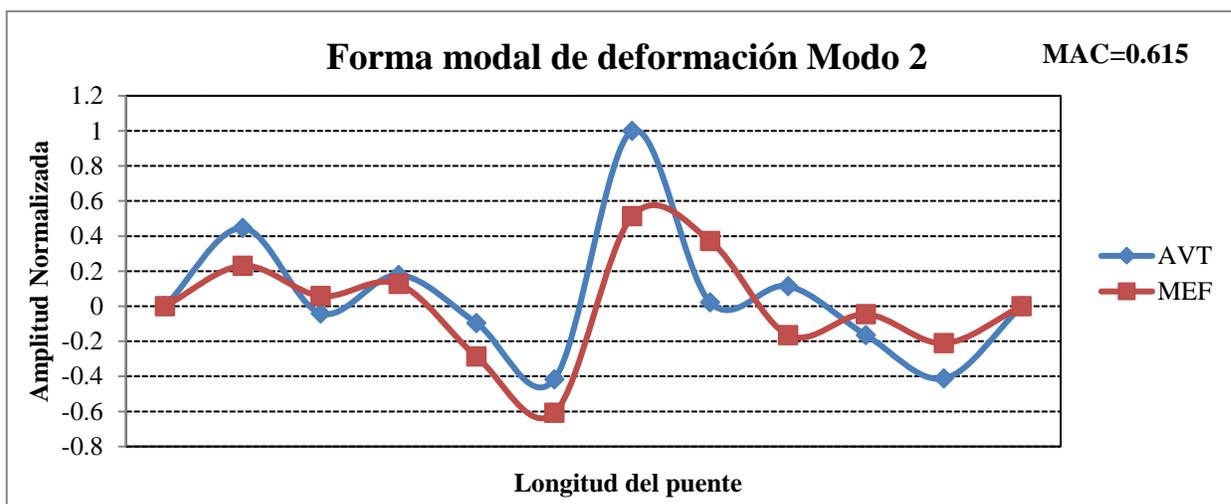


Figura 3.110 Forma modal del segundo modo de vibración.

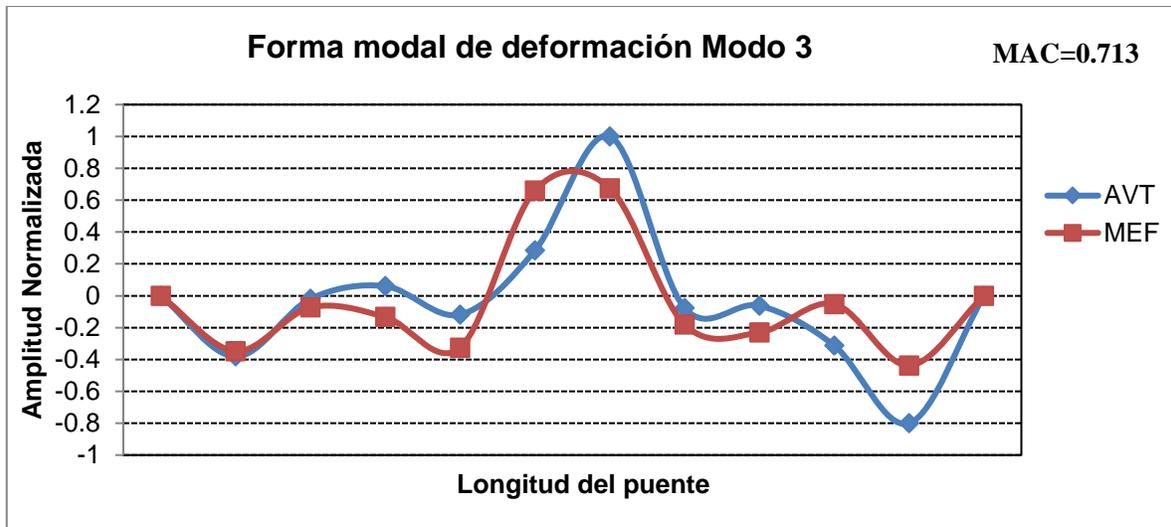


Figura 3.111 Forma modal del tercer modo de vibración.

