



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

# Monitoreo y evaluación de la integridad estructural del puente Mezcala

---

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

Publicación Técnica No. 635  
**Sanfandila, Qro.**  
**2021**

ISSN 0188-7297



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

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna "El 03/20 Monitoreo y evaluación de la integridad estructural del puente Mezcala".

Se agradece la colaboración del 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.....  | v    |
| Índice de tablas.....   | xi   |
| Sinopsis.....   | xiii |
| Abstract.....   | xv   |
| Resumen Ejecutivo .....   | xvii |
| Introducción.....   | 1    |
| 1 Antecedentes .....  | 3    |
| 2 Análisis modal operacional del puente Mezcala.....                  | 11   |
| 3 Seguimiento del comportamiento estructural del puente Mezcala ..... | 21   |
| Conclusiones.....   | 129  |
| Bibliografía .....  | 133  |

---



# Índice de figuras

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 Seguimiento realizado a la tensión axial del tirante SA8-T3.....                    | 2  |
| Figura 1.1 Puente Mezcala.....   | 3  |
| Figura 1.2 Sistema de adquisición de datos instalado en el puente Mezcala .....                | 5  |
| Figura 1.3 Instrumentación de la torre 4 (aguas abajo).....                                    | 6  |
| Figura 1.4 Instrumentación de la torre 4 (aguas arriba) .....                                  | 6  |
| Figura 1.5 Instrumentación de la torre 3 (aguas abajo).....                                    | 6  |
| Figura 1.6 Instrumentación de la torre 3 (aguas arriba) .....                                  | 7  |
| Figura 1.7 Instrumentación de la torre 2 (aguas abajo).....                                    | 7  |
| Figura 1.8 Instrumentación de la torre 2 (aguas arriba) .....                                  | 7  |
| Figura 1.9 Simbología de los planos de instrumentación .....                                   | 8  |
| Figura 1.10 Modelo de elemento finito del puente Mezcala .....                                 | 8  |
| Figura 1.11 Comparación de las tensiones del modelo con las obtenidas de pesajes directos..... | 9  |
| Figura 2.1 Metodología para estimar los parámetros modales del puente Mezcala .....            | 11 |
| Figura 2.2 Extensómetros considerados para el análisis modal.....                              | 13 |
| Figura 2.3 Señal filtrada de un extensómetro ante excitaciones ambientales .....               | 13 |
| Figura 2.4 Espectro de valores singulares .....  | 14 |
| Figura 2.5 Parte del espectro utilizado para calcular la función SDOF .....                    | 15 |
| Figura 2.6 Parte de la función SDOF utilizada para estimar los parámetros modales .....        | 15 |
| Figura 2.7 Forma modal de deformación del modo 1 .....   | 16 |
| Figura 2.8 Forma modal de deformación del modo 2.....  | 16 |
| Figura 2.9 Forma modal de deformación del modo 3.....  | 17 |
| Figura 2.10 Forma modal de deformación del modo 4.....   | 17 |
| Figura 2.11 Forma modal de deformación del modo 5.....   | 18 |
| Figura 2.12 Forma modal de deformación del modo 6.....   | 18 |
| Figura 2.13 Forma modal de deformación del modo 7.....   | 19 |
| Figura 2.14 Forma modal de deformación del modo 8.....   | 19 |
| Figura 3.1 Variación de la frecuencia del modo 1 .....   | 21 |
| Figura 3.2 Variación de la frecuencia del modo 2 .....   | 22 |
| Figura 3.3 Variación de la frecuencia del modo 3 .....   | 22 |
| Figura 3.4 Variación de la frecuencia del modo 4 .....   | 23 |
| Figura 3.5 Variación de la frecuencia del modo 5 .....   | 23 |
| Figura 3.6 Variación de la frecuencia del modo 6 .....   | 24 |
| Figura 3.7 Variación de la frecuencia del modo 7 .....   | 24 |
| Figura 3.8 Variación de la frecuencia del modo 8 .....   | 25 |
| Figura 3.9 Variación del factor de amortiguamiento del modo 1 .....                            | 25 |
| Figura 3.10 Variación del factor de amortiguamiento del modo 2 .....                           | 26 |
| Figura 3.11 Variación del factor de amortiguamiento del modo 3 .....                           | 26 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.12 Variación del factor de amortiguamiento del modo 4 .....          | 27 |
| Figura 3.13 Variación del factor de amortiguamiento del modo 5 .....          | 27 |
| Figura 3.14 Variación del factor de amortiguamiento del modo 6 .....          | 28 |
| Figura 3.15 Variación del factor de amortiguamiento del modo 7 .....          | 28 |
| Figura 3.16 Variación del factor de amortiguamiento del modo 8 .....          | 29 |
| Figura 3.17 Valores promedio de las deformaciones a tensión del cuerpo A..... | 29 |
| Figura 3.18 Valores promedio de las deformaciones a tensión del cuerpo B..... | 30 |
| Figura 3.19 Valores promedio de las deformaciones a compresión del cuerpo A.  | 30 |
| Figura 3.20 Valores promedio de las deformaciones a compresión del cuerpo B.  | 31 |
| Figura 3.21 Valores promedio de las a tensiones del cuerpo A .....            | 31 |
| Figura 3.22 Valores promedio de las a tensiones del cuerpo A .....            | 32 |
| Figura 3.23 Valores de deformación del extensómetro A-EA-1.....               | 33 |
| Figura 3.24 Valores de deformación del extensómetro A-EA-2.....               | 33 |
| Figura 3.25 Valores de deformación del extensómetro A-EA-3.....               | 34 |
| Figura 3.26 Valores de deformación del extensómetro A-EA-4.....               | 34 |
| Figura 3.27 Valores de deformación del extensómetro A-EA-5.....               | 35 |
| Figura 3.28 Valores de deformación del extensómetro A-EA-6.....               | 35 |
| Figura 3.29 Valores de deformación del extensómetro A-EA-7.....               | 36 |
| Figura 3.30 Valores de deformación del extensómetro A-EA-8.....               | 36 |
| Figura 3.31 Valores de deformación del extensómetro A-EA-9.....               | 37 |
| Figura 3.32 Valores de deformación del extensómetro A-EA-10.....              | 37 |
| Figura 3.33 Valores de deformación del extensómetro A-EA-11.....              | 38 |
| Figura 3.34 Valores de deformación del extensómetro A-EA-12.....              | 38 |
| Figura 3.35 Valores de deformación del extensómetro A-EA-13.....              | 39 |
| Figura 3.36 Valores de deformación del extensómetro A-EA-14.....              | 39 |
| Figura 3.37 Valores de deformación del extensómetro A-EA-15.....              | 40 |
| Figura 3.38 Valores de deformación del extensómetro A-EA-16.....              | 40 |
| Figura 3.39 Valores de deformación del extensómetro A-EA-17.....              | 41 |
| Figura 3.40 Valores de deformación del extensómetro A-EA-18.....              | 41 |
| Figura 3.41 Valores de deformación del extensómetro A-EA-19.....              | 42 |
| Figura 3.42 Valores de deformación del extensómetro A-EA-20.....              | 42 |
| Figura 3.43 Valores de deformación del extensómetro A-EA-21.....              | 43 |
| Figura 3.44 Valores de deformación del extensómetro A-EA-22.....              | 43 |
| Figura 3.45 Valores de deformación del extensómetro A-EA-23.....              | 44 |
| Figura 3.46 Valores de deformación del extensómetro A-EA-24.....              | 44 |
| Figura 3.47 Valores de deformación del extensómetro B-EA-1.....               | 45 |
| Figura 3.48 Valores de deformación del extensómetro B-EA-2.....               | 45 |
| Figura 3.49 Valores de deformación del extensómetro B-EA-3.....               | 46 |
| Figura 3.50 Valores de deformación del extensómetro B-EA-4.....               | 46 |
| Figura 3.51 Valores de deformación del extensómetro B-EA-5.....               | 47 |
| Figura 3.52 Valores de deformación del extensómetro B-EA-6.....               | 47 |
| Figura 3.53 Valores de deformación del extensómetro B-EA-7.....               | 48 |
| Figura 3.54 Valores de deformación del extensómetro B-EA-8.....               | 48 |
| Figura 3.55 Valores de deformación del extensómetro B-EA-9.....               | 49 |
| Figura 3.56 Valores de deformación del extensómetro B-EA-10.....              | 49 |
| Figura 3.57 Valores de deformación del extensómetro B-EA-11.....              | 50 |
| Figura 3.58 Valores de deformación del extensómetro B-EA-12.....              | 50 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.59 Valores de deformación del extensómetro B-EA-13.....    | 51 |
| Figura 3.60 Valores de deformación del extensómetro B-EA-14.....    | 51 |
| Figura 3.61 Valores de deformación del extensómetro B-EA-15.....    | 52 |
| Figura 3.62 Valores de deformación del extensómetro B-EA-16.....    | 52 |
| Figura 3.63 Valores de deformación del extensómetro B-EA-17.....    | 53 |
| Figura 3.64 Valores de deformación del extensómetro B-EA-18.....    | 53 |
| Figura 3.65 Valores de deformación del extensómetro B-EA-19.....    | 54 |
| Figura 3.66 Valores de deformación del extensómetro B-EA-20.....    | 54 |
| Figura 3.67 Valores de deformación del extensómetro B-EA-21.....    | 55 |
| Figura 3.68 Valores de deformación del extensómetro B-EA-22.....    | 55 |
| Figura 3.69 Valores de deformación del extensómetro B-EA-23.....    | 56 |
| Figura 3.70 Valores de deformación del extensómetro B-EA-24.....    | 56 |
| Figura 3.71 Valores de deformación del extensómetro A-T3-EC-1 ..... | 57 |
| Figura 3.72 Valores de deformación del extensómetro A-T3-EC-2 ..... | 57 |
| Figura 3.73 Valores de deformación del extensómetro B-T3-EC-1 ..... | 58 |
| Figura 3.74 Valores de deformación del extensómetro B-T3-EC-2 ..... | 58 |
| Figura 3.75 Valores de deformación del extensómetro T3-EC-1.....    | 59 |
| Figura 3.76 Valores de deformación del extensómetro T3-EC-2.....    | 59 |
| Figura 3.77 Valores de deformación del extensómetro T3-EC-3.....    | 60 |
| Figura 3.78 Valores de deformación del extensómetro T3-EC-4.....    | 60 |
| Figura 3.79 Valores de deformación del extensómetro T3-EC-5.....    | 61 |
| Figura 3.80 Valores de deformación del extensómetro T3-EC-6.....    | 61 |
| Figura 3.81 Valores de inclinación del sensor A-T1-I-L.....         | 62 |
| Figura 3.82 Valores de inclinación del sensor A-T1-I-T.....         | 62 |
| Figura 3.83 Valores de inclinación del sensor A-T2-I-L.....         | 63 |
| Figura 3.84 Valores de inclinación del sensor A-T2-I-T.....         | 63 |
| Figura 3.85 Valores de inclinación del sensor A-T3-I-L.....         | 64 |
| Figura 3.86 Valores de inclinación del sensor A-T3-I-T.....         | 64 |
| Figura 3.87 Valores de inclinación del sensor A-T4-I-L.....         | 65 |
| Figura 3.88 Valores de inclinación del sensor A-T4-I-T.....         | 65 |
| Figura 3.89 Valores de inclinación del sensor B-T2-I-L.....         | 66 |
| Figura 3.90 Valores de inclinación del sensor B-T2-I-T.....         | 66 |
| Figura 3.91 Valores de inclinación del sensor B-T3-I-L.....         | 67 |
| Figura 3.92 Valores de inclinación del sensor B-T3-I-T.....         | 67 |
| Figura 3.93 Valores de inclinación del sensor B-T4-I-L.....         | 68 |
| Figura 3.94 Valores de inclinación del sensor B-T4-I-T.....         | 68 |
| Figura 3.95 Valores de inclinación del sensor B-T7-I-L.....         | 69 |
| Figura 3.96 Valores de inclinación del sensor B-T7-I-T.....         | 69 |
| Figura 3.97 Valores de tensión del tirante SA1-T7.....              | 70 |
| Figura 3.98 Valores de tensión del tirante SA1-T3.....              | 71 |
| Figura 3.99 Valores de tensión del tirante SA2-T3.....              | 71 |
| Figura 3.100 Valores de tensión del tirante SA2-T7.....             | 72 |
| Figura 3.101 Valores de tensión del tirante SA3-T11 .....           | 72 |
| Figura 3.102 Valores de tensión del tirante SA3-T4.....             | 73 |
| Figura 3.103 Valores de tensión del tirante SA4-T4.....             | 73 |
| Figura 3.104 Valores de tensión del tirante SA4-T11 .....           | 74 |
| Figura 3.105 Valores de tensión del tirante SA5-T8.....             | 74 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.106 Valores de tensión del tirante SA5-T3.....           | 75 |
| Figura 3.107 Valores de tensión del tirante SA6-T3.....           | 75 |
| Figura 3.108 Valores de tensión del tirante SA6-T8.....           | 76 |
| Figura 3.109 Valores de tensión del tirante SA7-T8.....           | 76 |
| Figura 3.110 Valores de tensión del tirante SA7-T3.....           | 77 |
| Figura 3.111 Valores de tensión del tirante SA8-T3.....           | 77 |
| Figura 3.112 Valores de tensión del tirante SA8-T8.....           | 78 |
| Figura 3.113 Valores de tensión del tirante SA9-T11.....          | 78 |
| Figura 3.114 Valores de tensión del tirante SA9-T4.....           | 79 |
| Figura 3.115 Valores de tensión del tirante SA10-T4.....          | 79 |
| Figura 3.116 Valores de tensión del tirante SA10-T11.....         | 80 |
| Figura 3.117 Valores de tensión del tirante SA11-T7.....          | 80 |
| Figura 3.118 Valores de tensión del tirante SA11-T3.....          | 81 |
| Figura 3.119 Valores de tensión del tirante SA12-T3.....          | 81 |
| Figura 3.120 Valores de tensión del tirante SA12-T7.....          | 82 |
| Figura 3.121 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-1.....  | 83 |
| Figura 3.122 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-2.....  | 83 |
| Figura 3.123 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-3.....  | 84 |
| Figura 3.124 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-4.....  | 84 |
| Figura 3.125 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-5.....  | 85 |
| Figura 3.126 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-6.....  | 85 |
| Figura 3.127 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-7.....  | 86 |
| Figura 3.128 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-8.....  | 86 |
| Figura 3.129 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-9.....  | 87 |
| Figura 3.130 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-10..... | 87 |
| Figura 3.131 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-11..... | 88 |
| Figura 3.132 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-12..... | 88 |
| Figura 3.133 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-13..... | 89 |
| Figura 3.134 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-14..... | 89 |
| Figura 3.135 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-15..... | 90 |
| Figura 3.136 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-16..... | 90 |
| Figura 3.137 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-17..... | 91 |
| Figura 3.138 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-18..... | 91 |
| Figura 3.139 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-19..... | 92 |
| Figura 3.140 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-20..... | 92 |
| Figura 3.141 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-21..... | 93 |
| Figura 3.142 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-22..... | 93 |
| Figura 3.143 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-23..... | 94 |
| Figura 3.144 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-24..... | 94 |
| Figura 3.145 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-1.....  | 95 |
| Figura 3.146 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-2.....  | 95 |
| Figura 3.147 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-3.....  | 96 |
| Figura 3.148 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-4.....  | 96 |
| Figura 3.149 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-5.....  | 97 |
| Figura 3.150 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-6.....  | 97 |
| Figura 3.151 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-7.....  | 98 |
| Figura 3.152 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-8.....  | 98 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 3.153 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-9.....     | 99  |
| Figura 3.154 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-10.....    | 99  |
| Figura 3.155 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-11.....    | 100 |
| Figura 3.156 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-12.....    | 100 |
| Figura 3.157 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-13.....    | 101 |
| Figura 3.158 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-14.....    | 101 |
| Figura 3.159 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-15.....    | 102 |
| Figura 3.160 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-16.....    | 102 |
| Figura 3.161 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-17.....    | 103 |
| Figura 3.162 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-18.....    | 103 |
| Figura 3.163 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-19.....    | 104 |
| Figura 3.164 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-20.....    | 104 |
| Figura 3.165 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-21.....    | 105 |
| Figura 3.166 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-22.....    | 105 |
| Figura 3.167 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-23.....    | 106 |
| Figura 3.168 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-24.....    | 106 |
| Figura 3.169 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-1.....  | 107 |
| Figura 3.170 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-2.....  | 107 |
| Figura 3.171 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-3.....  | 108 |
| Figura 3.172 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-4.....  | 108 |
| Figura 3.173 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-5.....  | 109 |
| Figura 3.174 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-6.....  | 109 |
| Figura 3.175 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-7.....  | 110 |
| Figura 3.176 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-8.....  | 110 |
| Figura 3.177 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-9.....  | 111 |
| Figura 3.178 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-10..... | 111 |
| Figura 3.179 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-11..... | 112 |
| Figura 3.180 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-12..... | 112 |
| Figura 3.181 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-13..... | 113 |
| Figura 3.182 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-14..... | 113 |
| Figura 3.183 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-15..... | 114 |
| Figura 3.184 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-16..... | 114 |
| Figura 3.185 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-17..... | 115 |
| Figura 3.186 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-18..... | 115 |
| Figura 3.187 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-19..... | 116 |
| Figura 3.188 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-20..... | 116 |
| Figura 3.189 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-21..... | 117 |
| Figura 3.190 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-22..... | 117 |
| Figura 3.191 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-23..... | 118 |
| Figura 3.192 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-24..... | 118 |
| Figura 3.193 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-1.....  | 119 |
| Figura 3.194 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-2.....  | 119 |
| Figura 3.195 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-3.....  | 120 |
| Figura 3.196 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-4.....  | 120 |
| Figura 3.197 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-5.....  | 121 |
| Figura 3.198 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-6.....  | 121 |
| Figura 3.199 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-7.....  | 122 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 3.200 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-8.....  | 122 |
| Figura 3.201 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-9.....  | 123 |
| Figura 3.202 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-10..... | 123 |
| Figura 3.203 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-11..... | 124 |
| Figura 3.204 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-12..... | 124 |
| Figura 3.205 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-13..... | 125 |
| Figura 3.206 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-14..... | 125 |
| Figura 3.207 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-15..... | 126 |
| Figura 3.208 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-16..... | 126 |
| Figura 3.209 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-17..... | 127 |
| Figura 3.210 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-18..... | 127 |
| Figura 3.211 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-19..... | 128 |
| Figura 3.212 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-20..... | 128 |
| Figura 3.213 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-21..... | 129 |
| Figura 3.214 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-22..... | 129 |
| Figura 3.215 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-23..... | 130 |
| Figura 3.216 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-24..... | 130 |

## Índice de tablas

---

|  |   |
|--|---|
| Tabla I.1 Valores promedio de los modos monitoreados.....  | 2 |
| Tabla 1.1 Sistema de monitoreo instalado en el puente Mezcala .....                                  | 4 |
| Tabla 1.2 Comparación de las frecuencias del modelo con las obtenidas del monitoreo estructural..... | 9 |



## Sinopsis

---

El puente Mezcala es un puente atirantado ubicado en la autopista del Sol en el estado de Guerrero. Dada la importancia del puente para la actividad económica en la región, el costo de inversión que representa, sus características estructurales, su longitud total, y a que se ubica en una zona de alta actividad sísmica, fue uno de los primeros puentes en instrumentarse para monitoreo continuo y en tiempo real por el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CeMPEI) del Instituto Mexicano del Transporte.

El monitoreo estructural del puente Mezcala comenzó desde el año 2016 y, a partir de entonces y con la información obtenida del sistema de monitoreo, se identificaron y monitorean las frecuencias naturales, formas modales y la razón de amortiguamiento de los primeros ocho modos naturales de vibración del puente. Así también, se ha calibrado el modelo de elementos finitos y, con este, se ha evaluado el comportamiento del puente considerando los distintos escenarios de carga que podrían presentarse durante su vida útil.

En este trabajo se describe el proceso realizado analizar las señales de sistema de monitoreo y dar seguimiento a los parámetros modales de los primeros ocho modos naturales de vibración del puente.

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



# Abstract

---

The Mezcala Bridge is a cable-stayed bridge located on the Del Sol highway in the state of Guerrero, Mexico. Due the importance of the bridge in the region economical activities, the investment cost that represents, the structural characteristics of the bridge, the total length, and the high seismic activity of the zone where the bridge is located, it was selected as one of the first bridges to be instrumented and monitored in real time in the Center of Structural Health Monitoring and Intelligent Structures of the Instituto Mexicano del Transporte.

The structural health monitoring of the Mezcala bridge began in 2016 and, from the information obtained from the monitoring system, it has been possible to identify natural frequencies, mode shapes and damping ratios of the first eight vibration modes of the bridge. Likewise, a finite element model has been calibrated to analyze and evaluate the bridge behavior in different load scenarios that could arise during the useful life of the bridge.

In this work, it is described the technique to analyze the structural health monitoring signals to track the behavior of the modal parameters of the first eight natural modes of vibration of the bridge.

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



## Resumen ejecutivo

---

Desde la puesta en servicio del sistema de monitoreo en el puente Mezcala se ha dado seguimiento al comportamiento estructural del puente (deformación, inclinación, tensión, etc.) a través del análisis de cada parámetro bajo condiciones de operación normal (cargas vivas), y 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.

El análisis modal del puente Mezcala se realizó a partir de información obtenida bajo condiciones de excitación ambiental, no obstante, las señales obtenidas del sistema de monitoreo usualmente contienen ruido y no se tiene un control sobre las fuerzas de excitación, las cuales son de carácter ambiental como pueden ser el viento, un sismo, o las cargas vivas por tránsito vehicular sobre el puente. Por lo anterior se aplicó la técnica Descomposición Mejorada en el Dominio de la Frecuencia (EFDD) para identificar y dar seguimiento a las frecuencias naturales, formas modales y factores de amortiguamiento.

Este trabajo presenta resultados de la actualización y seguimiento del comportamiento estructural del puente durante el año 2020.



# Introducción

---

Los puentes de gran envergadura son de vital importancia en el desarrollo económico, social y cultural de un país. La vulnerabilidad de estas estructuras hace necesario que estas sean inspeccionadas regularmente para salvaguardar su integridad estructural. En México, hoy por hoy, se realizan inspecciones visuales periódicas a través de las cuales se determinan los índices de la condición estructural. El periodo típico para las inspecciones visuales de un puente fluctúa entre uno a dos años y están limitadas a la capacidad de observación, experiencia y conocimientos de los inspectores. Así también, las inspecciones visuales son incapaces de detectar daños o deterioros internos en las estructuras, los cuales normalmente se hacen notorios ya cuando son críticos.

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

Para identificar y posteriormente dar seguimiento a los modos naturales de vibración del puente se ha utilizado la técnica Descomposición Mejorada en el Dominio de la Frecuencia, la cual permite identificar la frecuencia natural, forma modal y factor de amortiguamiento (Brincker, 2001).

En total, se ha dado seguimiento a los primeros 8 modos del puente Mezcala, los cuales se encuentran en un rango de frecuencia de 0.20 a 1 Hz (Anaya et.al, 2020). Los valores promedio de estos modos se muestran en la tabla I.1. A su vez, se ha dado seguimiento al comportamiento del puente (deformaciones, inclinaciones, tensiones en tirantes), donde se analizan los valores de referencia desde que fueron instalados los sensores, y para el caso de los extensómetros del tablero, se analizan los efectos productos de las cargas vivas. El seguimiento realizado a la fuerza de tensión axial del tirante SA8-T3 se muestra en la figura I.1.