Con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos de las señales del monitoreo remoto, se diseñó una prueba dinámica utilizando acelerómetros en el puente Río Papaloapan, los acelerómetros fueron colocados tanto aguas abajo como aguas arriba en las posiciones de los tirantes 2, 7 y 12 de cada semi-arpa y al centro del claro central. Para las pruebas se adquirió la respuesta dinámica de cada sensor en bloques de 5 minutos a una frecuencia de adquisición de 32 Hz. La señal típica de un acelerómetro ante excitaciones ambientales se muestra en la figura 3.112.

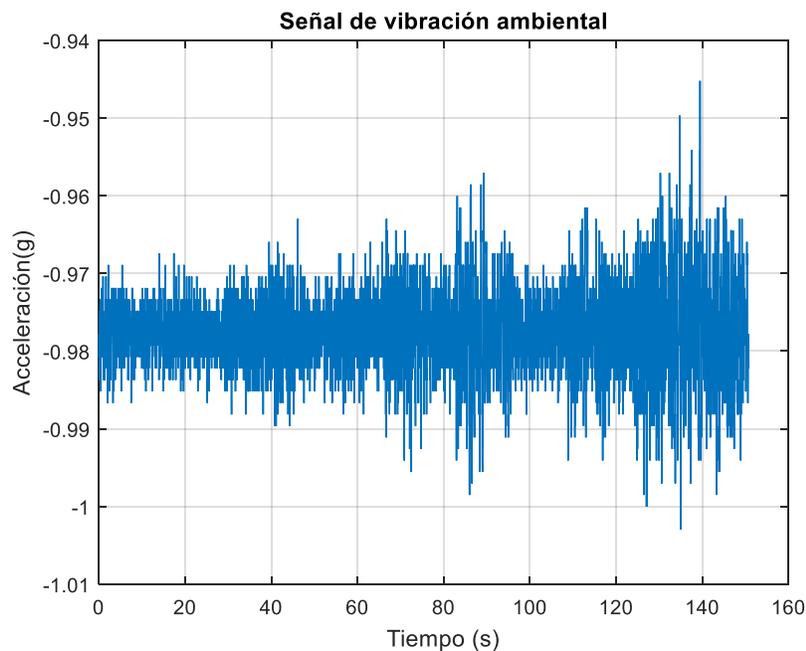


Figura 3.112 Respuesta dinámica de aceleración con vibración ambiental.

Las respuestas dinámicas de cada sensor fueron transformadas del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia utilizando la transformada rápida de Fourier (figura 3.113) y transformada de alta resolución de MUSIC (figura 3.114).

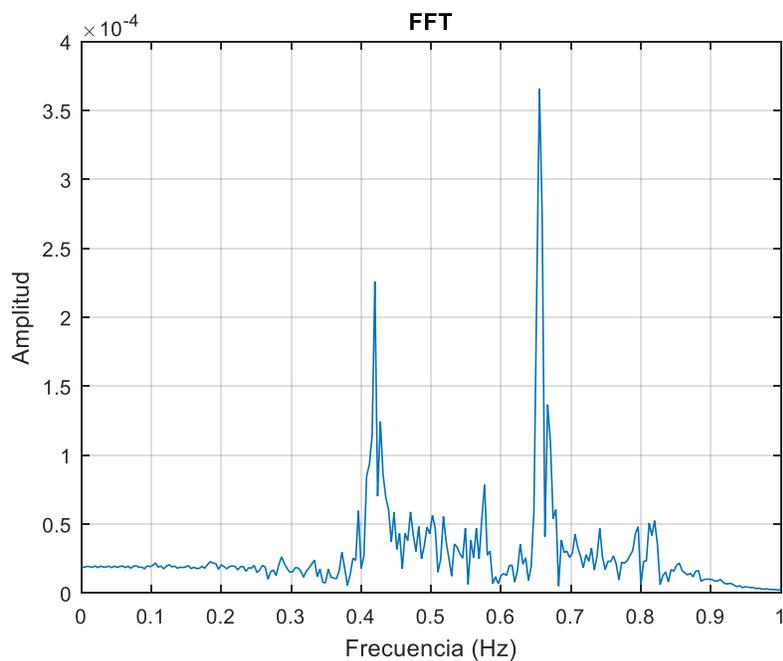


Figura 3.113 Espectro de Fourier para la respuesta dinámica de aceleración.