**Tabla I.1 Valores promedio de los modos monitoreados**

| Modo | Frecuencia natural (Hz) | Factor de amortiguamiento (%) | Descripción del modo         |
|------|-------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1    | 0.2125                  | 1.47                          | Flexión vertical del tablero |
| 2    | 0.4142                  | 0.53                          | Torsión del tablero          |
| 3    | 0.4455                  | 0.47                          | Flexión vertical del tablero |
| 4    | 0.5087                  | 0.42                          | Flexión vertical del tablero |
| 5    | 0.6354                  | 0.42                          | Flexión vertical del tablero |
| 6    | 0.7400                  | 0.39                          | Torsión del tablero          |
| 7    | 0.7958                  | 0.61                          | Flexión vertical del tablero |
| 8    | 0.8603                  | 0.54                          | Flexión vertical del tablero |

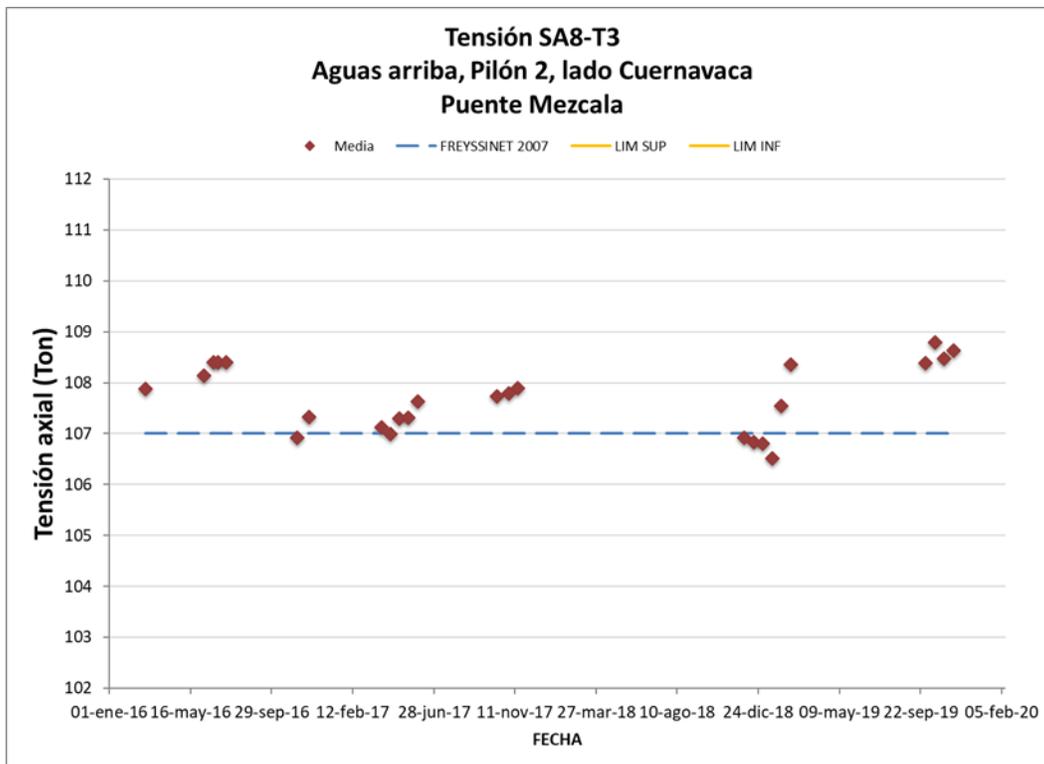


Figura I.1 Seguimiento realizado a la tensión axial del tirante SA8-T3

# 1. Antecedentes

---

## 1.1 Puente Mezcala

El puente Mezcala (figura 1.1) es un puente de tipo atirantado puesto en servicio en el año de 1993, se localiza en el kilómetro 221 de la Autopista del Sol, que comunica a la ciudad de Cuernavaca con Acapulco. El puente tiene una longitud total de 911 m conformados por 6 claros que van desde los 39 m hasta los 311 m. Tiene un tablero conformado por una losa de concreto soportada por 2 traveses metálicas de sección I. El puente tiene 140 tirantes distribuidos en 12 semi-arpas. Debido a la importancia del puente Mezcala en la actividad económica del País, al costo y tipo de la estructura, a la longitud total del puente, y a que se ubica en una zona de alta actividad sísmica, se seleccionó como uno de los puentes para instrumentar y monitorear en tiempo real en el Centro de Monitoreo de Puentes y Estructuras Inteligentes (CEMPEI) del Instituto Mexicano del Transporte.

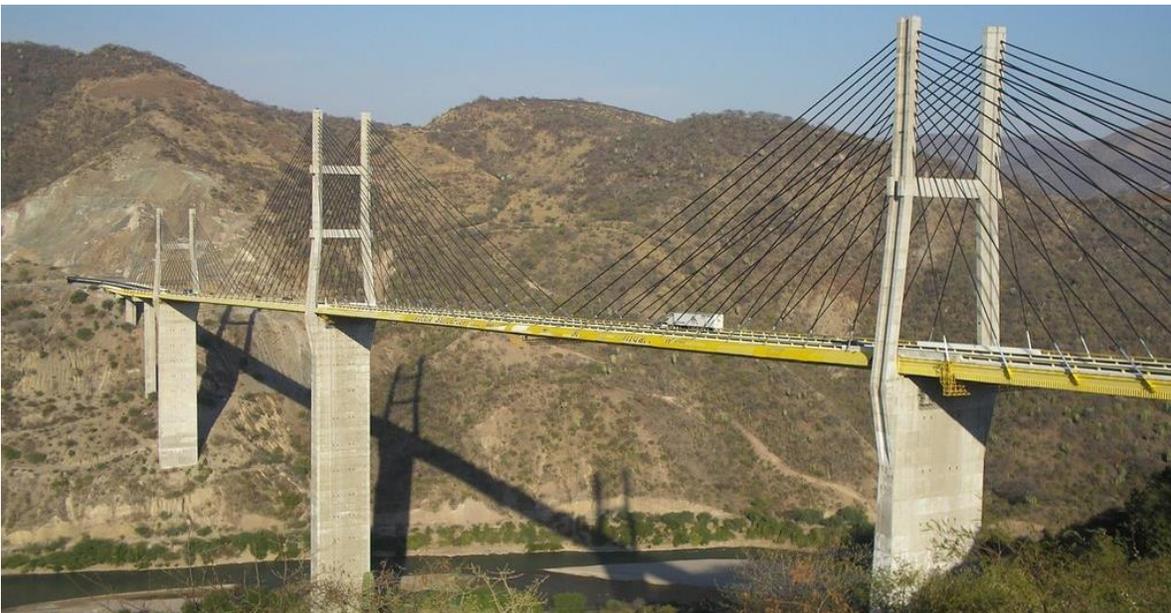


Figura 1.1 Puente Mezcala

## 1.2 Sistema de monitoreo del puente Mezcala

El sistema de adquisición de datos y monitoreo permanente del puente Mezcala tiene tres módulos principales para su funcionamiento; el primero, es el módulo de sensores y equipos de adquisición y pre procesamiento de datos, el segundo es el módulo de energización y el tercer módulo es el de comunicaciones remotas.

El Módulo de sensores y equipos de adquisición y pre procesamiento de datos del puente Mezcala consta de 36 acelerómetros, 16 inclinómetros, 10 extensómetros de concreto, 48 extensómetros de acero, 11 sensores de temperatura, un medidor de desplazamiento, 2 cámaras de video, una estación climatológica, un interrogador, un multiplexor y una unidad de control. Cada uno de los sensores y equipos instalados persigue objetivos particulares para el monitoreo de la integridad estructural del puente Mezcala. En la tabla 1.1 se pueden consultar el número, marca y modelos de los equipos y sensores instalados.

| <b>Cant</b> | <b>Nombre</b>            | <b>Descripción</b>  | <b>Marca</b>  | <b>Modelo</b> |
|-------------|--------------------------|---|---------------|---------------|
| 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        |
| 11          | Sensores de temperatura  | Sensor empleado para medir cambios de temperatura   | Micron Optics | os4350        |
| 16          | Inclinómetros            | Sensor empleado para medir inclinaciones  | FBG TECH      | T1-310        |
| 36          | Acelerómetros            | Sensor empleado para medir respuestas dinámicas   | Micron Optics | os7100        |
| 10          | Extensómetros            | Sensor empleado para medir deformaciones unitarias en concreto  | Micron Optics | os3600        |
| 48          | Extensómetros            | Sensor empleado para medir deformaciones unitarias en acero   | Micron Optics | os3000        |

**Tabla 1.1 Sistema de monitoreo instalado en el puente Mezcala**

Los acelerómetros fueron seleccionados para medir las respuestas dinámicas de las pilas y de algunos de los tirantes. La información proporcionada por ellos permitirá conocer el desempeño estructural de las torres bajo condiciones de operación normal, evaluar la integridad estructural de las mismas posterior a sismos, ráfagas de viento o accidentes. Por otro lado, los acelerómetros instalados en algunos de los tirantes serán utilizados para determinar la tensión de los cables.

Los inclinómetros tienen la finalidad de dar seguimiento del nivel de inclinación de las pilas en el tiempo y determinar si existe una inclinación permanente posterior a un evento sísmico.

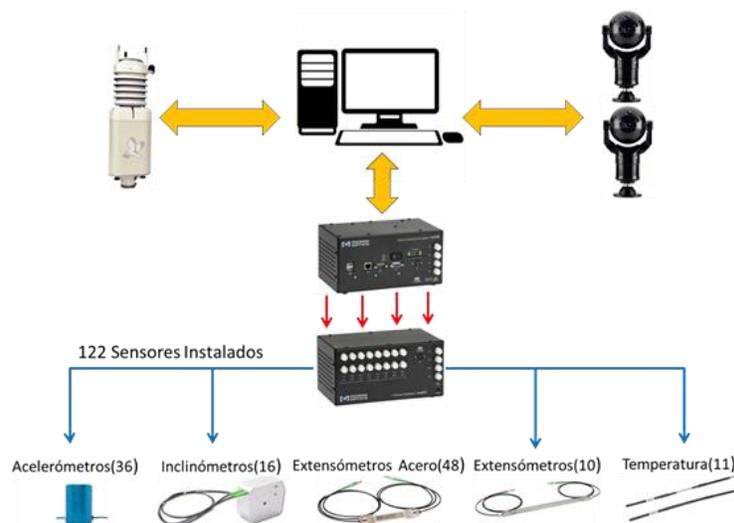
La función de los extensómetros de acero y de concreto es la de determinar la dinámica del puente y asociar las deformaciones con la carga de vehículos y aquellas asociadas con los cambios de temperatura durante el día o estación del año. La información proporcionada por estos sensores es fundamental para la

calibración de modelos de elemento finito y para la implementación de técnicas de detección de daño.

Los sensores de temperatura persiguen el objetivo de proporcionar información de los cambios de temperatura en diferentes secciones del puente y correlacionar la información con las deformaciones para poder asociar el nivel de deformación por incremento de temperatura.

El medidor de desplazamiento es utilizado para conocer la deformación de la junta de expansión por cambios de temperaturas globales y condiciones normales de operación.

Para adquirir la información de cada uno de los sensores es necesario un sistema que consta de una computadora que controla la frecuencia de adquisición de datos del sistema, el tamaño de los archivos, la visualización de la información y de un interrogador que controla y adquiere el valor de cada sensor en intervalos iguales de tiempo. Una vez instalado, este equipo tiene capacidad para interrogar 16 canales utilizando un multiplexor (ver figura 1.2).



**Figura 1.2 Sistema de adquisición de datos instalado en el puente Mezcala**

En total, el puente Mezcala tiene instalados 122 sensores de fibra óptica, los cuales están distribuidos en 14 canales de adquisición. Para tener una mayor sensibilidad los sensores fueron agrupados por tipos de sensores, de tal manera que 4 canales fueron utilizados para conectar acelerómetros, 2 canales para inclinómetros y 8 canales para los sensores de deformación. A su vez, los sensores de deformación fueron divididos en 6 canales para sensores instalados en acero y 2 canales para sensores instalados en concreto. En las figuras 1.3 - 1.9 se muestran los diagramas de instrumentación del puente Mezcala.

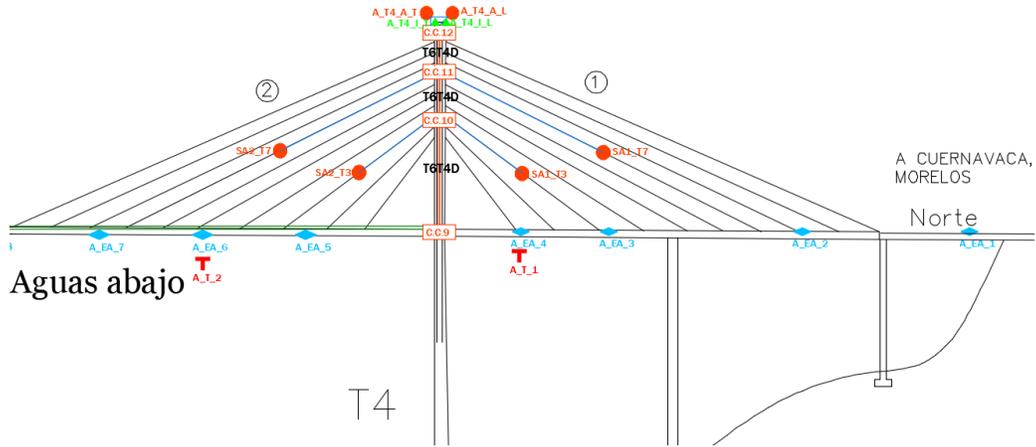


Figura 1.3 Instrumentación de la torre 4 (aguas abajo)

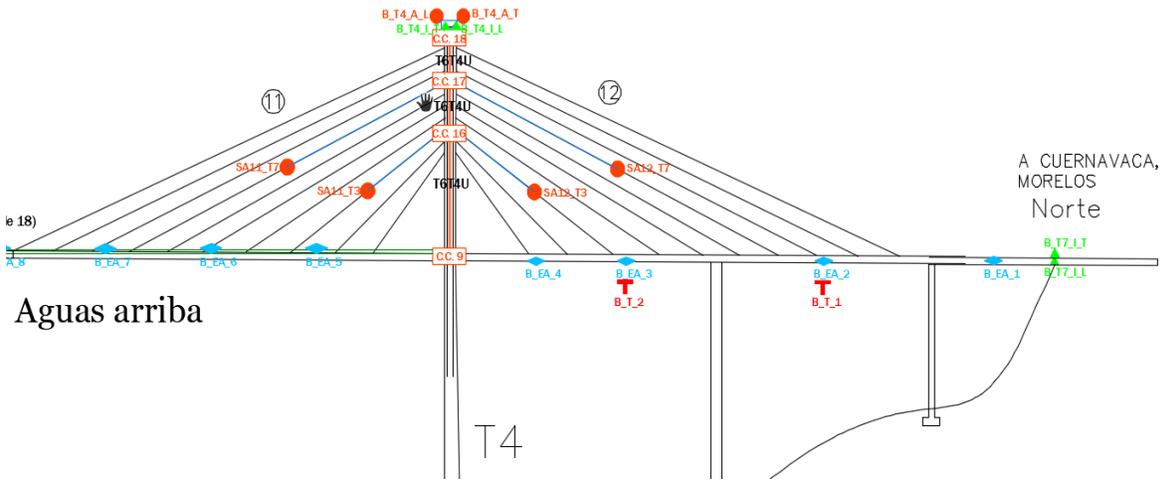


Figura 1.4 Instrumentación de la torre 4 (aguas arriba)

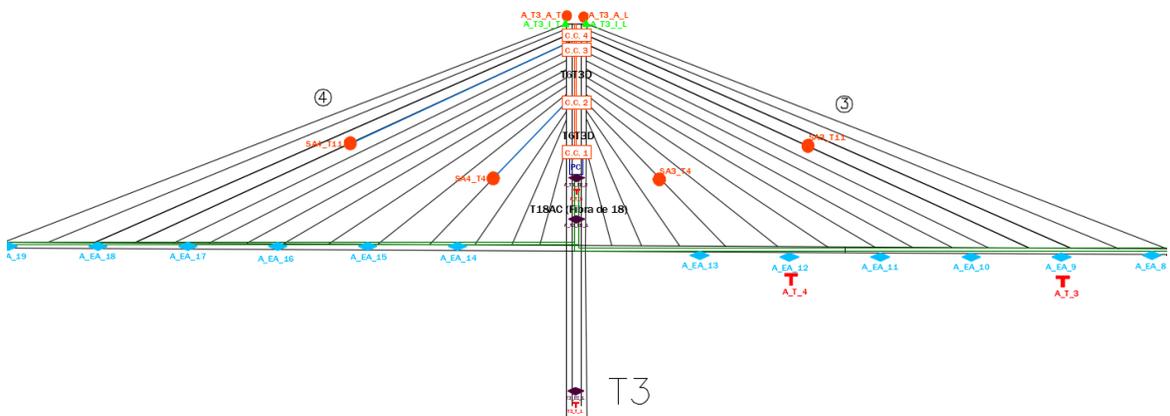


Figura 1.5 Instrumentación de la torre 3 (aguas abajo)

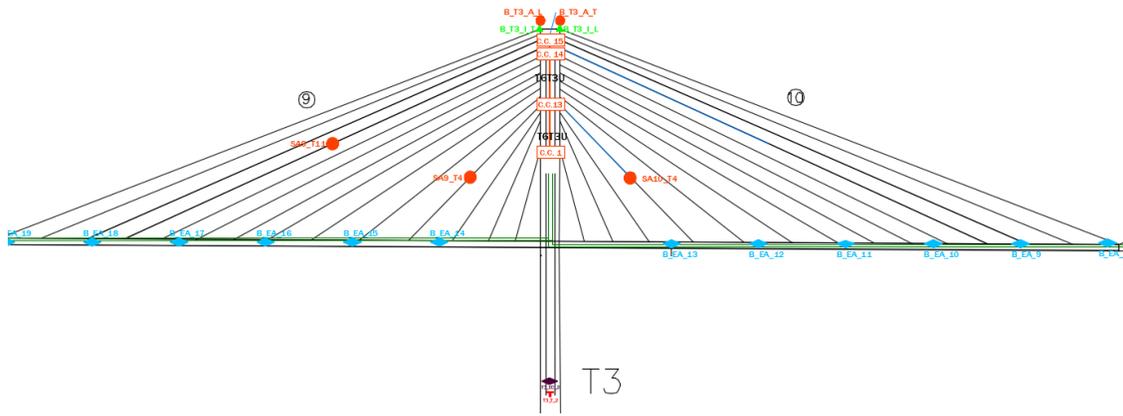


Figura 1.6 Instrumentación de la torre 3 (aguas arriba)

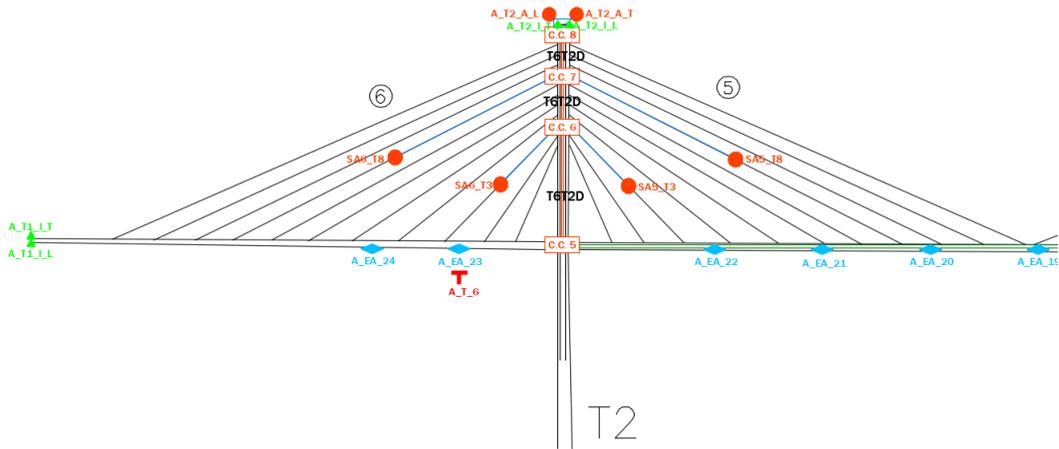


Figura 1.7 Instrumentación de la torre 2 (aguas abajo)

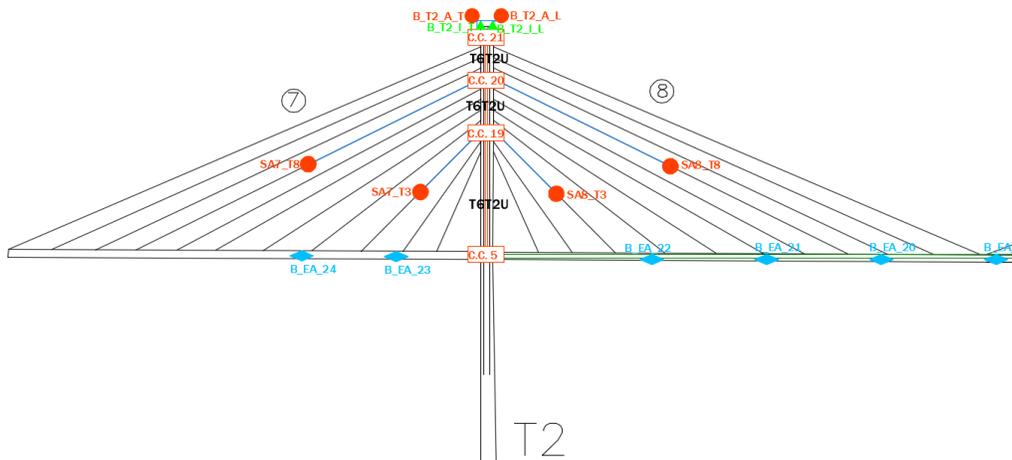


Figura 1.8 Instrumentación de la torre 2 (aguas arriba)

| SIMBOLOGÍA                 |                              |
|----------------------------|------------------------------|
| ● ACCELERÓMETRO            | — CABLE SIMPLEX              |
| ▲ INCLINÓMETRO             | — CABLE TRONCAL DE 18 FIBRAS |
| ■ CAJA DE EMPALME          | — CABLE TRONCAL DE 6 FIBRAS  |
| PC PANEL DE CONTROL        | — CABLE TRONCAL DE 2 FIBRAS  |
| ◆ EXTENSÓMETRO ACERO       | C.C. # CAJA DE CONEXIÓN      |
| ◆ EXTENSÓMETRO CONCRETO    | C# NÚMERO DE CLARO           |
| ✕ SENSOR DE DESPLAZAMIENTO | # NÚMERO DE ARPA             |
| SP SPLITTER                | T SENSOR DE TEMPERATURA      |
|                            | ■ CONECTOR                   |

Figura 1.9 Simbología de los planos de instrumentación

### 1.3 Calibración del modelo de elemento finito del puente Mezcala

Con el propósito de evaluar el comportamiento estructural a partir de la simulación de los eventos de carga viva, así como identificar los elementos que influyen en la respuesta estructural obtenida del monitoreo, fue desarrollado un modelo de elemento finito (EF) del puente Mezcala (figura 1.10) en el software StaDyn (Doyle, 1991) versión 5.1. El modelo consta de 7,646 elementos y 2,940 nodos.

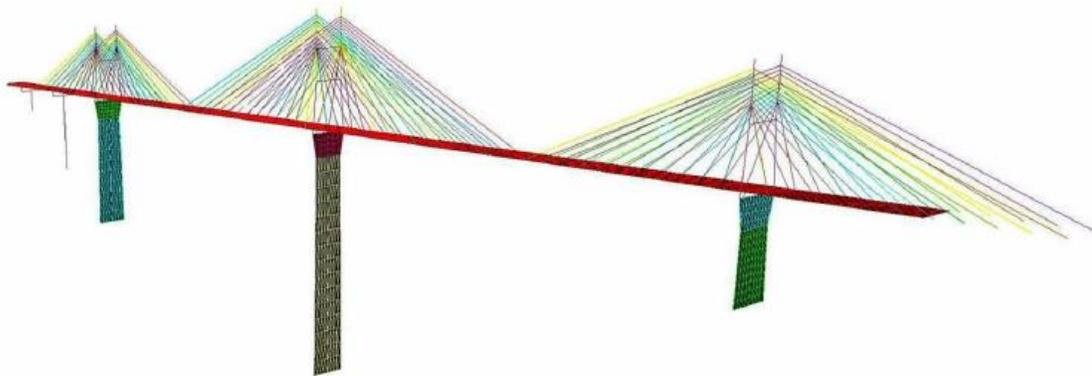


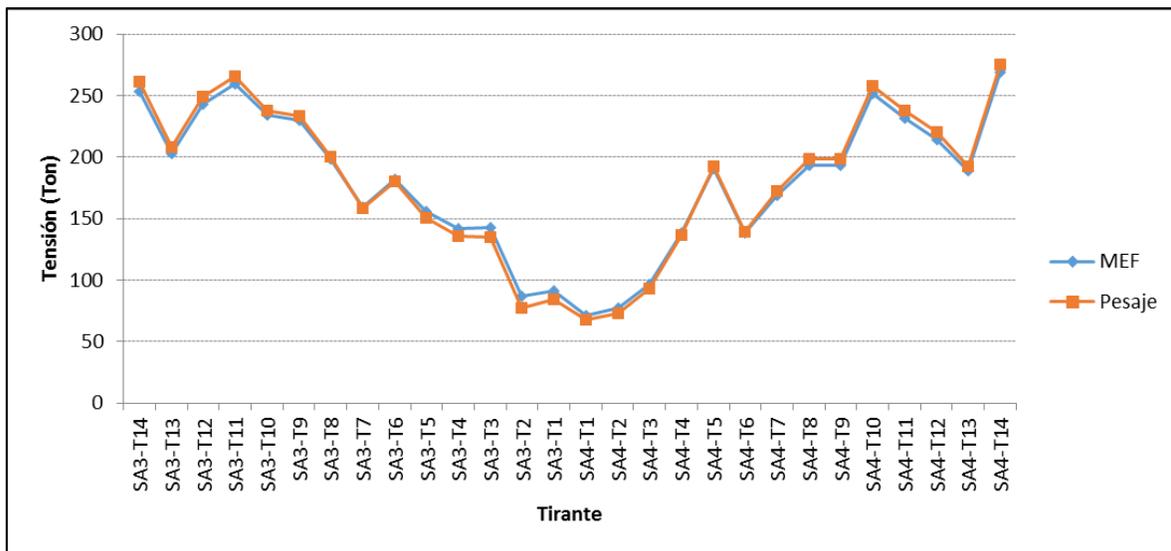
Figura 1.10 Modelo de elemento finito del puente Mezcala

El algoritmo de Gauss-Newton (Friswell y Mottershead, 1995) fue utilizado para calibrar el modelo de elemento finito debido a su amigable implementación y que ha brindado resultados satisfactorios anteriormente (Anaya et. al., 2018). La comparación de las frecuencias naturales del modelo de elemento finito con las obtenidas del monitoreo se muestra en la tabla 1.2.