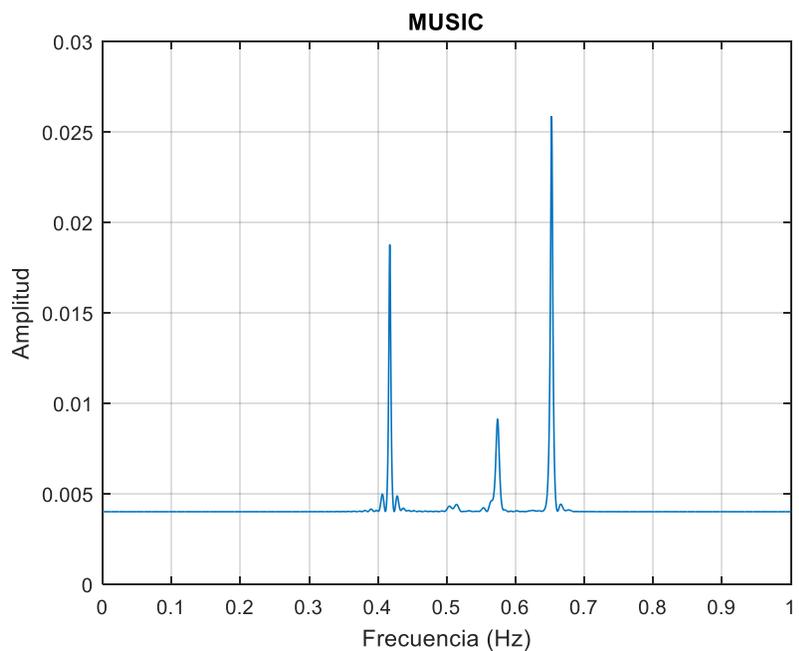


Figura 3.114 Espectro de MUSIC de la señal dinámica de aceleración.

De los espectros de frecuencia se identificaron tres frecuencias naturales en un rango de 0-1 Hz, al obtener la amplitud y la fase de cada frecuencia de los acelerómetros y normalizándola, se obtuvieron las formas modales de desplazamiento de los tres primeros modos de vibrar del puente Río Papaloapan (figuras 3.115, 3.116 y 3.117), que fueron comparadas a través del Criterio de Aseguramiento Modal (MAC) con las formas modales de un modelo de elemento finito.

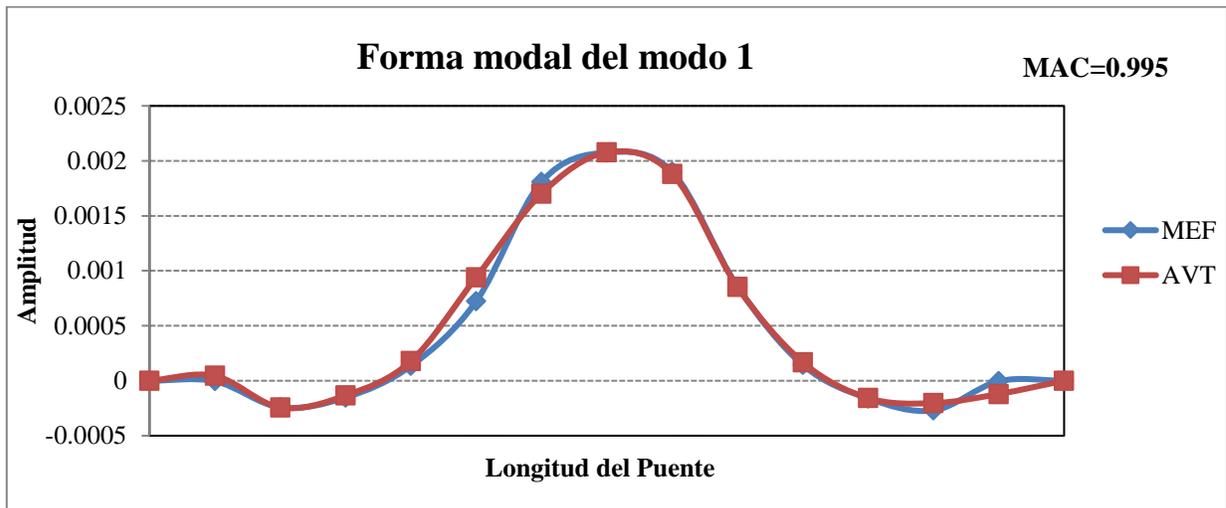


Figura 3.115 Forma modal del primero modo.

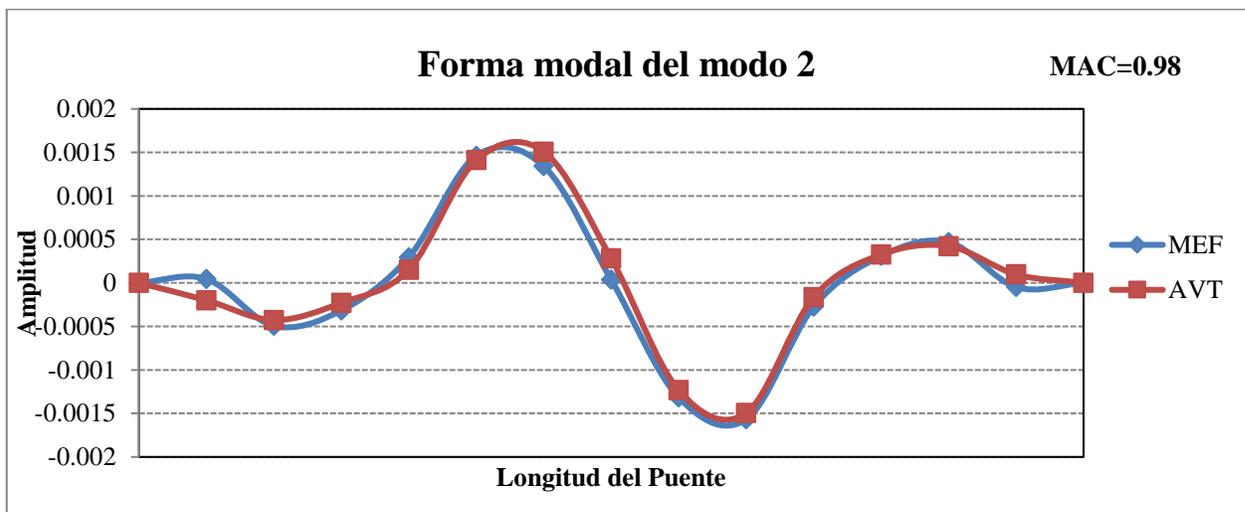


Figura 3.116 Forma modal del segundo modo.

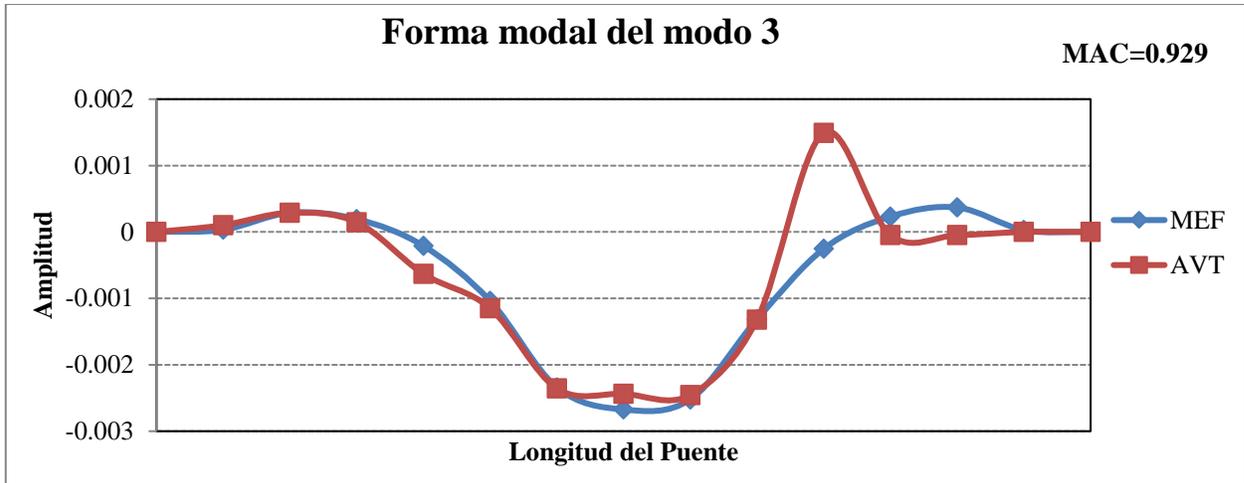


Figura 3.117 Forma modal del tercer modo.