**Tabla 1.2 Comparación de las frecuencias del modelo con las obtenidas del monitoreo estructural**

| Modo | Frec. Monitoreo (Hz) | Frec. Mef (Hz) | Diferencia (%) |
|------|----------------------|----------------|----------------|
| 1    | 0.2125               | 0.2130         | 0.24           |
| 2    | 0.4142               | 0.4180         | 0.92           |
| 3    | 0.4455               | 0.4530         | 1.68           |
| 4    | 0.5087               | 0.5140         | 1.04           |
| 5    | 0.6354               | 0.6280         | -1.16          |
| 6    | 0.7400               | 0.7290         | -1.49          |
| 7    | 0.7958               | 0.7870         | -1.11          |
| 8    | 0.8603               | 0.8710         | 1.24           |

Adicionalmente a las frecuencias naturales, se ajustaron los valores de las tensiones de los tirantes del puente. La calibración de las fuerzas de tensión en los tirantes terminó hasta que se obtuvieron valores aceptables, los cuales consisten de una diferencia promedio de tensión de 3 toneladas y una diferencia máxima de 19 toneladas. En la figura 1.11 se muestra la comparación de las tensiones del modelo con las obtenidas de pesajes directos de los tirantes de las semi-arpas 3 y 4 del puente.



**Figura 1.11 Comparación de las tensiones del modelo con las obtenidas de pesajes directos**



## 2. Análisis modal operacional del puente Mezcala

En el análisis modal tradicional, se requiere la medición de la respuesta estructural, así como de la fuerza de excitación con el objetivo de obtener las funciones de respuesta en frecuencia (FRF), de las que se pueden obtener los parámetros modales de la estructura (Marwala, 2010). No obstante, para estructuras civiles de gran tamaño, es difícil conseguir los medios de excitación controlada con la magnitud suficiente para excitar la estructura, esto aunado a la necesidad de cerrar la estructura al tráfico. Una alternativa cada vez más popular es utilizar los medios naturales de excitación como lo son el flujo vehicular, el viento, el oleaje o los sismos, lo que se conoce como pruebas de vibración ambiental. La gran ventaja de este tipo de pruebas es su relativo bajo costo, debido a que no es necesario cerrar la estructura al tráfico, ni de conseguir medios controlados de excitación.

La idea fundamental dentro del análisis modal operacional es que las excitaciones naturales de la estructura se aproximen a las características de un ruido blanco, es decir, que tengan una energía sobre las frecuencias naturales de la estructura, o al menos, que excite el rango de frecuencias de los modos de interés (Brincker y Ventura, 2015).

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

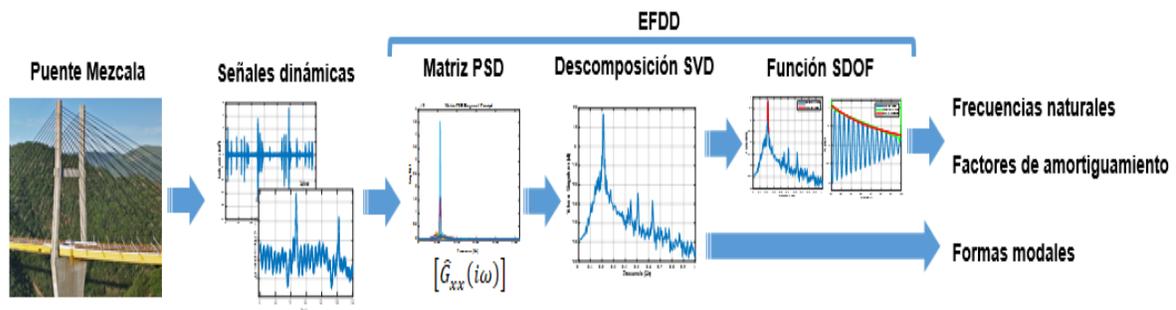


Figura 2.1 Metodología para estimar los parámetros modales del puente Mezcala

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

$$[\hat{G}_{xx}(i\omega)] = [\bar{H}(i\omega)][\hat{G}_{ff}(i\omega)][H(i\omega)]^T \quad (2.1)$$

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

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

$$[\hat{G}_{xx}(i\omega)] = [U_i] [S_i] [U_i]^H \quad (2.2)$$

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

$$\hat{\phi} = u_{i1} \quad (2.3)$$

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

## 2.1 Instrumentación del puente considerada para el análisis

El monitoreo de los parámetros modales del puente Mezcala fue realizado utilizando la información de los extensómetros colocados en las vigas principales entre la torre 2 y torre 4, por lo que solamente pudieron identificarse modos de verticales de flexión y torsión del tablero. Desafortunadamente, se han presentado problemas con el sistema de energización del monitoreo del puente y solo se ha podido registrar la información de los meses de febrero, marzo, junio, julio, octubre y diciembre de 2020. Por otra parte, debido al daño de los lazos de fibra óptica de las semi-arpas 1 y 12 (figuras 1.3 y 1.4) por trabajos de mantenimiento del puente, se ha perdido totalmente la información de los sensores B-EA-1 al B-EA-5, B-EA-10 y del A-EA-1 al A-EA-4. El esquema de la instrumentación se muestra en la figura 2.2.

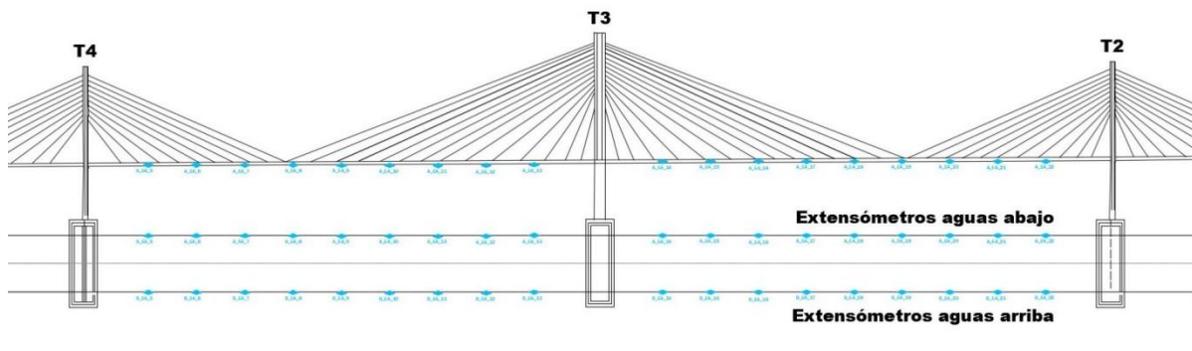


Figura 2.2 Extensómetros considerados para el análisis modal

## 2.2 Proceso de análisis

Las señales analizadas corresponden a bloques de datos de 2 minutos de duración, adquiriendo a una frecuencia de 125 Hz. Con el objetivo de disminuir los efectos (frecuencias bajas) producidos por el paso de los vehículos, se aplicó un filtro tipo Butterworth para altas de orden 2, con una frecuencia de corte de 0.10 Hz. Una señal típica de un extensómetro tras el filtrado se muestra en la figura 2.3.

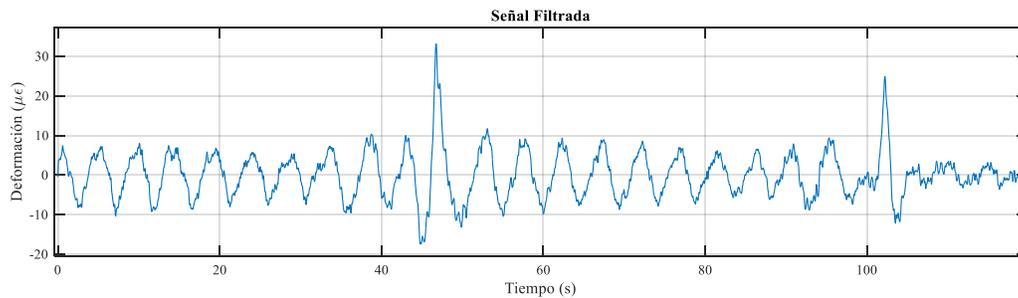
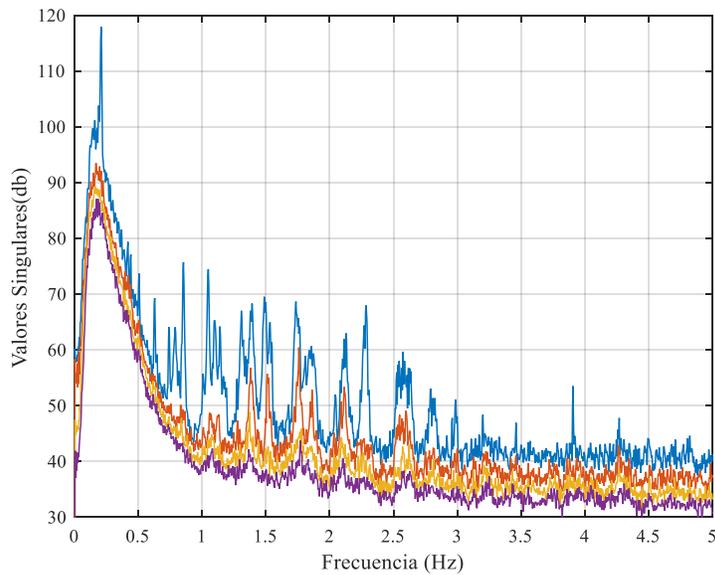


Figura 2.3 Señal filtrada de un extensómetro ante excitaciones ambientales

Tras el filtrado de las señales, se procedió a calcular la matriz PSD  $[\hat{G}_{xx}(i\omega)]$ , a través de correlación de cada señal en el dominio de la frecuencia. Para calcular la FFT de cada señal fueron utilizados 32,768 puntos, los cuales equivalen a la potencia de 2 más cercana al doble de datos del sensor (15,000 datos) con el objetivo de evitar efectos de convolución circular. En total, la matriz PSD de cada bloque de datos tiene un tamaño de 34 x 34 en cada punto de frecuencia. La diagonal principal de la matriz PSD consta de las auto-correlaciones de todos los sensores, mientras que los elementos fuera de la diagonal representan todas las correlaciones cruzadas de los sensores. Al descomponer la matriz PSD en cada punto de frecuencia mediante la técnica SVD, fueron obtenidos los valores y vectores singulares. El espectro obtenido de valores singulares se muestra en la fig. 2.4.



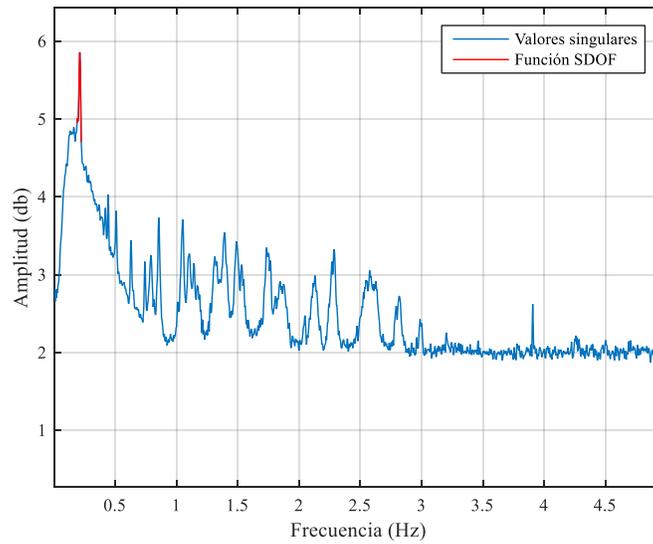
**Figura 2.4 Espectro de valores singulares**

Al inspeccionar el espectro de la figura 2.3, se pueden apreciar los picos que corresponden a los modos naturales de vibración del puente, donde la mayor densidad de estos, se concentra en un rango de frecuencias de 0 a 3.5 Hz. En total fueron identificados 26 picos en un rango de 0 a 5 Hz (Anaya et. al, 2020).

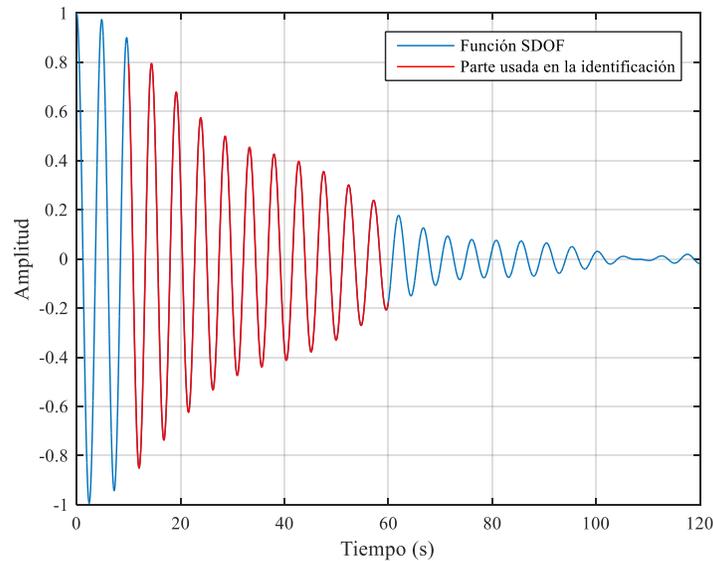
Para estimar el valor de la frecuencia natural y amortiguamiento de cada modo, una vez identificados los picos del espectro, se procedió a calcular las funciones SDOF del sistema, al transformar al dominio del tiempo la parte de los picos del espectro asociados a la función SDOF, mediante la transformada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

Para identificar la parte del pico asociada a la función SDOF fue utilizado el criterio MAC, donde se comparó el vector singular correspondiente al pico, con los vectores correspondientes a las frecuencias aledañas. Si el valor MAC de un vector aledaño superó el 70% de correlación, este se consideró parte de la función SDOF. Al identificar estos valores, se procedió a poner en ceros todos los demás valores que no fueran parte de la función SDOF y aplicar la IFFT. En la figura 2.5 se muestra en rojo la parte del espectro utilizada para calcular la función SDOF correspondiente al primer pico.

Tras utilizar la IFFT se obtuvo la función SDOF del sistema (figura 2.6), la cual exhibe un solo componente de frecuencia y un decaimiento asociado al factor de amortiguamiento. Para el valor de los parámetros modales, se utilizó la transformada Hilbert en una zona donde se puede apreciar un decaimiento logarítmico, es decir, se dejó fuera de la identificación la parte inicial y final de la función SDOF, con el fin de evitar los efectos de ruido de la señal.



**Figura 2.5 Parte del espectro utilizado para calcular la función SDOF**



**Figura 2.6 Parte de la función SDOF utilizada para estimar los parámetros modales**

Con la función obtenida fueron estimados los valores de la frecuencia natural y el factor de amortiguamiento mediante una regresión de mínimos cuadrados. Este procedimiento fue aplicado a cada uno de los primeros 8 picos del espectro de valores singulares a través de un proceso automatizado programado en Matlab. Las formas modales de deformación de los 8 modos monitoreados se muestran en las figuras 2.7 a 2.15.

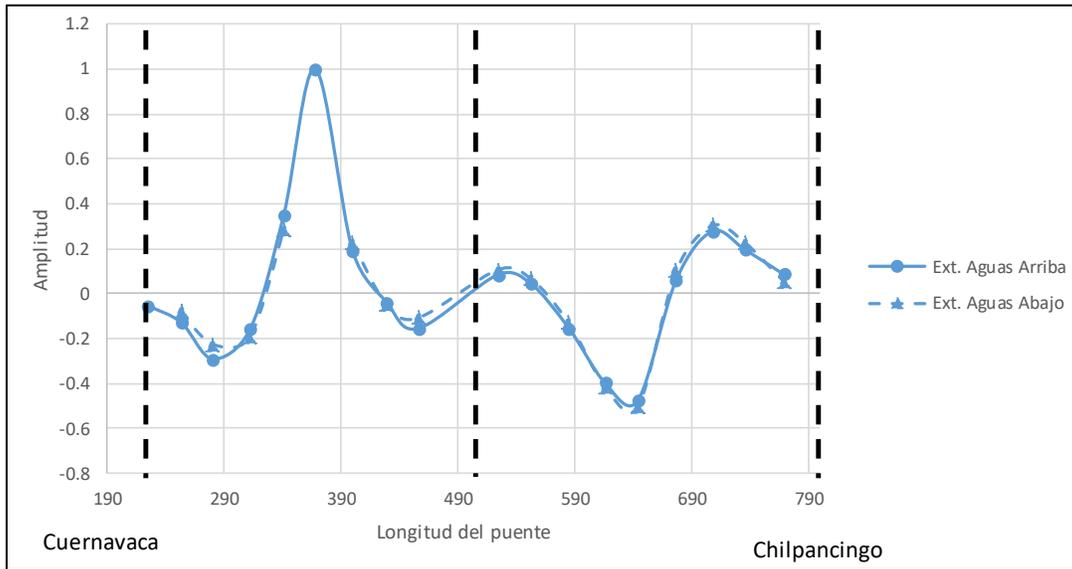


Figura 2.7 Forma modal de deformación del modo 1

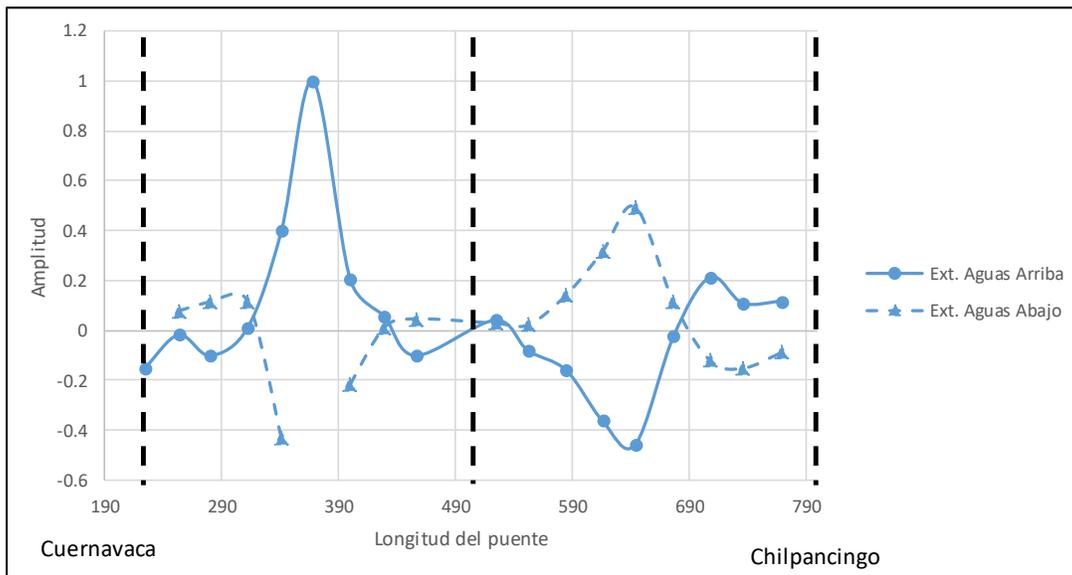


Figura 2.8 Forma modal de deformación del modo 2

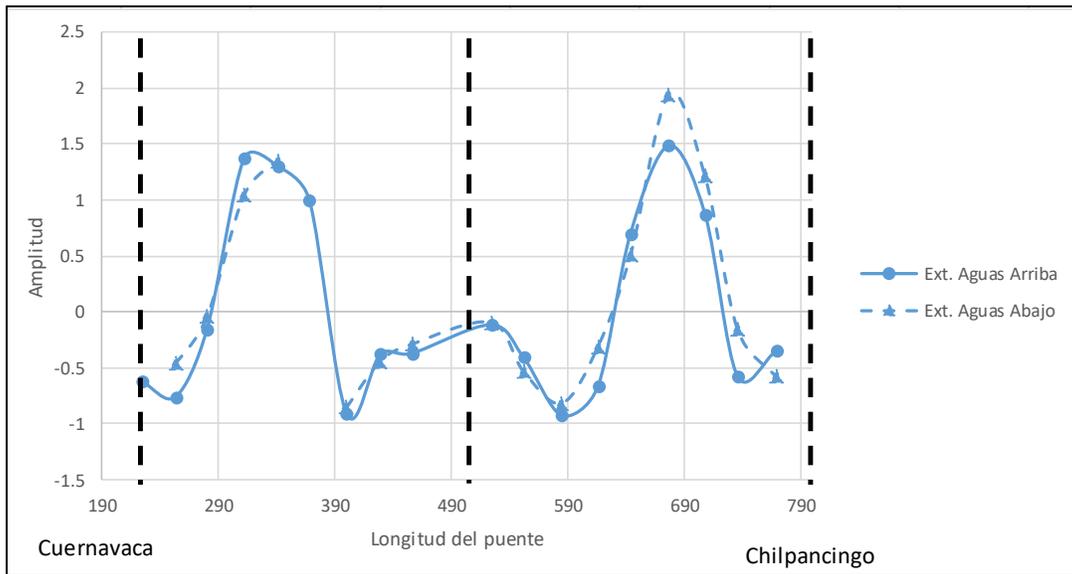


Figura 2.9 Forma modal de deformación del modo 3

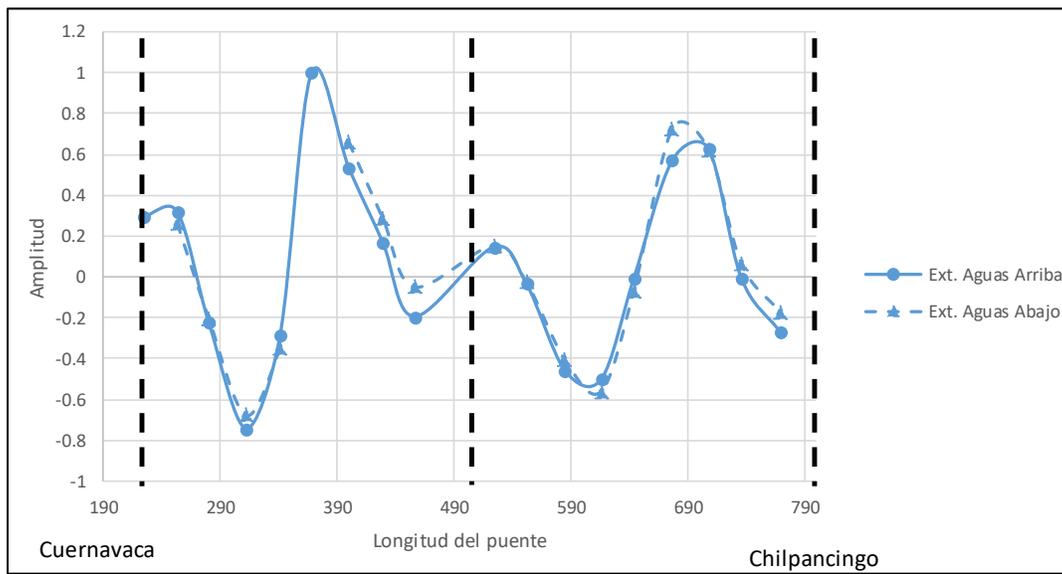


Figura 2.10 Forma modal de deformación del modo 4

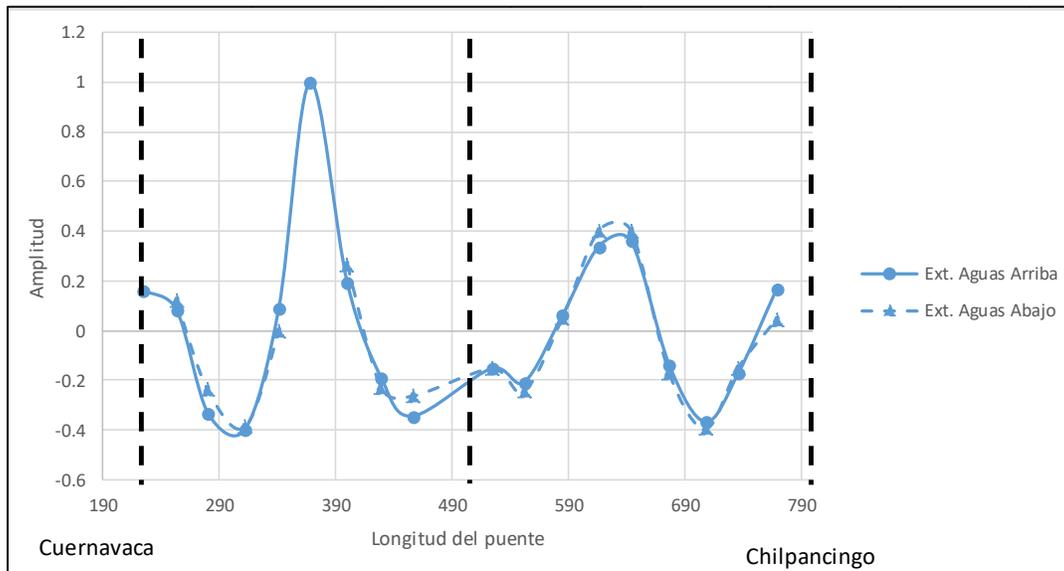


Figura 2.11 Forma modal de deformación del modo 5

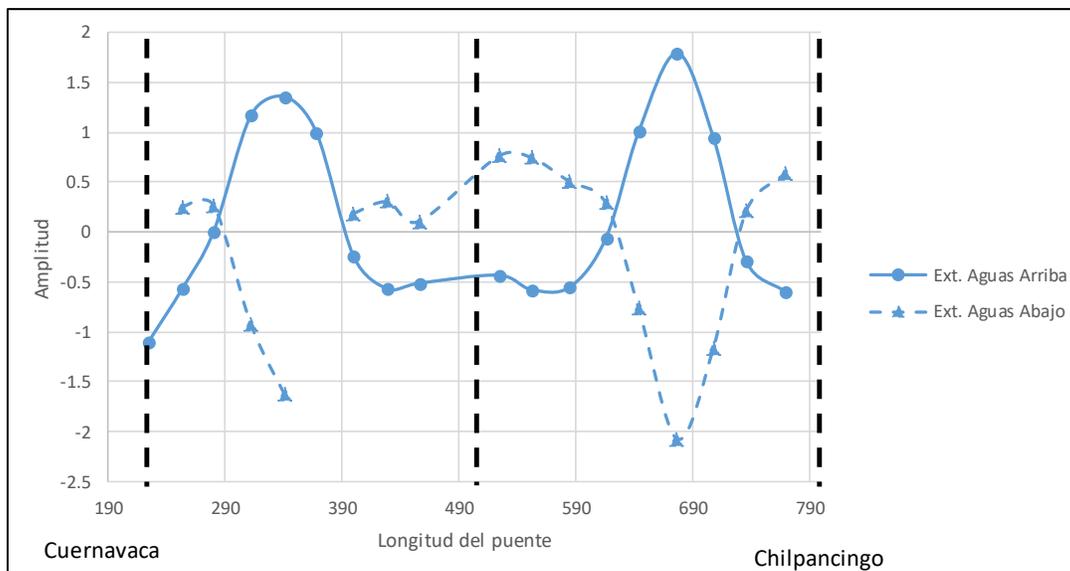


Figura 2.12 Forma modal de deformación del modo 6

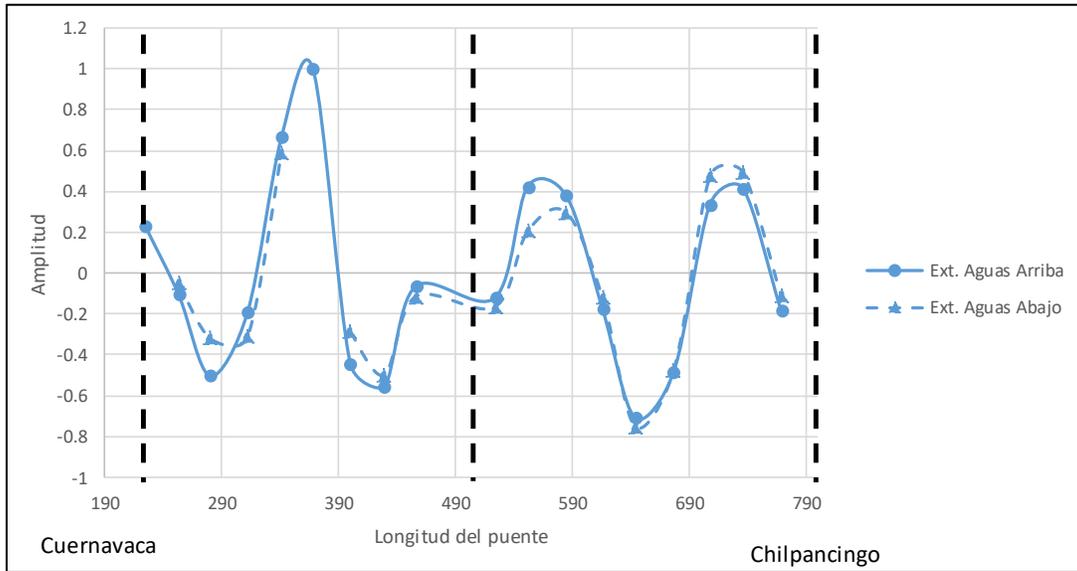


Figura 2.13 Forma modal de deformación del modo 7

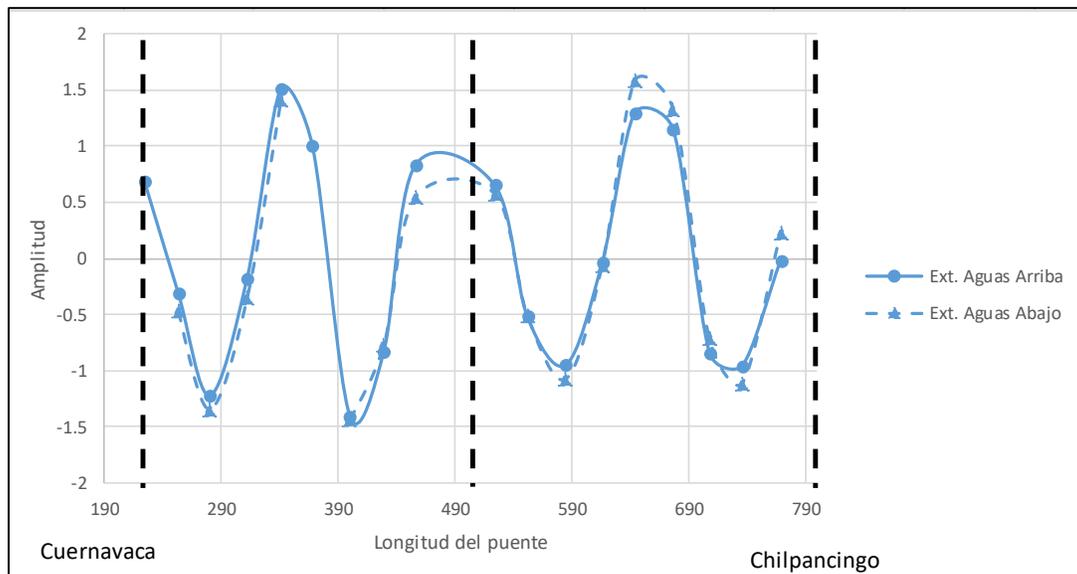


Figura 2.14 Forma modal de deformación del modo 8



### 3. Seguimiento del comportamiento estructural del puente Mezcala

---

A partir del año 2016 se ha dado seguimiento al comportamiento del puente Mezcala a través del seguimiento de los valores de referencia iniciales de cada parámetro (deformación, inclinación, tensión, frecuencia natural, etc.), del análisis de cada parámetro bajo condiciones de operación normal, del análisis estadístico de cada variable y de la evaluación de los cambios en los parámetros de acuerdo al mantenimiento preventivo realizado o algún tipo de daño encontrado.

En las figuras 3.1 a 3.8 se muestran las variaciones de las frecuencias naturales del puente Mezcala desde la implementación del sistema de monitoreo, el valor mostrado por mes corresponde al promedio de todas las mediciones realizadas en dicho lapso de tiempo.

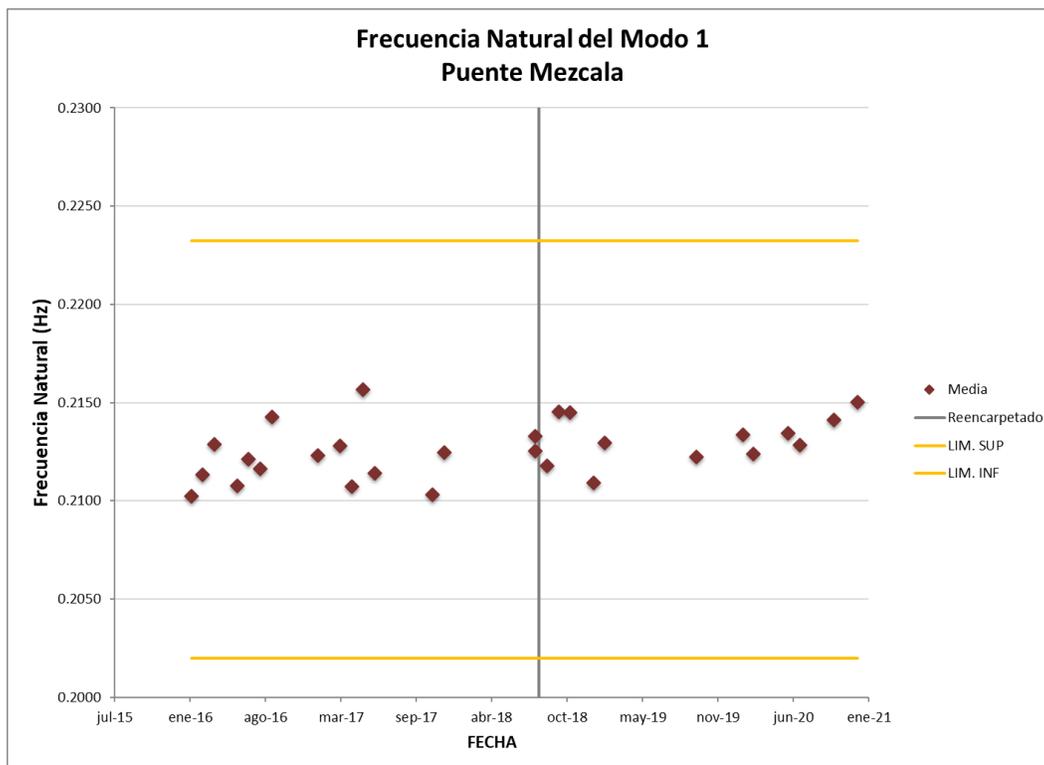


Figura 3.1 Variación de la frecuencia del modo 1

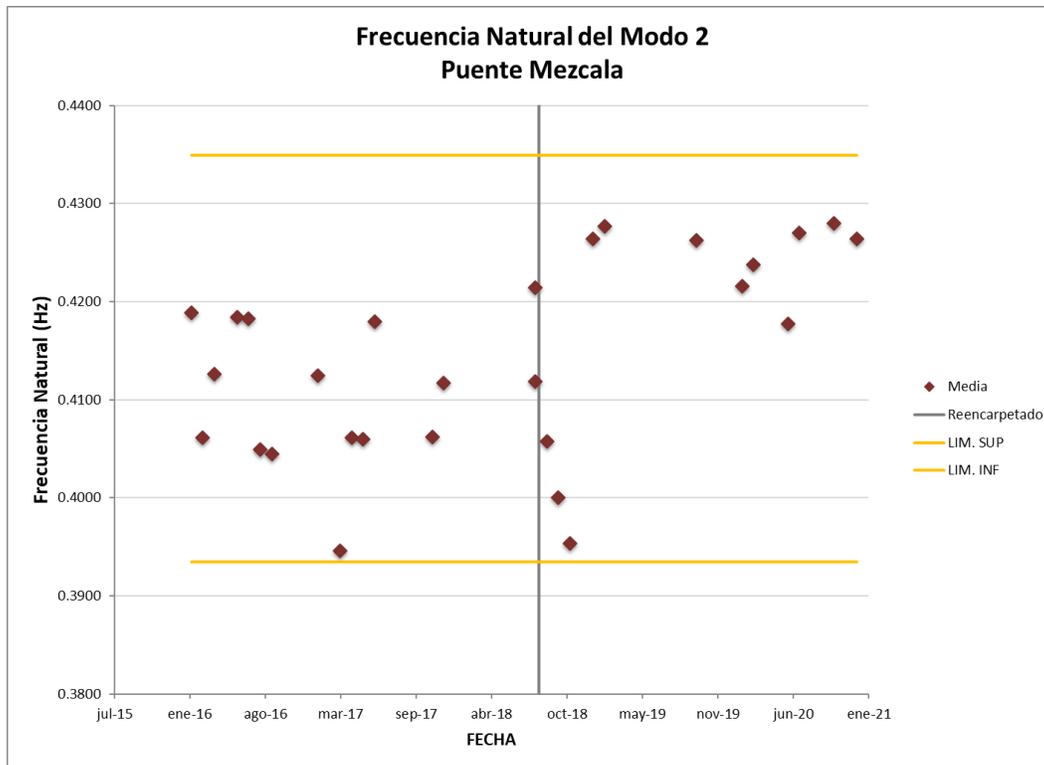


Figura 3.2 Variación de la frecuencia del modo 2

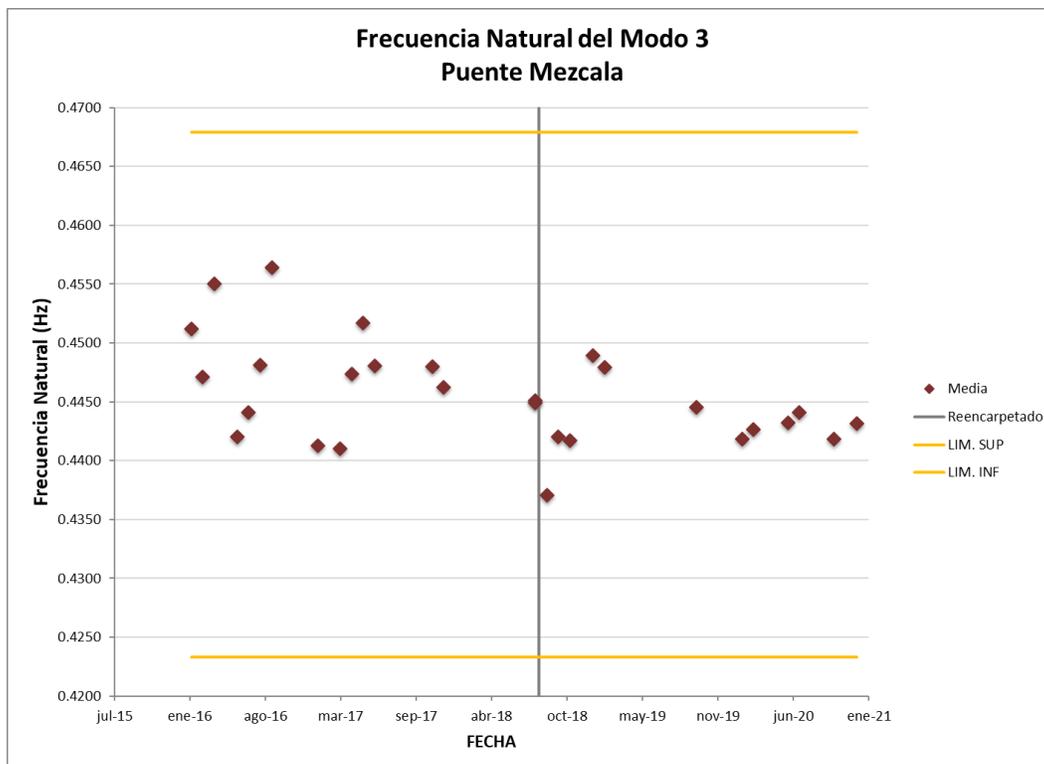


Figura 3.3 Variación de la frecuencia del modo 3



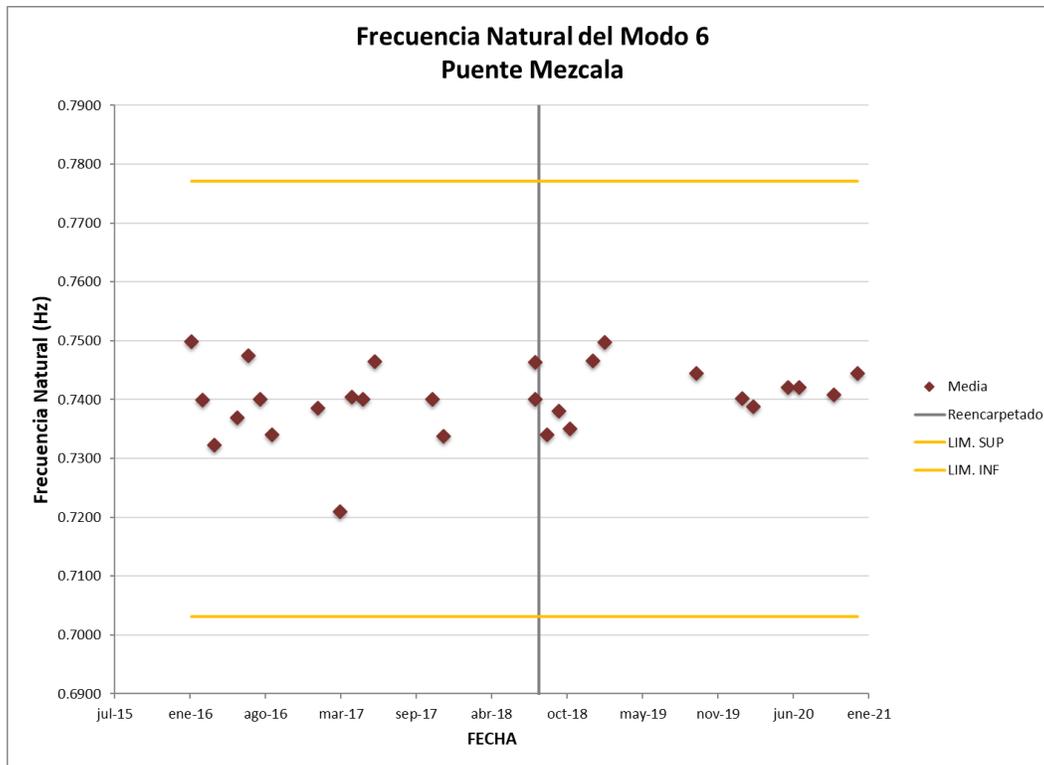


Figura 3.6 Variación de la frecuencia del modo 6

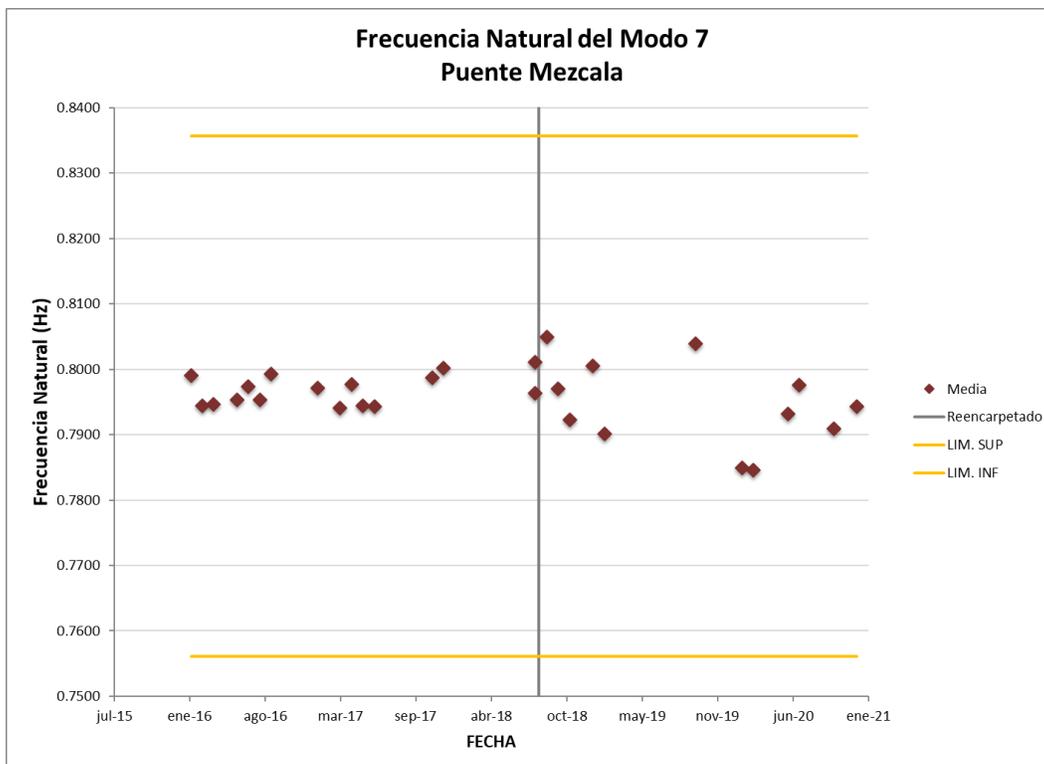
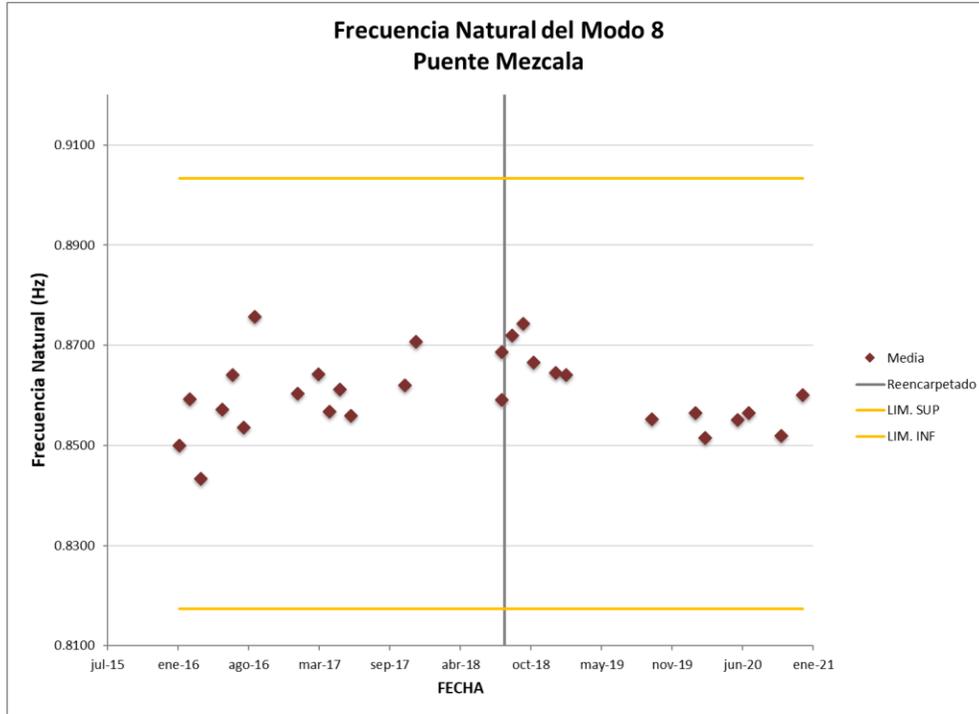
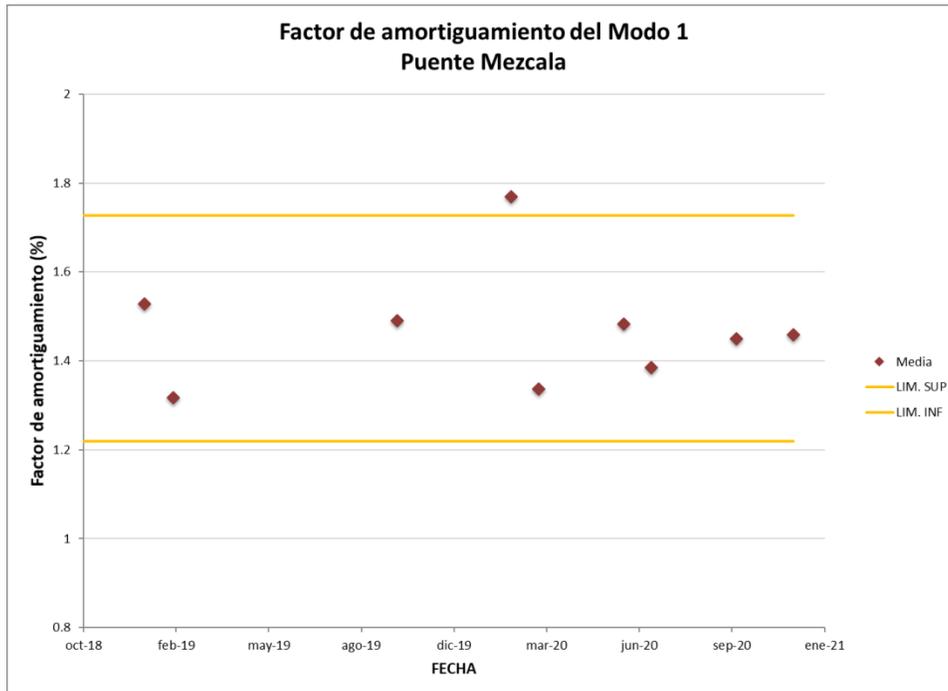


Figura 3.7 Variación de la frecuencia del modo 7



**Figura 3.8 Variación de la frecuencia del modo 8**

En las figuras 3.9 a 3.17 se muestra el comportamiento del factor de amortiguamiento de los modos 1 al 8 de acuerdo a la estimación con la técnica EFDD.