Como se puede apreciar en las figuras 3.118, 3.119 y 3.120 existe una mejor correlación de las formas modales utilizando las respuestas dinámicas de los acelerómetros que cuando se utilizan las respuestas dinámicas de desplazamiento. En las figuras 3.118 a 3.119 se pueden observar las formas modales de los tres primeros modos obtenidas de los acelerómetros aguas arriba y aguas abajo, con lo cual se puede identificar si el modo es por flexión o por torsión, siendo los dos primeros modos por flexión del tablero y el tercero un modo por torsión.

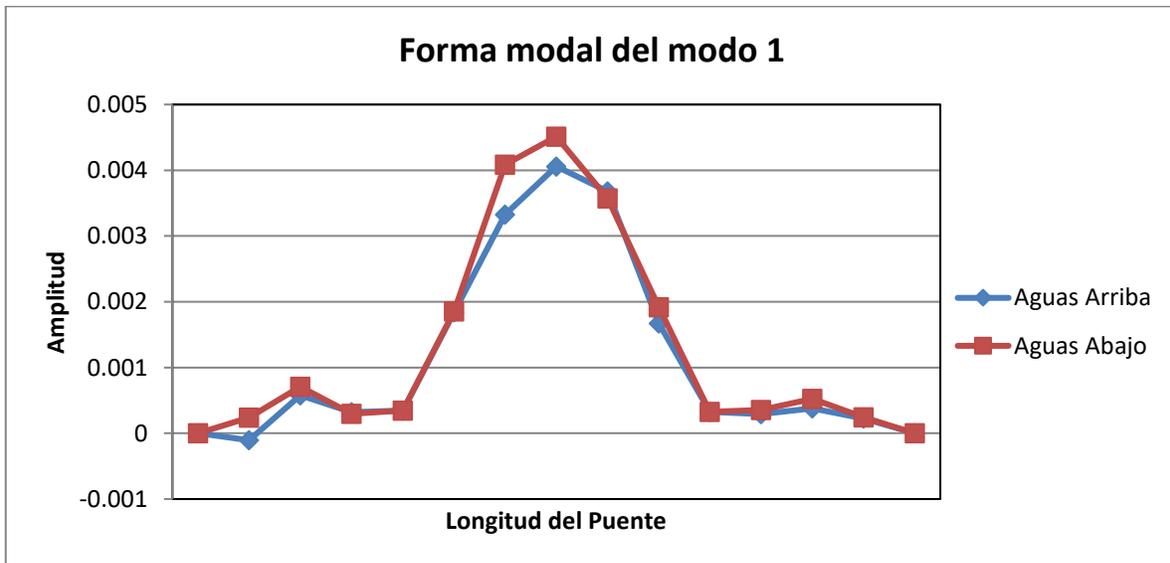


Figura 3.118 Forma modal del primer modo (Flexión del tablero).