**Figura 3.9 Variación del factor de amortiguamiento del modo 1**

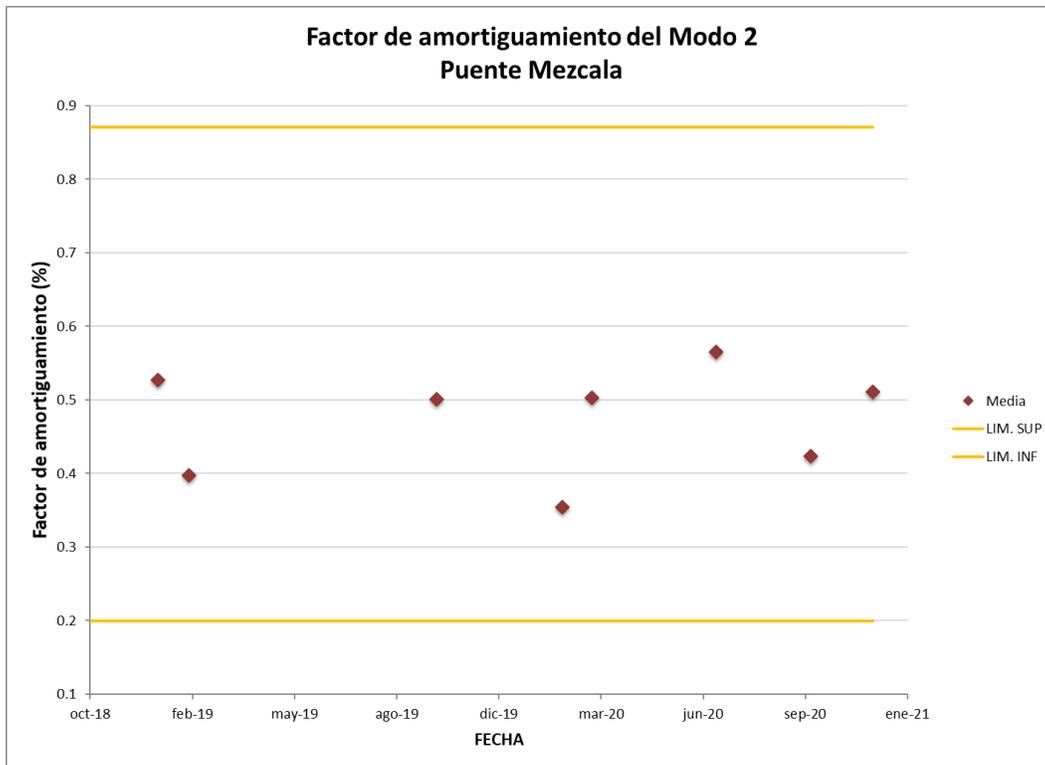


Figura 3.10 Variación del factor de amortiguamiento del modo 2

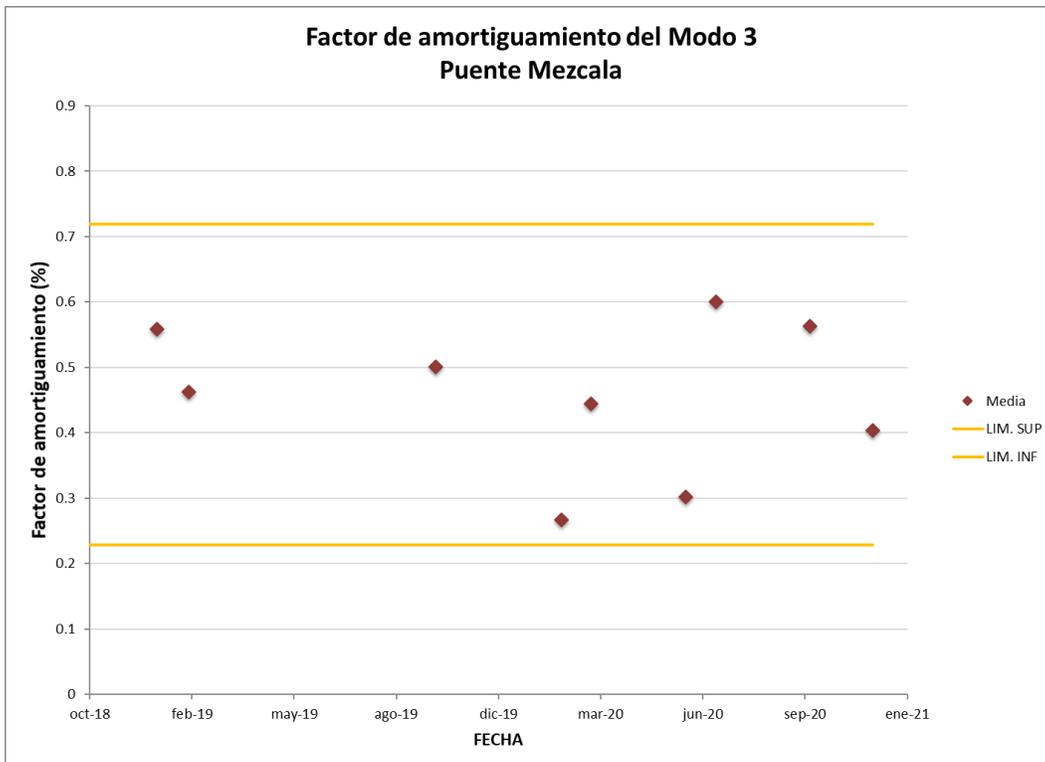


Figura 3.11 Variación del factor de amortiguamiento del modo 3

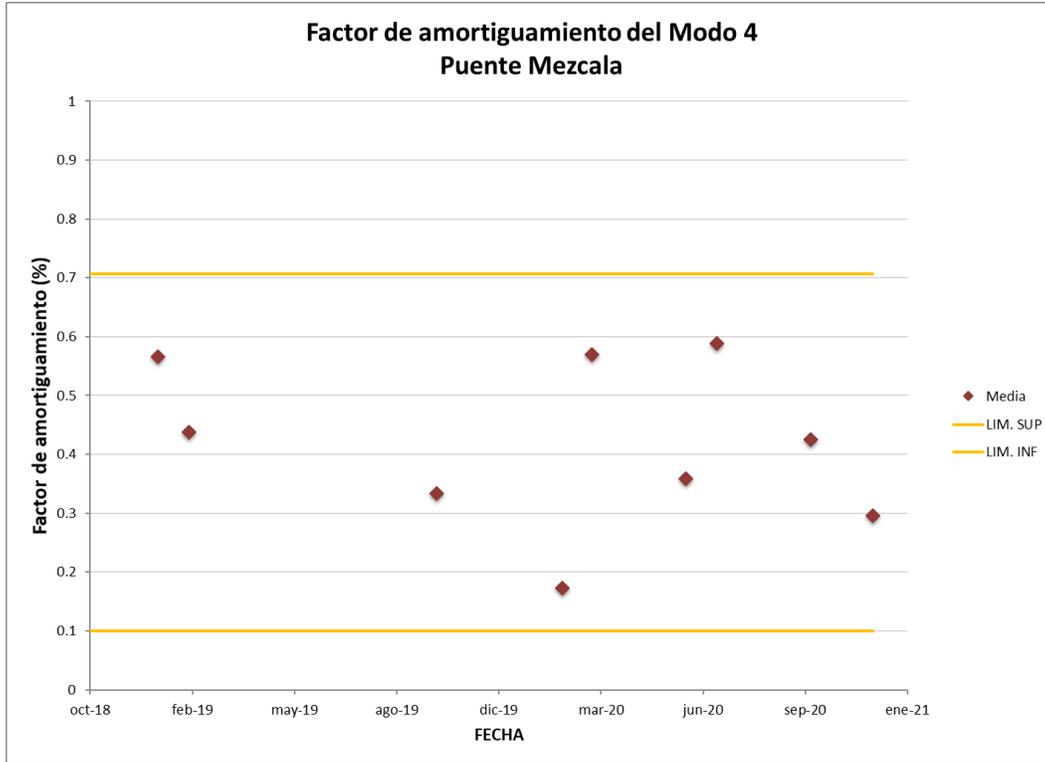


Figura 3.12 Variación del factor de amortiguamiento del modo 4

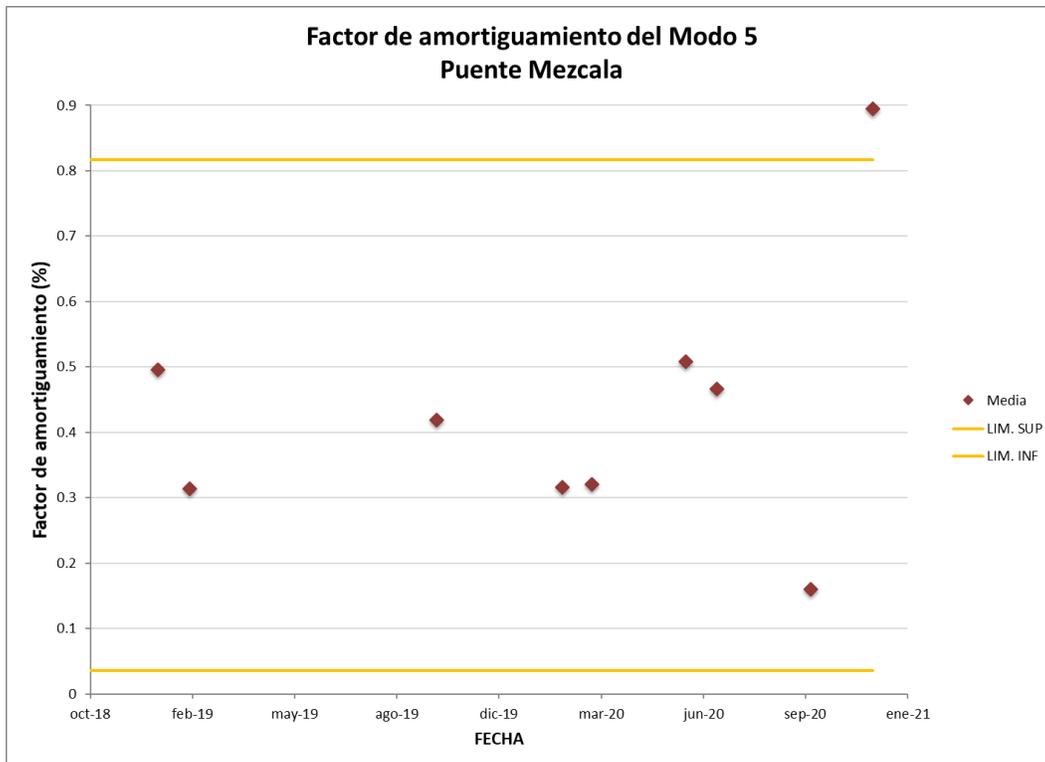


Figura 3.13 Variación del factor de amortiguamiento del modo 5

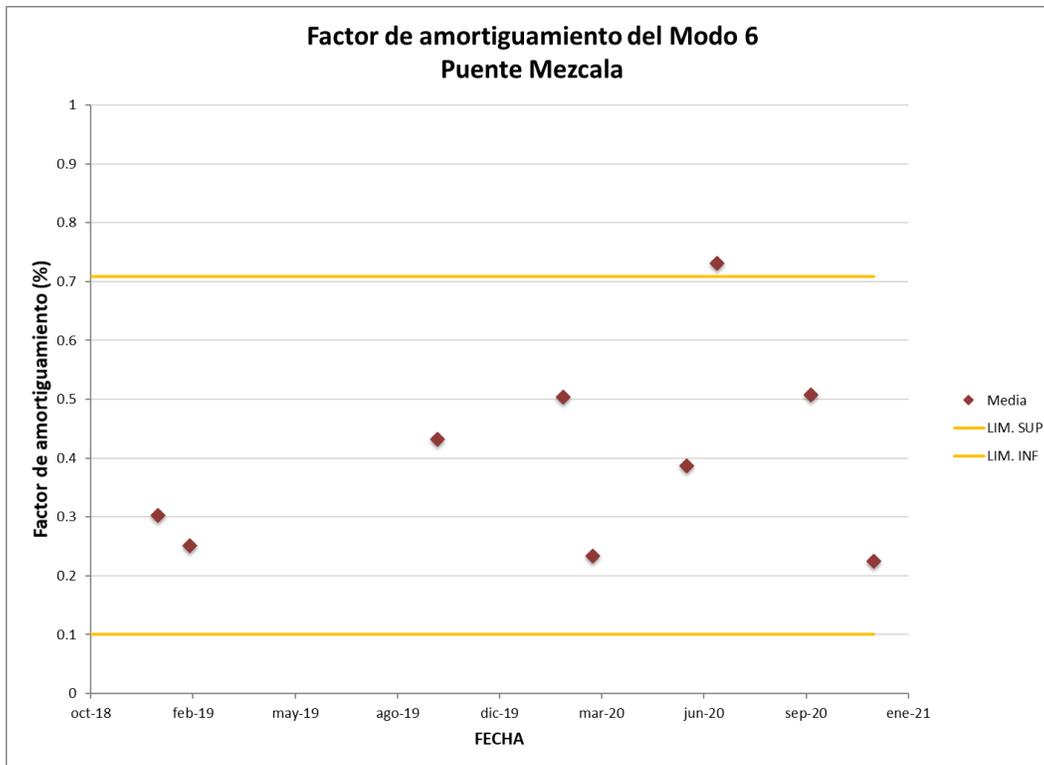


Figura 3.14 Variación del factor de amortiguamiento del modo 6

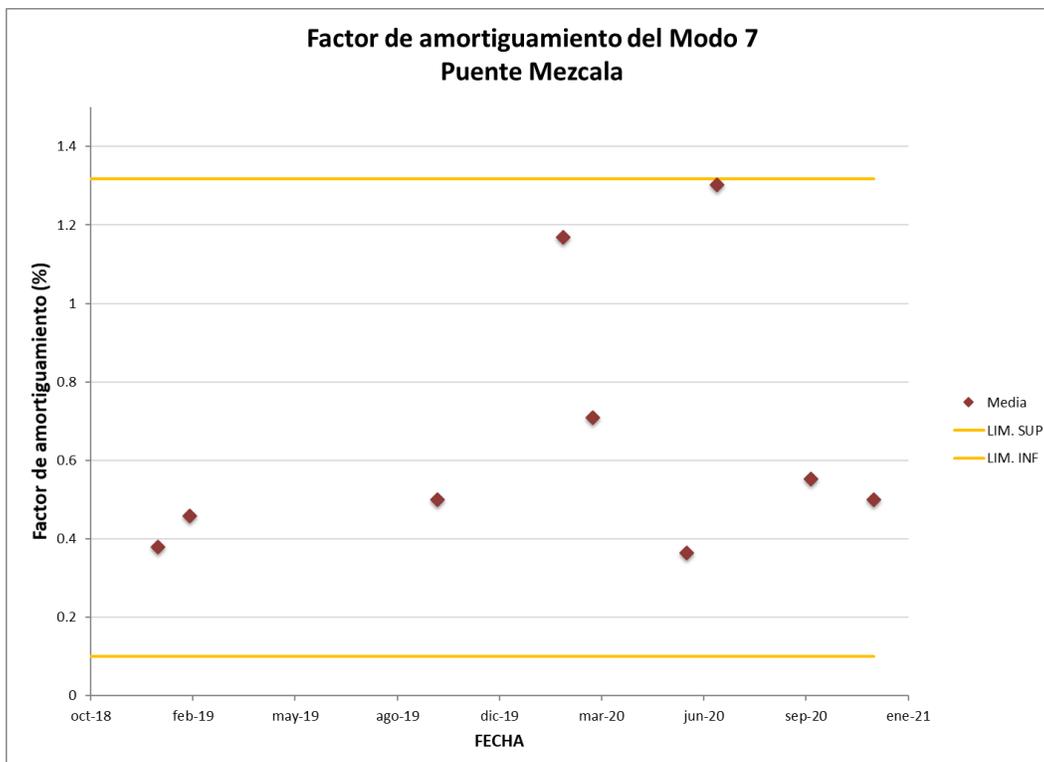


Figura 3.15 Variación del factor de amortiguamiento del modo 7

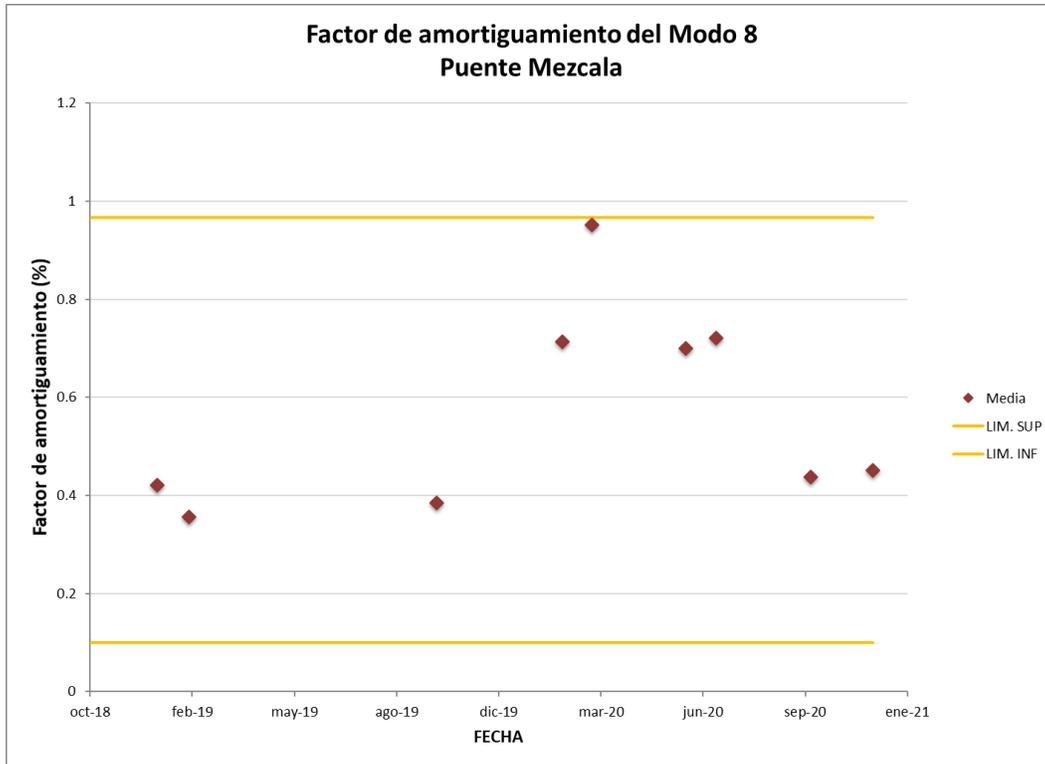


Figura 3.16 Variación del factor de amortiguamiento del modo 8

Los valores promedio de los sensores del sistema de monitoreo ante las acciones de las cargas vivas vehiculares se muestran en las figuras 3.17 a 3.22.

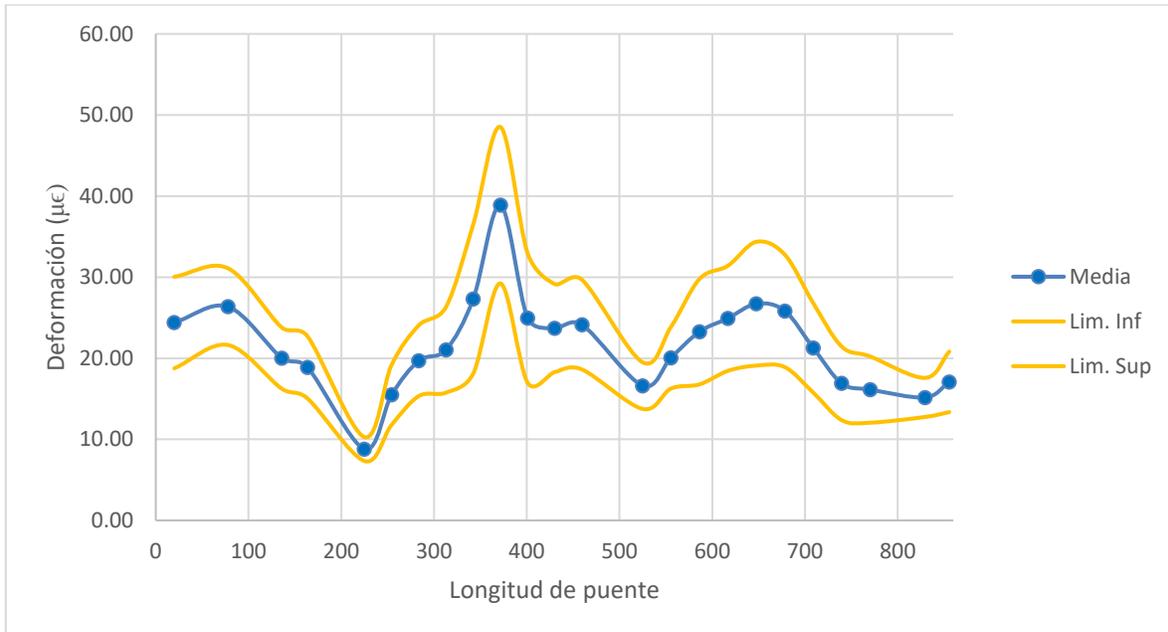


Figura 3.17 Valores promedio de las deformaciones a tensión del cuerpo A

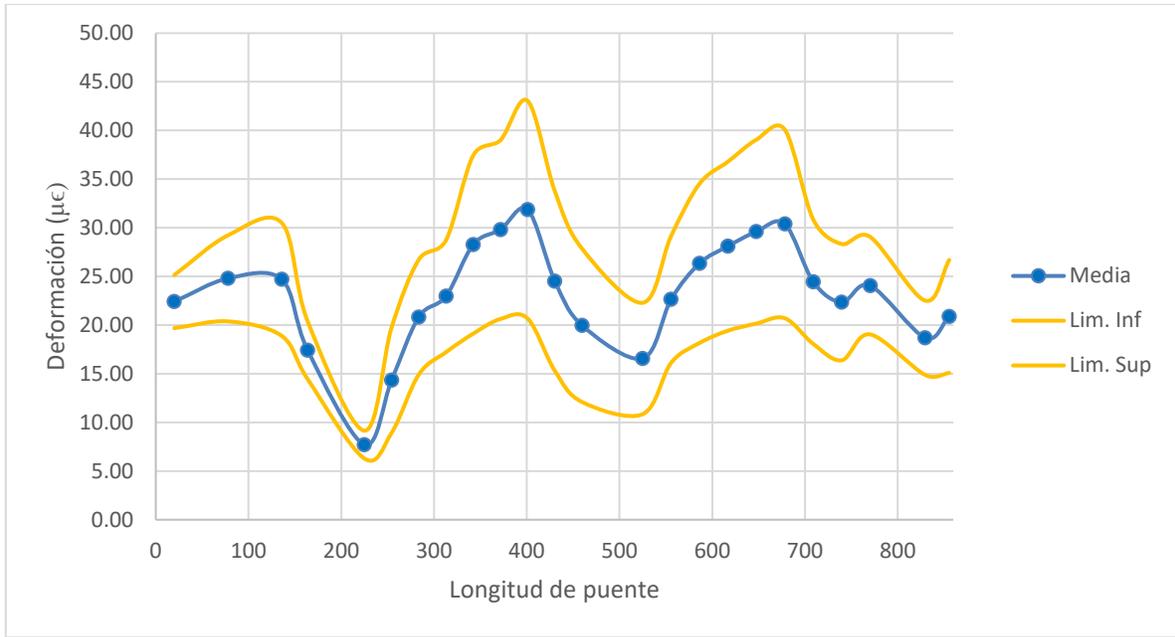


Figura 3.18 Valores promedio de las deformaciones a tensión del cuerpo B

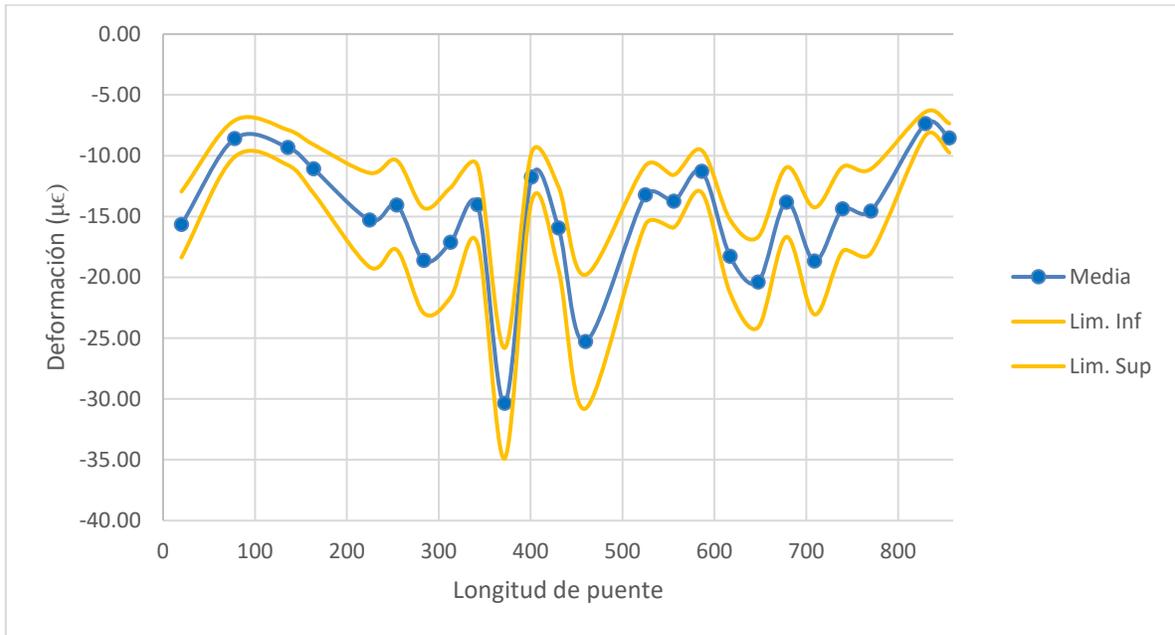


Figura 3.19 Valores promedio de las deformaciones a compresión del cuerpo A

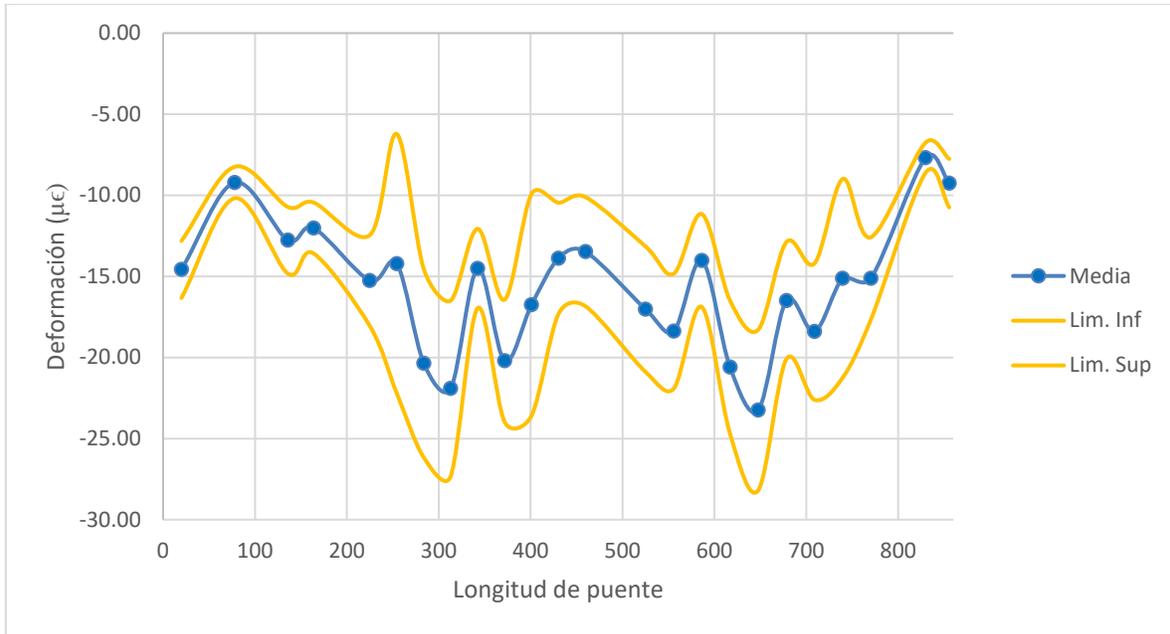


Figura 3.20 Valores promedio de las deformaciones a compresión del cuerpo B

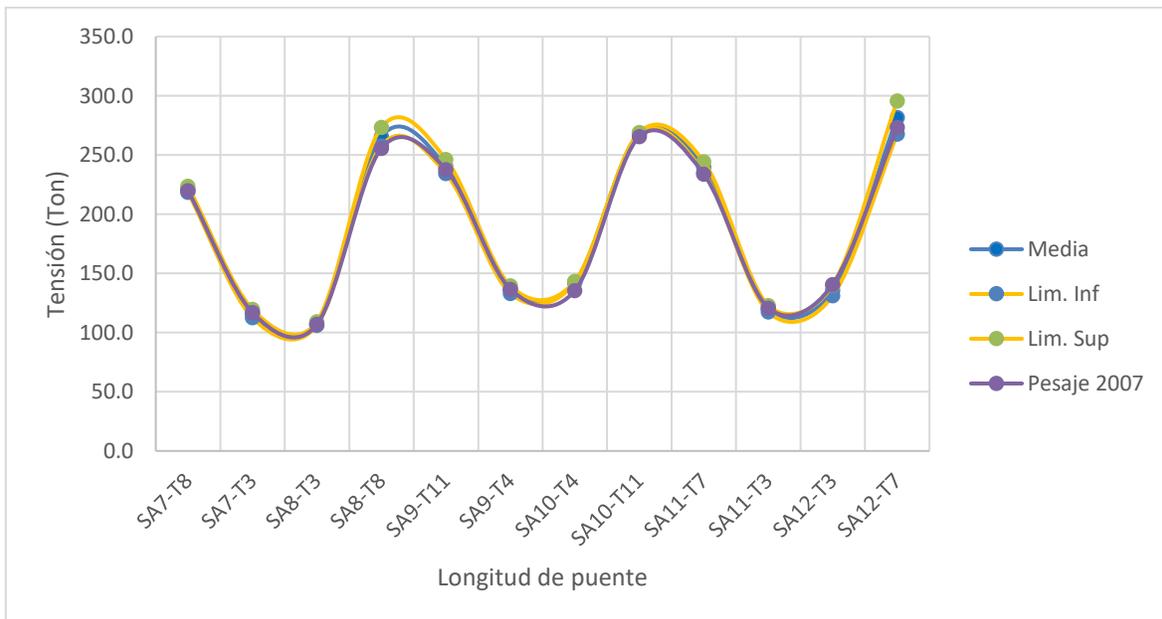


Figura 3.21 Valores promedio de las a tensiones del cuerpo A

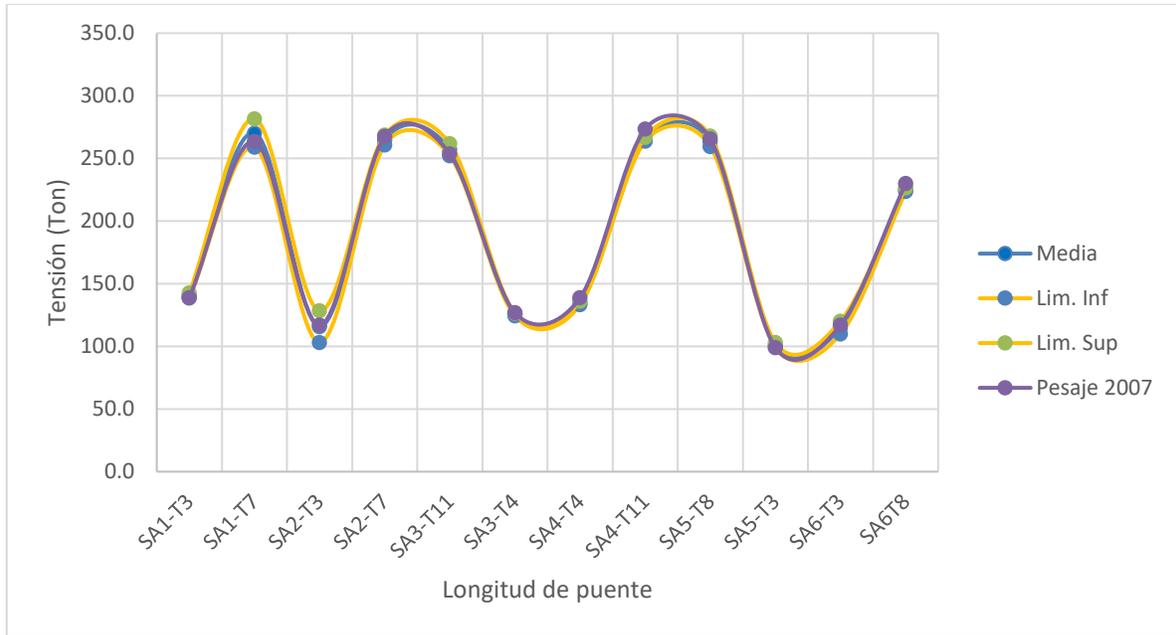


Figura 3.22 Valores promedio de las a tensiones del cuerpo A

A continuación, en las figuras 3.23 a 3.70 se puede observar el valor de referencia de deformación desde que fueron instalados los extensómetros de fibra óptica en el 2016. En cada uno de los gráficos se muestra la fecha del reencarpetao de la carpeta asfáltica mediante una línea. Desafortunadamente debido a problemas de comunicación y energización del sistema de monitoreo no fue posible obtener datos del monitoreo en un considerable periodo de tiempo.