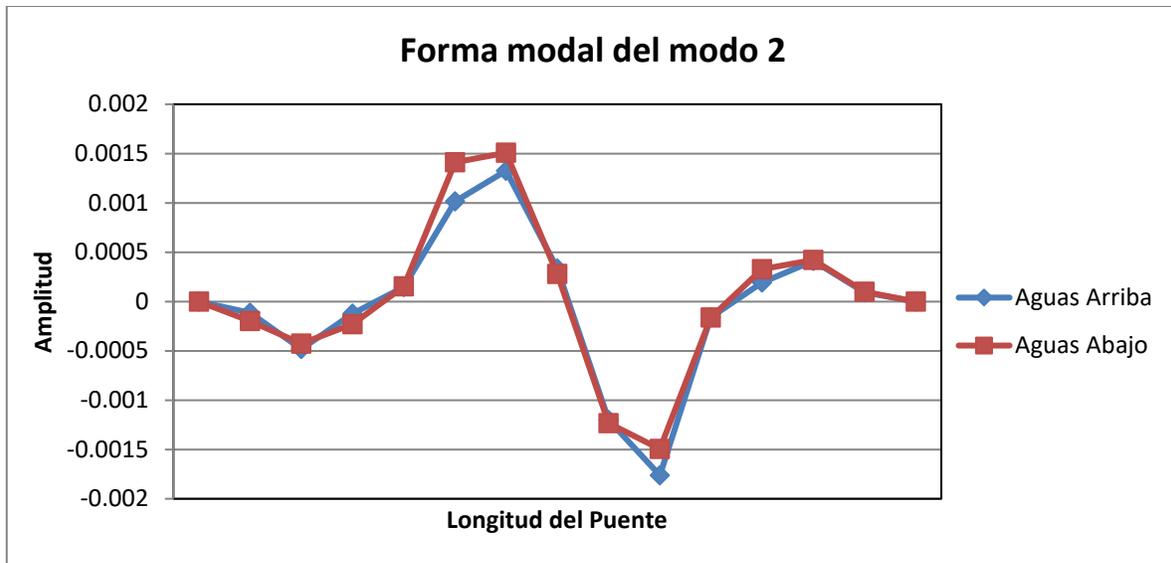


Figura 3.119 Forma modal del segundo modo (Flexión del tablero).

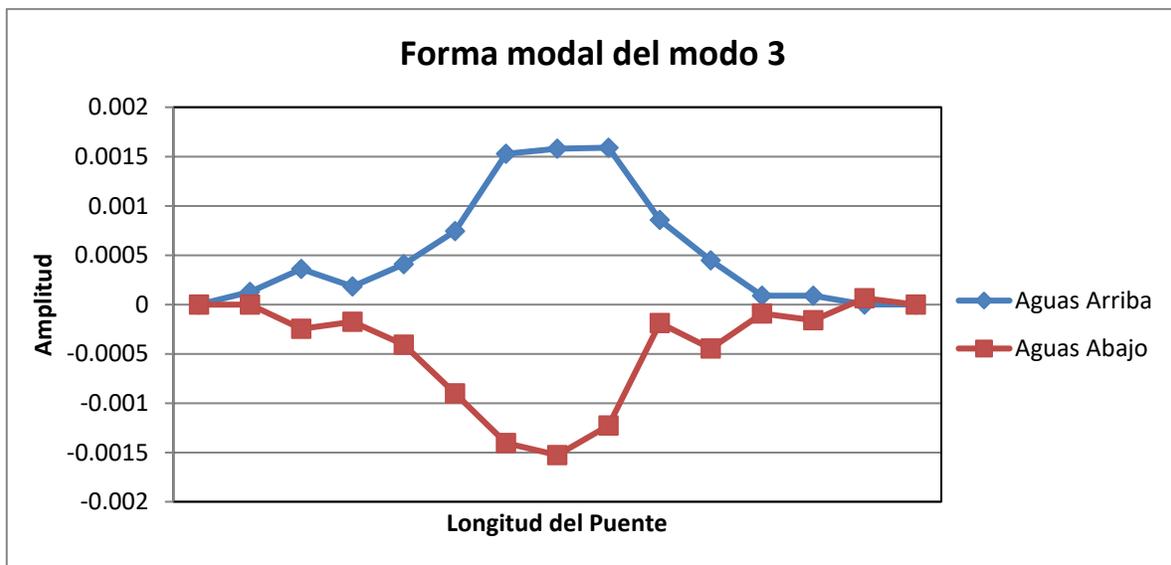


Figura 3.120 Forma modal del tercer modo (Torsión del tablero).

La tabla 3.3 presenta un resumen de los modos identificados por el modelo de elemento finito del puente Río Papaloapan y a través del análisis de las respuestas dinámicas de los extensómetros de fibra óptica y los acelerómetros instalados de manera temporal.

**Tabla 3.3 Frecuencias naturales del puente Río Papaloapan.**

f MEF (Hz)	f STRAIN(Hz)	f ACC (Hz)	MACSTRAIN(%)	MACACC(%)
<b>0.424</b>	0.416	0.418	82	99.5
<b>0.599</b>	0.571	0.577	61.5	98.4
<b>0.682</b>	0.651	0.653	71.3	92.9

La tabla 3.4 muestra las frecuencias calculadas durante el año 2018 a partir de los extensómetros ubicados en las vigas principales del puente Río Papaloapan. Como se puede observar el mayor cambio es en el segundo modo con una variación del 1.07 %. Por lo que se puede concluir que no hay cambios significativos en este parámetro estructural.