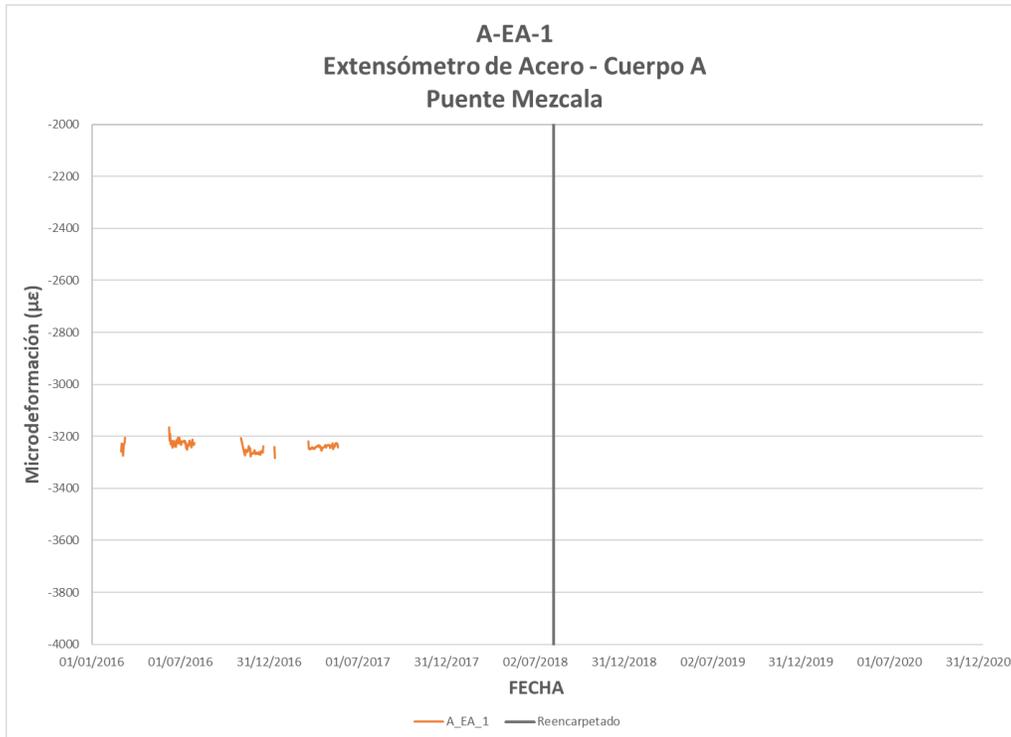


Figura 3.23 Valores de deformación del extensómetro A-EA-1

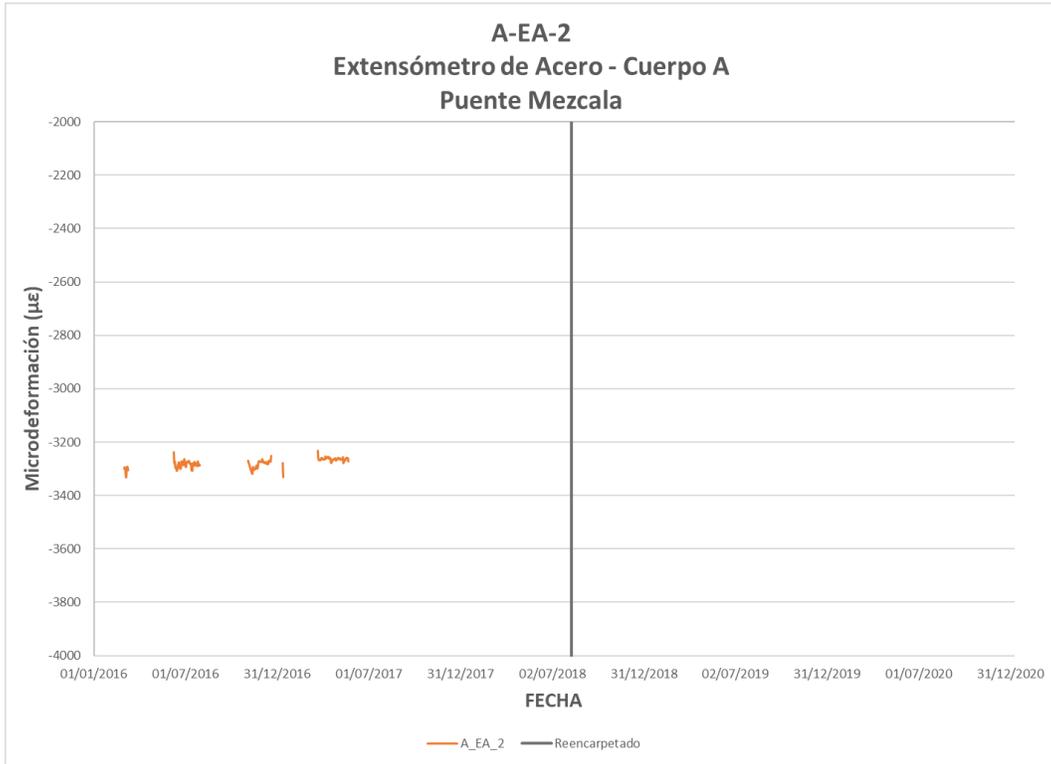


Figura 3.24 Valores de deformación del extensómetro A-EA-2

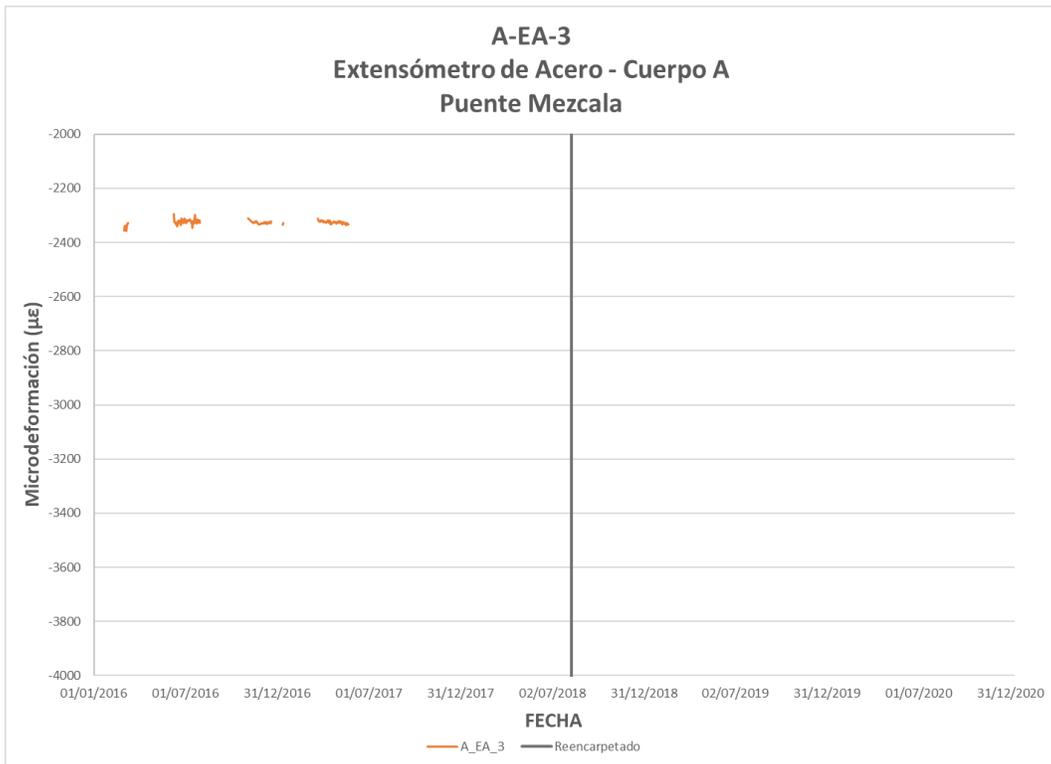


Figura 3.25 Valores de deformación del extensómetro A-EA-3

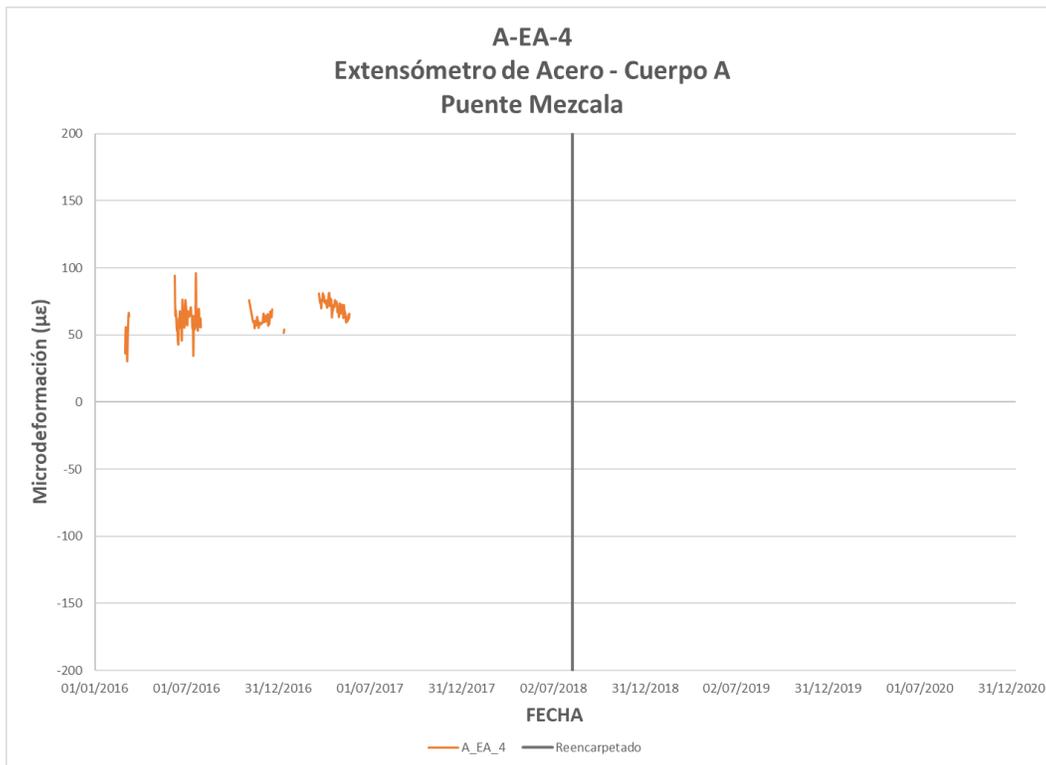


Figura 3.26 Valores de deformación del extensómetro A-EA-4

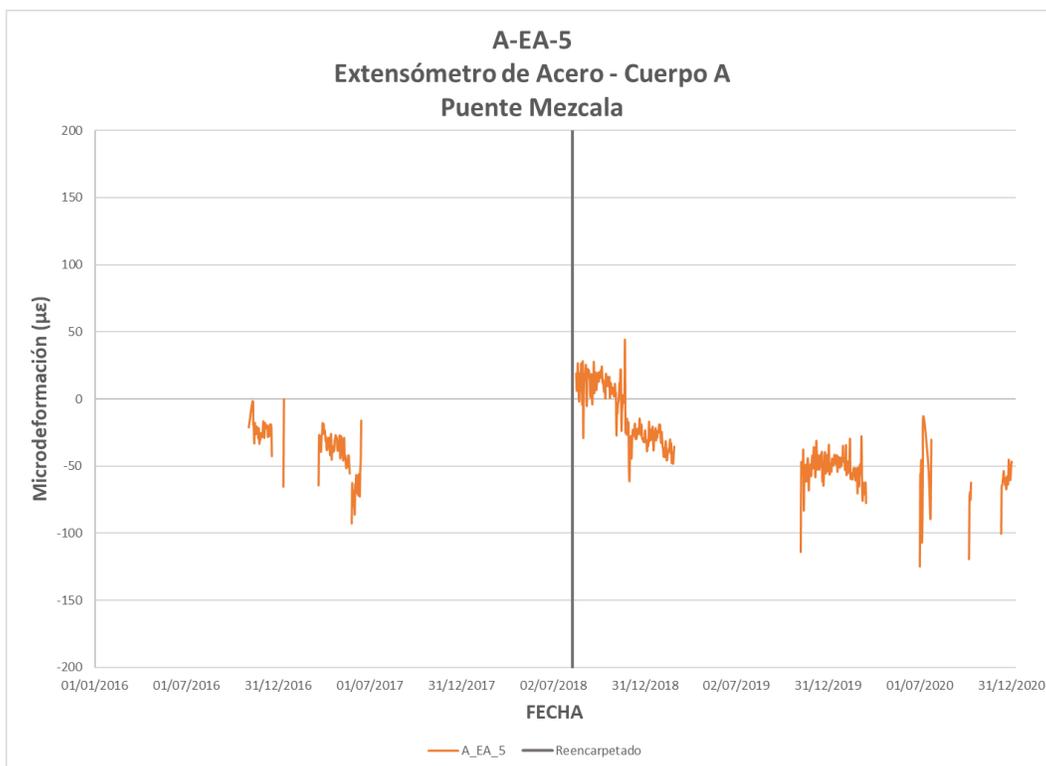


Figura 3.27 Valores de deformación del extensómetro A-EA-5

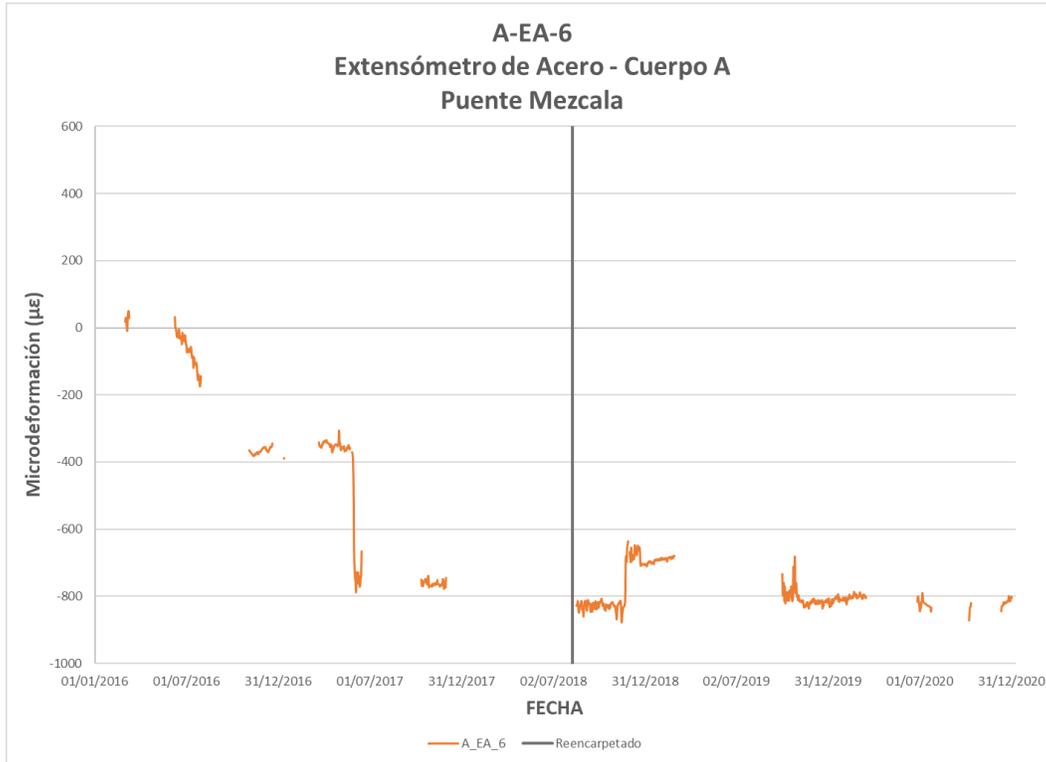


Figura 3.28 Valores de deformación del extensómetro A-EA-6

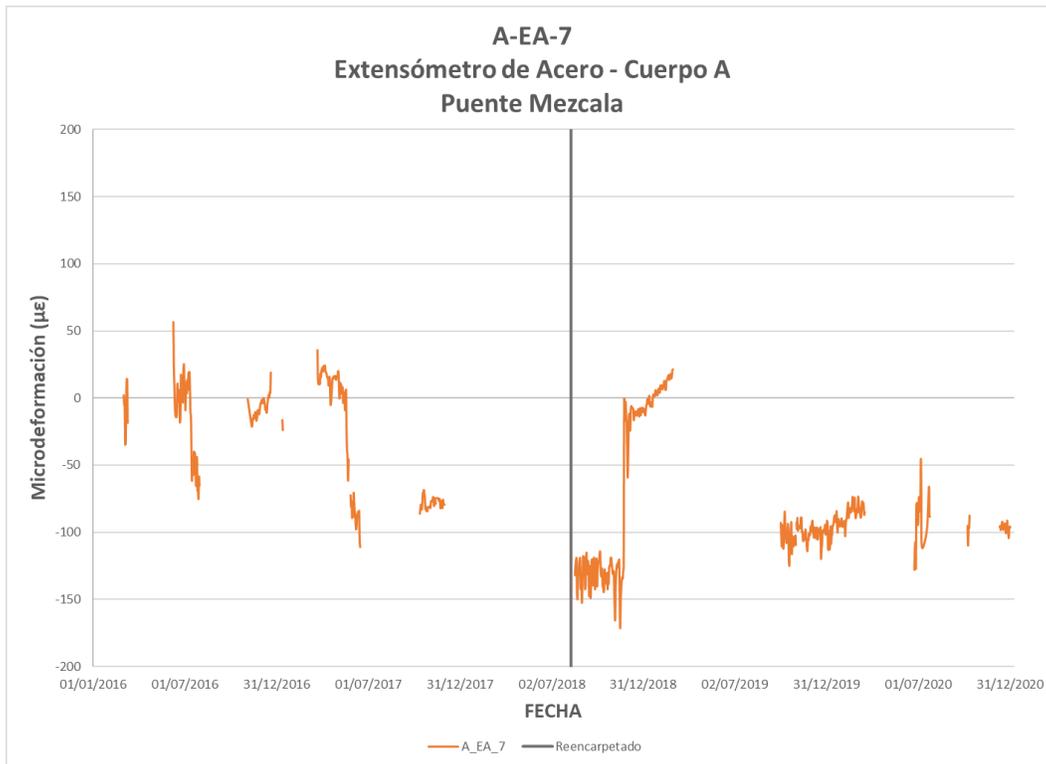


Figura 3.29 Valores de deformación del extensómetro A-EA-7

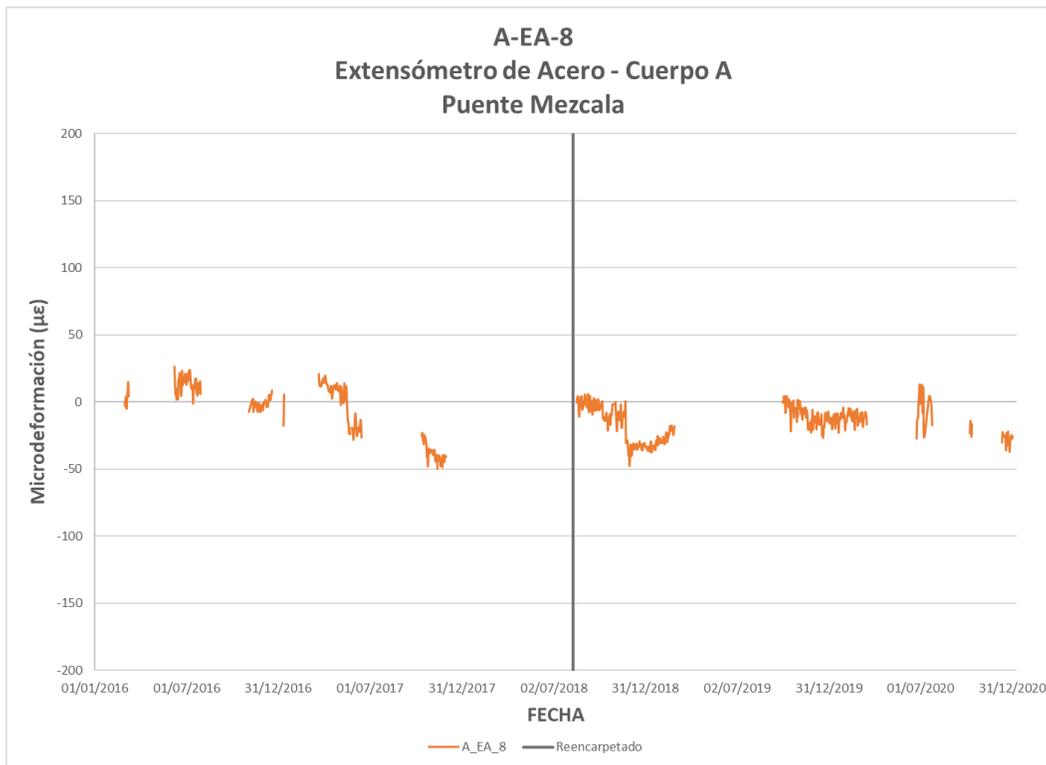


Figura 3.30 Valores de deformación del extensómetro A-EA-8

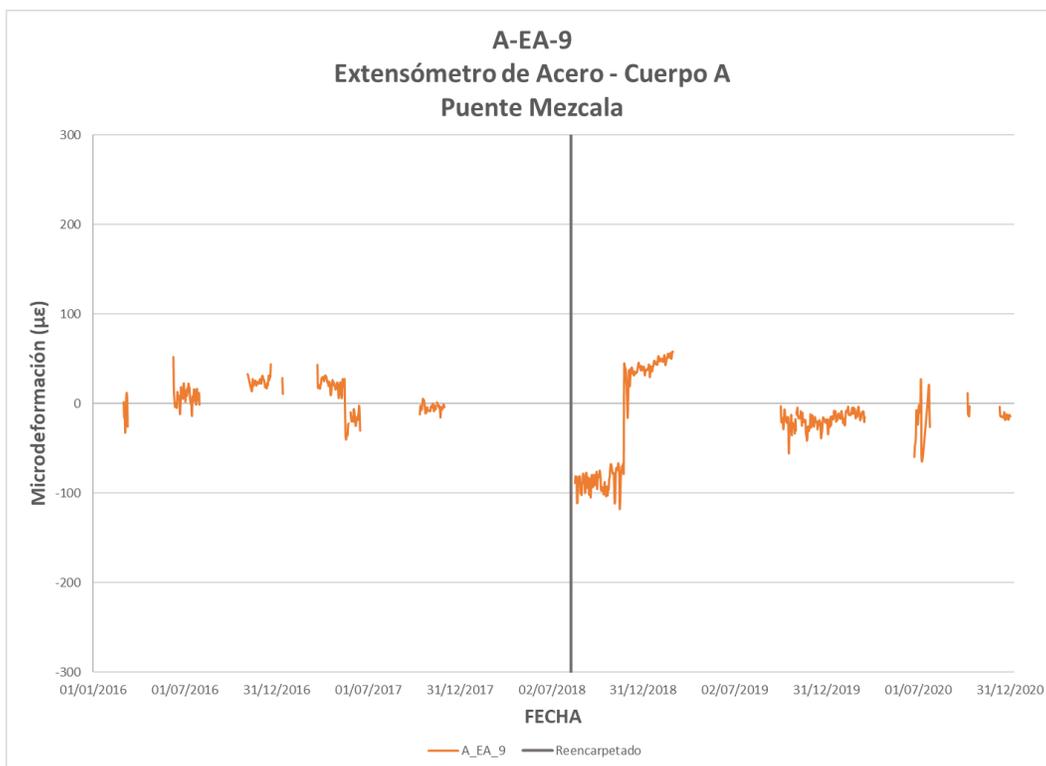


Figura 3.31 Valores de deformación del extensómetro A-EA-9

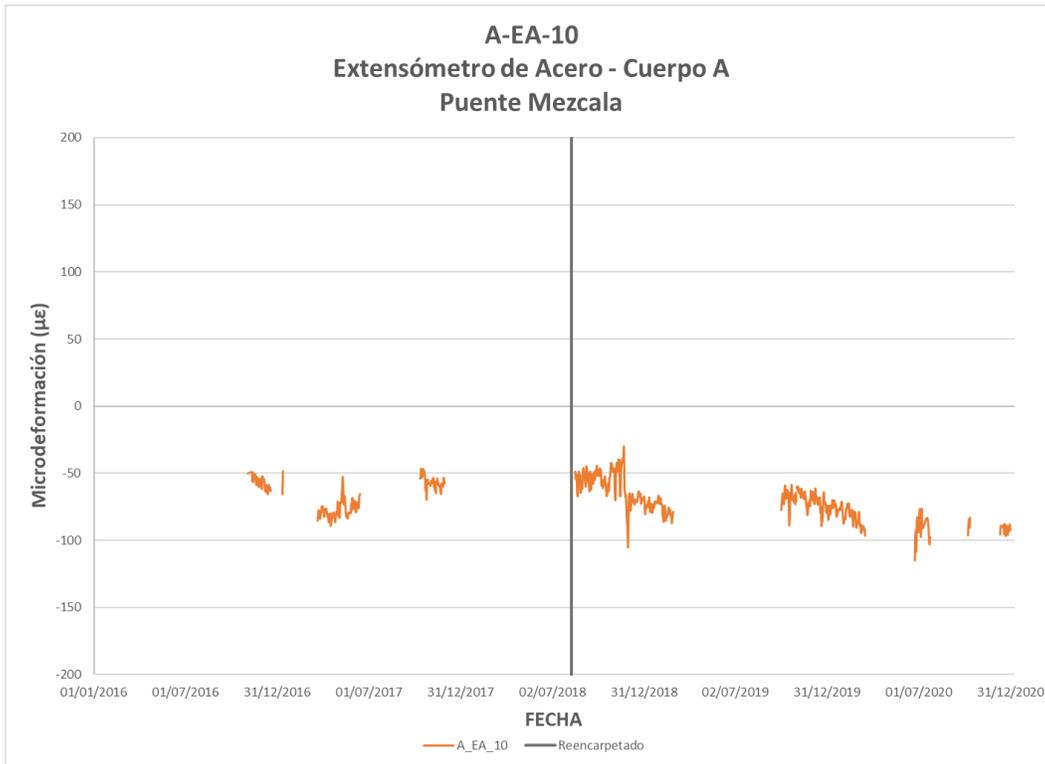


Figura 3.32 Valores de deformación del extensómetro A-EA-10

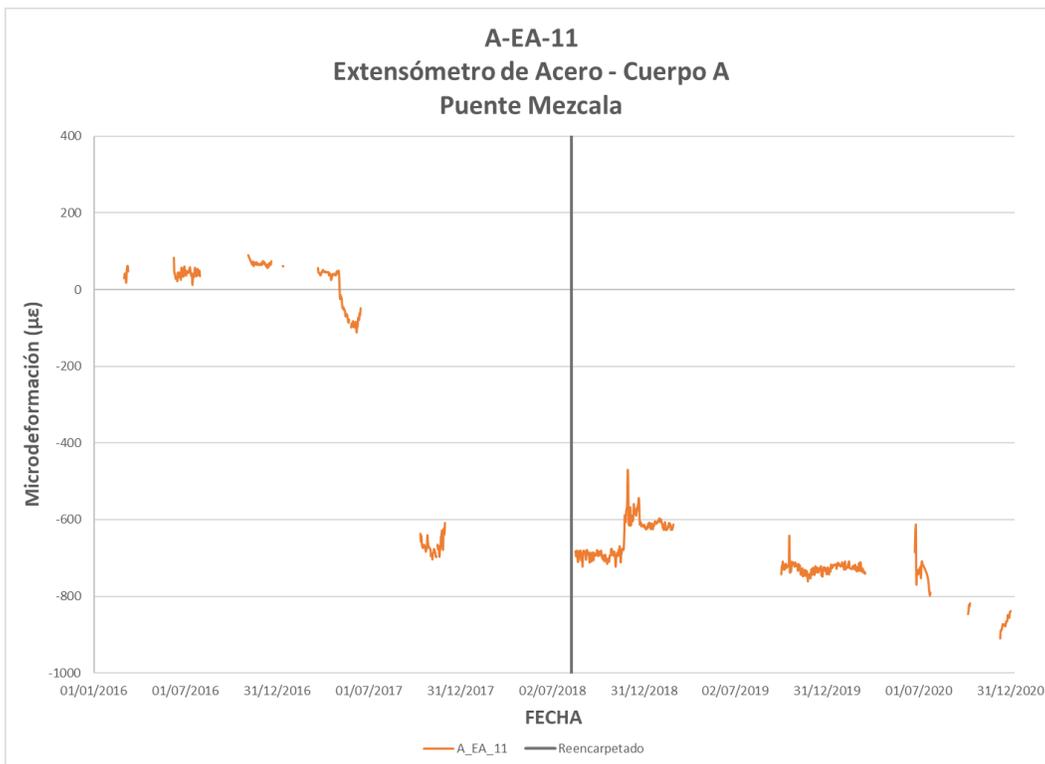


Figura 3.33 Valores de deformación del extensómetro A-EA-11

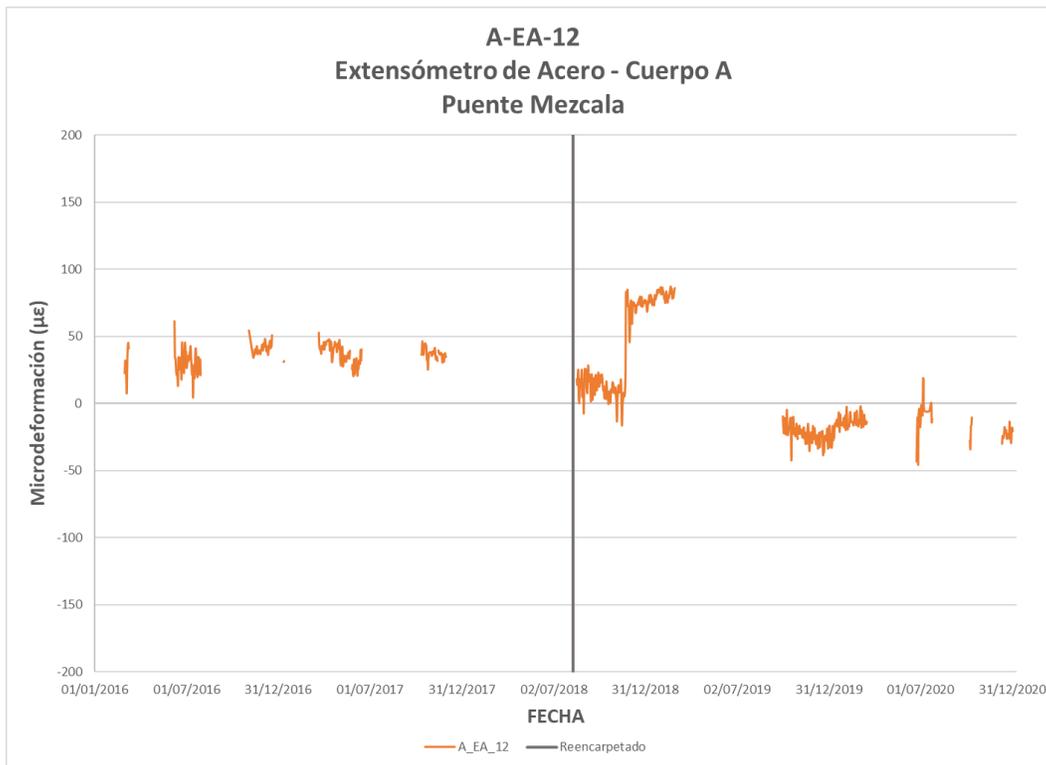