**Tabla 3.4 Frecuencias naturales registradas durante el 2018.**

Monitoreo durante el 2018	Modo 1 (Hz) 0.416 Hz		Modo 2 (Hz) =0.577 Hz	
	Modo 1	% de cambio	Modo 1	% de cambio
<b>ENERO</b>	0.4182	0.53	0.5732	0.66
<b>MAYO</b>	0.4144	0.38	0.5694	1.32
<b>JUNIO</b>	0.4140	0.48	0.5708	1.07
<b>JULIO</b>	0.4147	0.31	0.5709	1.06
<b>AGOSTO</b>	0.4117	1.03	0.5728	0.73
<b>SEPTIEMBRE</b>	0.4131	0.70	0.5720	0.87



## 4 Conclusiones

---

Del análisis de los datos del sistema de monitoreo realizado durante el año 2018, se puede concluir que el puente se encuentra en condiciones adecuadas de servicio y seguridad. No se han registrado cambios en los parámetros estructurales, las variaciones que registradas se deben a pequeños cambios en las condiciones del tránsito, condiciones climatológicas e incertidumbre en la medición de los equipos.

Las tensiones registradas durante el año 2018, empleando el método indirecto, fueron calculadas utilizando como referencia el pesaje directo realizado por la empresa Freyssinet SA de CV en el año 2016, por lo que existen cambios en el cálculo de las tensiones de los tirantes, empleando como factor de calibración, las mediciones del pesaje directo del año 2008. Estos cambios se deben a los procedimientos, incertidumbre y sensibilidad de los equipos utilizados por cada empresa que realiza un pesaje directo por lo que es necesario uniformizar los procedimientos y especificaciones de los equipos utilizados en el pesaje directo.

Es necesario el mantenimiento del canal de fibra óptica que involucra a los sensores de deformación L4 a L8, ubicados aguas arriba, el cual ya fue programado para el primer trimestre del año 2019. Asimismo, se planea cambiar los acelerómetros de fibra óptica instalados en los cables 4 y 11 de cada semi arpa para tener una mayor sensibilidad en los registros de medición. Estos cambios se realizarán una vez concluido el mantenimiento mayor del puente Río Papaloapan en el año 2020.



## Bibliografía

---

1. López J. A., Carrión F. J., Quintana J. A., Samayoa D., Lomelí M. G., Orozco P. R., “*Verification of the Ultrasonic Qualification for Structural Integrity of partially Embedded Steel Elements*”, *Advances Materials Research*, , 65(2009), pp. 69-78, 2009.
2. Astiz M. A., “*Composite Construction in Cable-Stayed Bridge Towers*”, *International Conference on Composite Construction – Conventional and Innovative*, Conference Report, 16-18 September, Innsbruck, Austria, pp 127-132, 1997
3. Aguirre A., Carbajal J., “*Análisis en el Tirante 11 del Puente Papaloapan*”, *Corporación Mexicana de Investigación de Materiales S. A. de C. V.*, Reporte Interno AF-IFT/00087, Saltillo, Coahuila, México, 2000.
4. López A., Poblano C., “*Análisis de falla y Pruebas de Fatiga del Anclaje Desprendido del Tirante 11, Lado Agua, Torre 3, del Puente Río Papaloapan*”, *Instituto Mexicano del Transporte*, Reporte Interno, EQ001/00, Sanfandila, Querétaro, México, 2000.
5. ASTM, “*Standard Specification for Steel Castings, High Strength, for Structural Purposes*”, ASTM designation, A148/A 148M-93B (rev 98), West Conshohocken, PA, U. S. A., 2005.
6. Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), “*Programa sectorial de comunicaciones y transportes*”, 2013.
7. Gobierno de la Republica, “*Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018*”, 2013
8. Carrión, F. J., López, J. A., Quintana, J. A., Guzmán, A. 2007. Nonlinear Assessment of Cable Vibration in a Stayed Bridge. *Experimental Mechanics*. Vol. 48. p.p. 153-161.
9. Cooley, J. W., Tukey, J. W. 1965. An algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. *Mathematics of Computation*. Vol. 19, pp. 297-311.
10. Amezquita-Sanchez, J.P., Garcia-Perez, A., Romero-Troncoso, R., Osornio-Rios, R., Herrera-Ruiz, G., 2013. High-resolution spectral-analysis for identifying the natural modes of a truss-type structure by means of vibrations. *J. Vib. Control* 19 (16), 2347–2356.





Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"  
Parque Tecnológico San Fandila  
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México  
CP 76703  
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610  
Fax +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

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