Figura 3.34 Valores de deformación del extensómetro A-EA-12

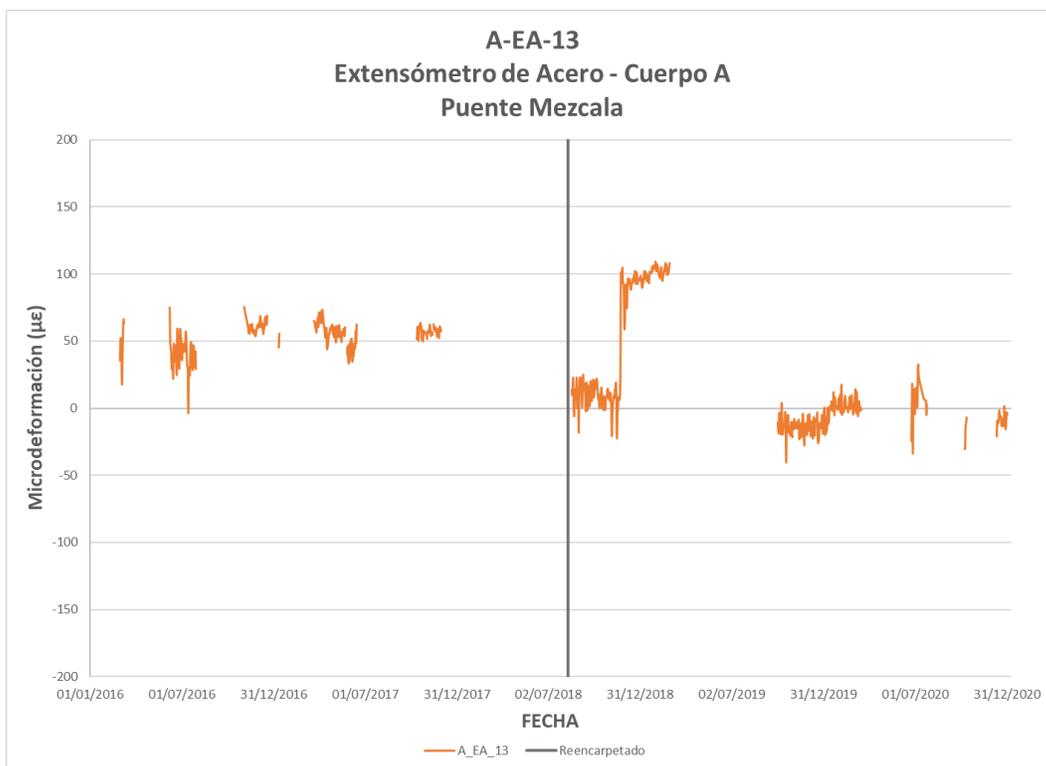


Figura 3.35 Valores de deformación del extensómetro A-EA-13

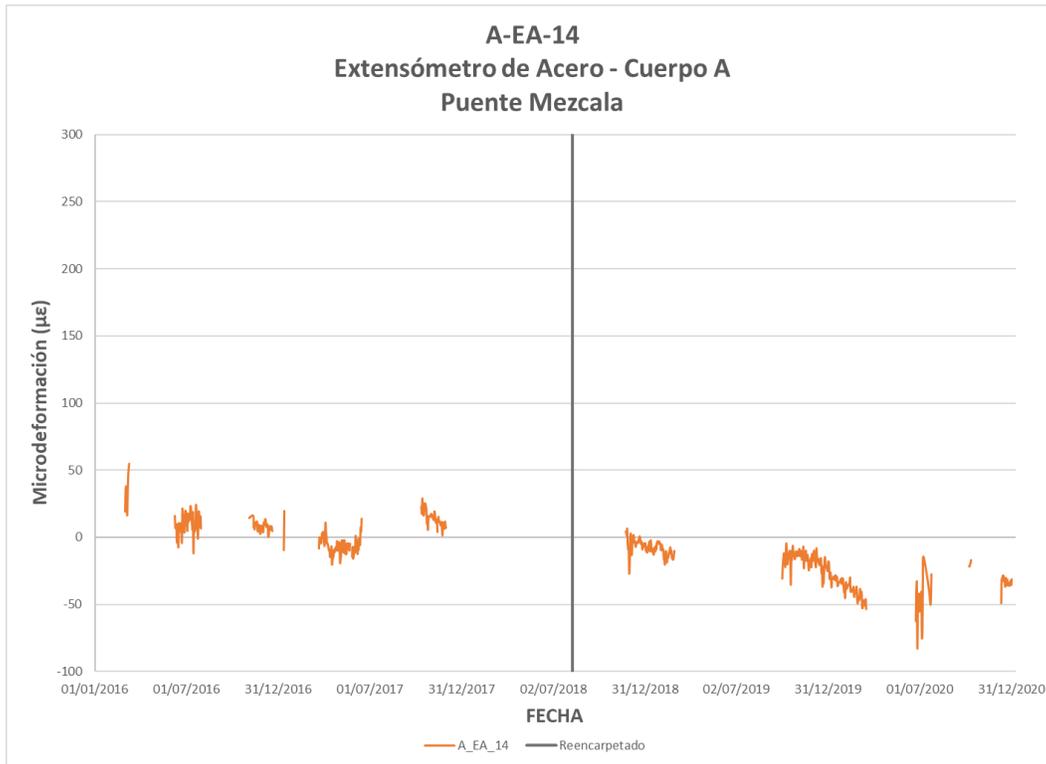


Figura 3.36 Valores de deformación del extensómetro A-EA-14

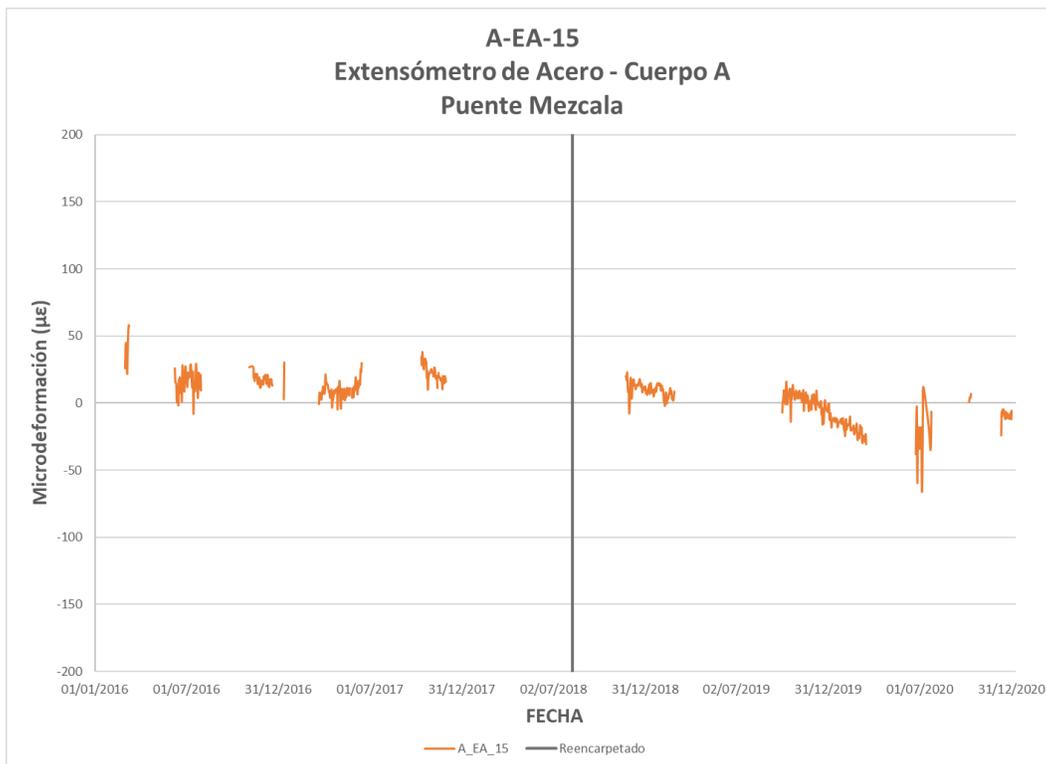


Figura 3.37 Valores de deformación del extensómetro A-EA-15

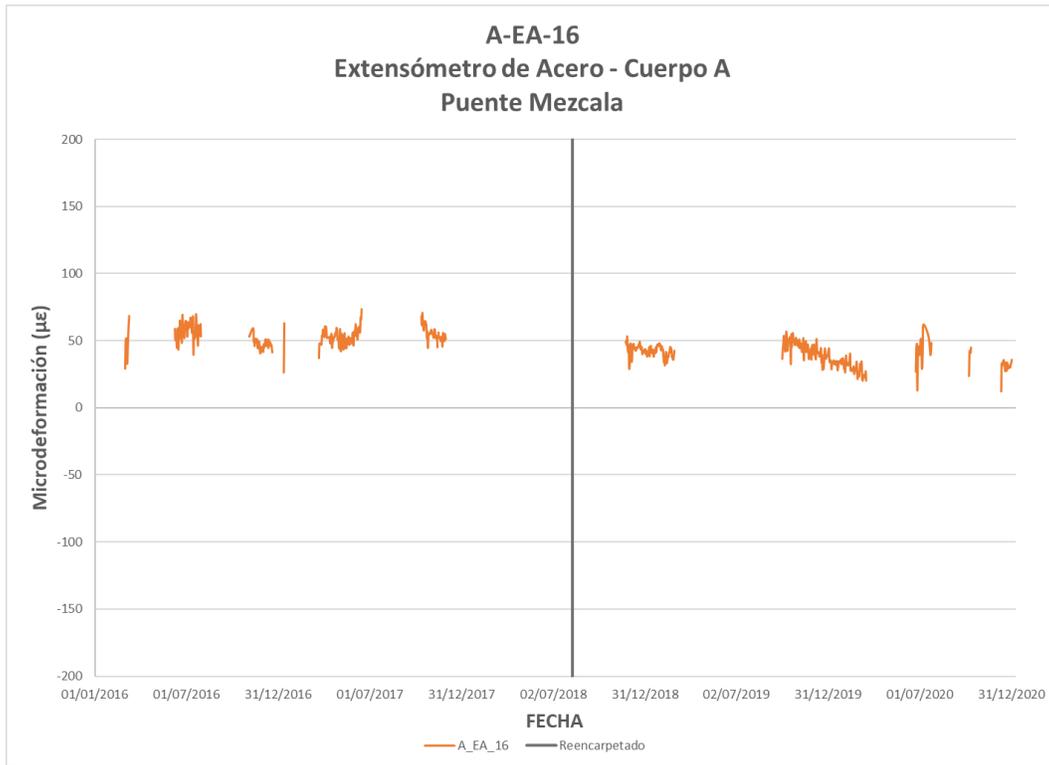


Figura 3.38 Valores de deformación del extensómetro A-EA-16

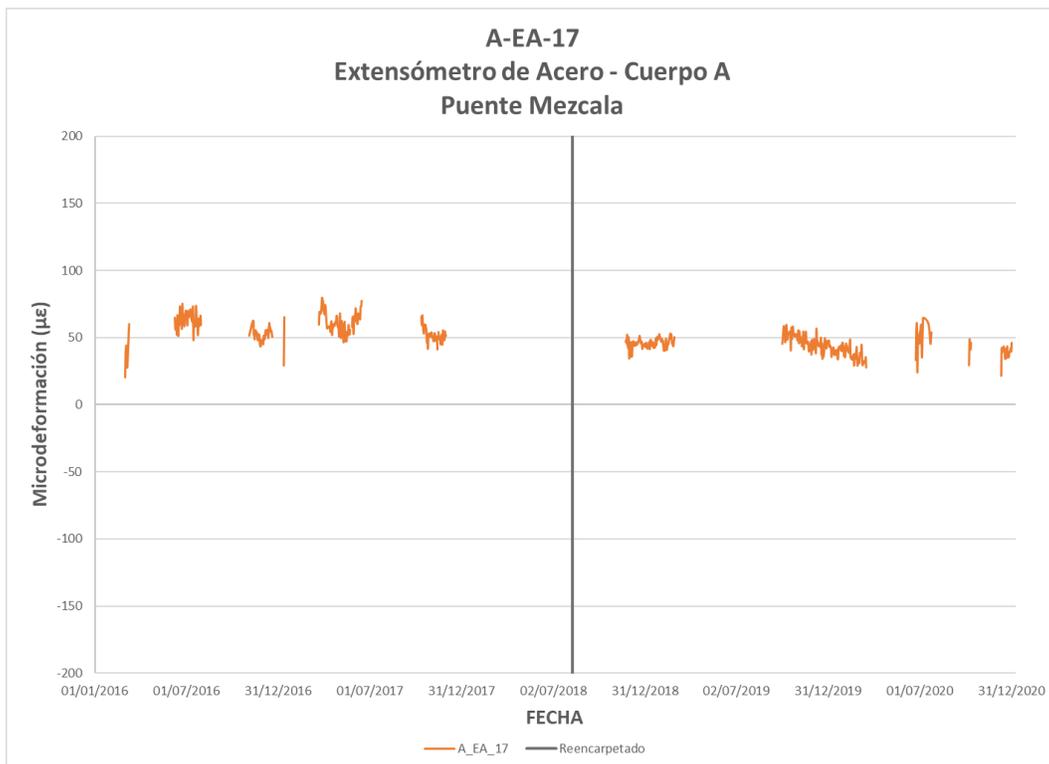


Figura 3.39 Valores de deformación del extensómetro A-EA-17

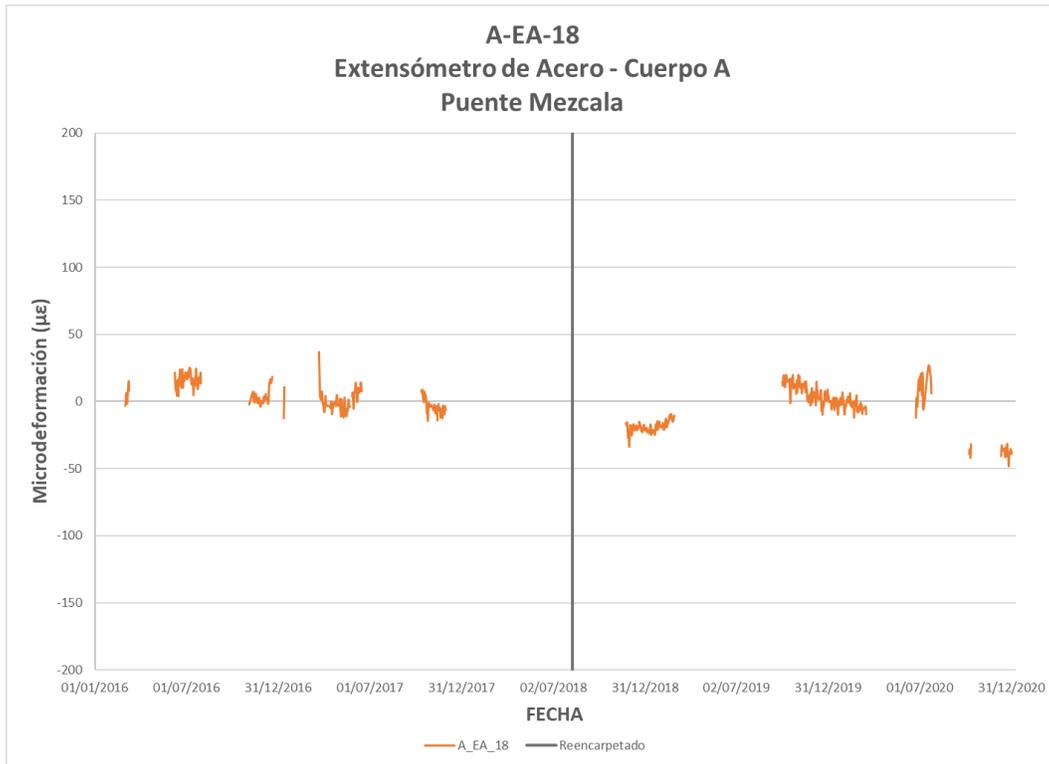


Figura 3.40 Valores de deformación del extensómetro A-EA-18

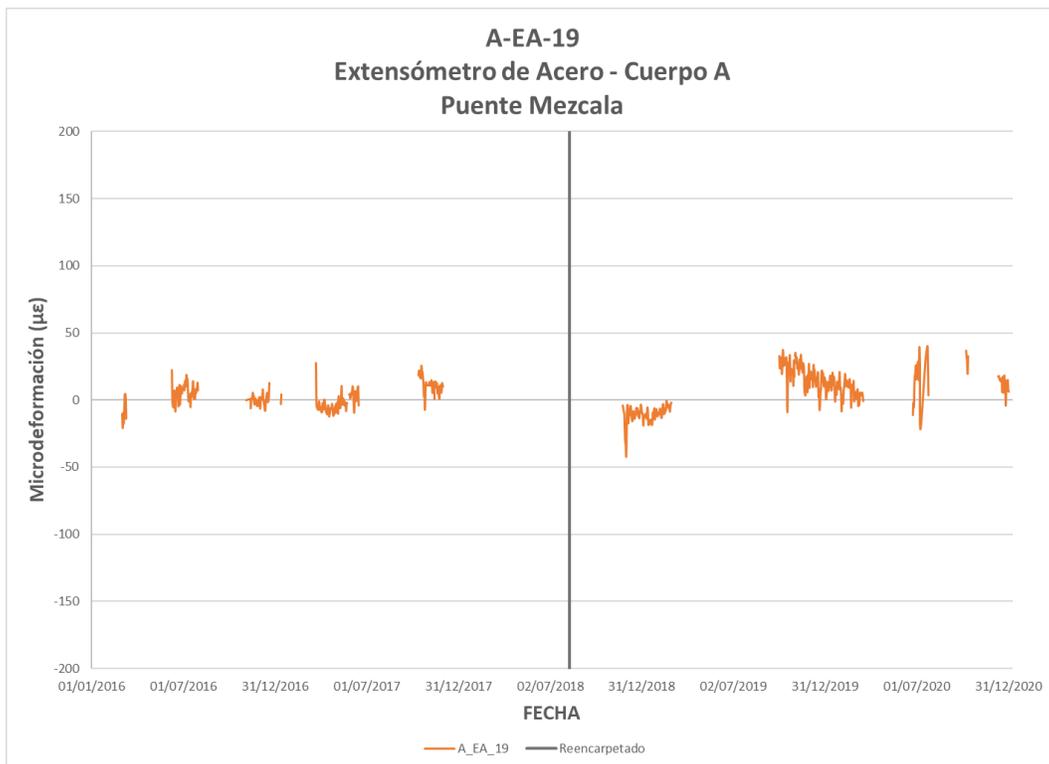


Figura 3.41 Valores de deformación del extensómetro A-EA-19

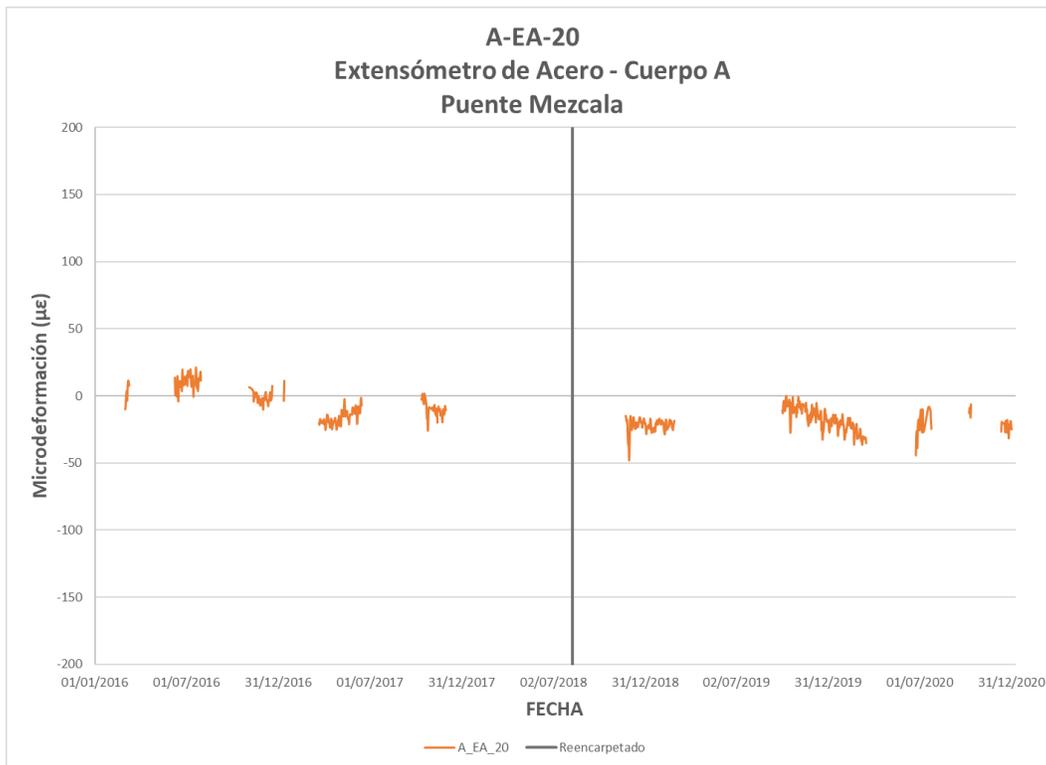


Figura 3.42 Valores de deformación del extensómetro A-EA-20

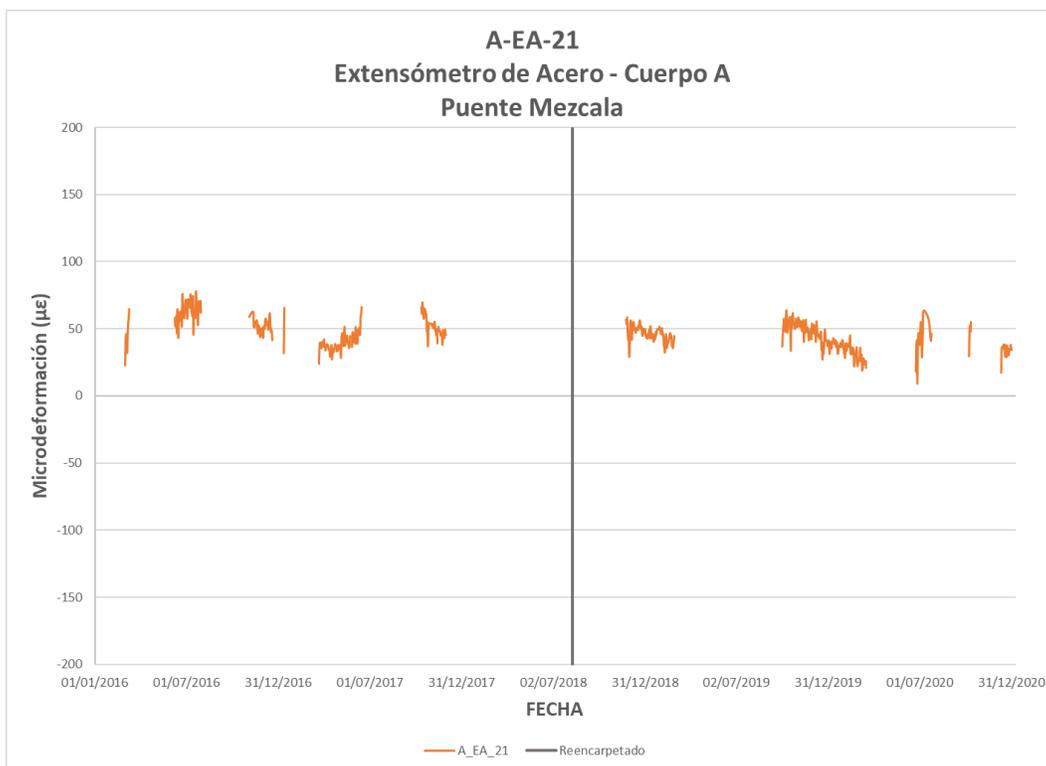


Figura 3.43 Valores de deformación del extensómetro A-EA-21

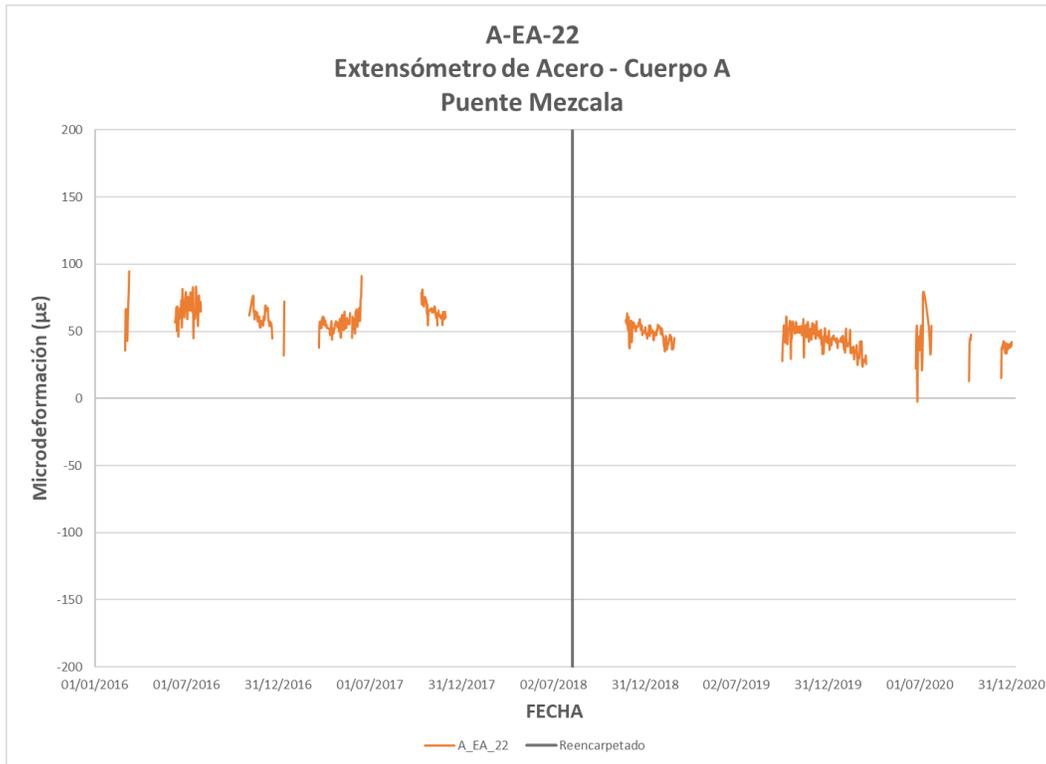


Figura 3.44 Valores de deformación del extensómetro A-EA-22

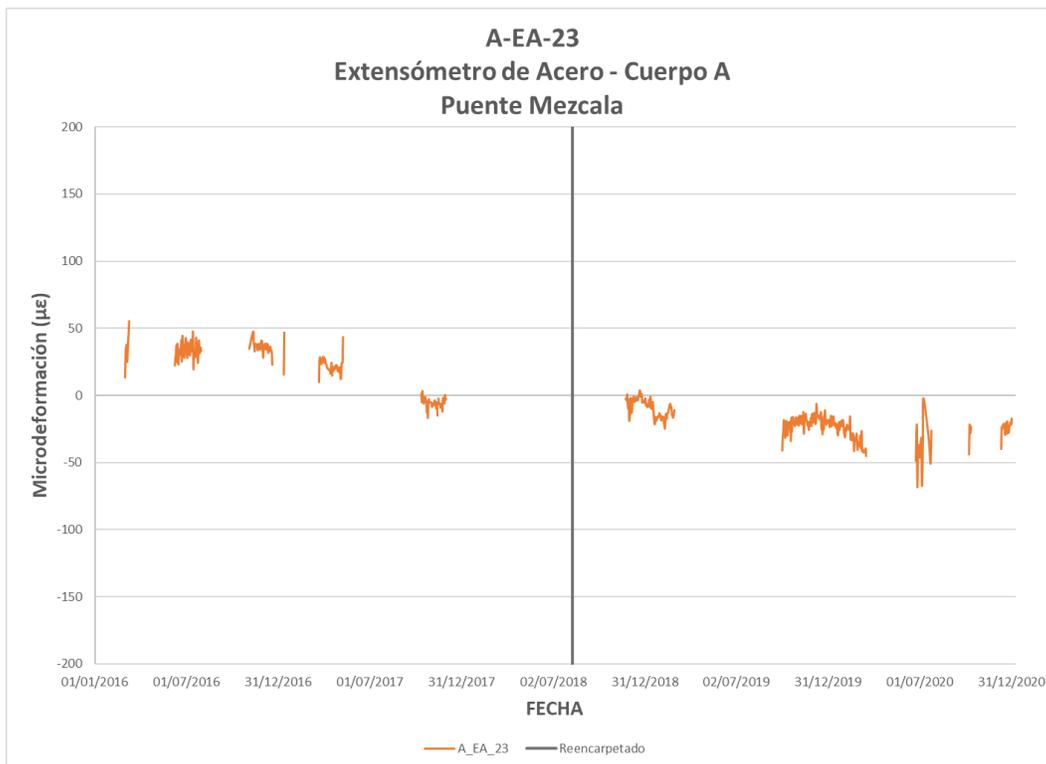


Figura 3.45 Valores de deformación del extensómetro A-EA-23

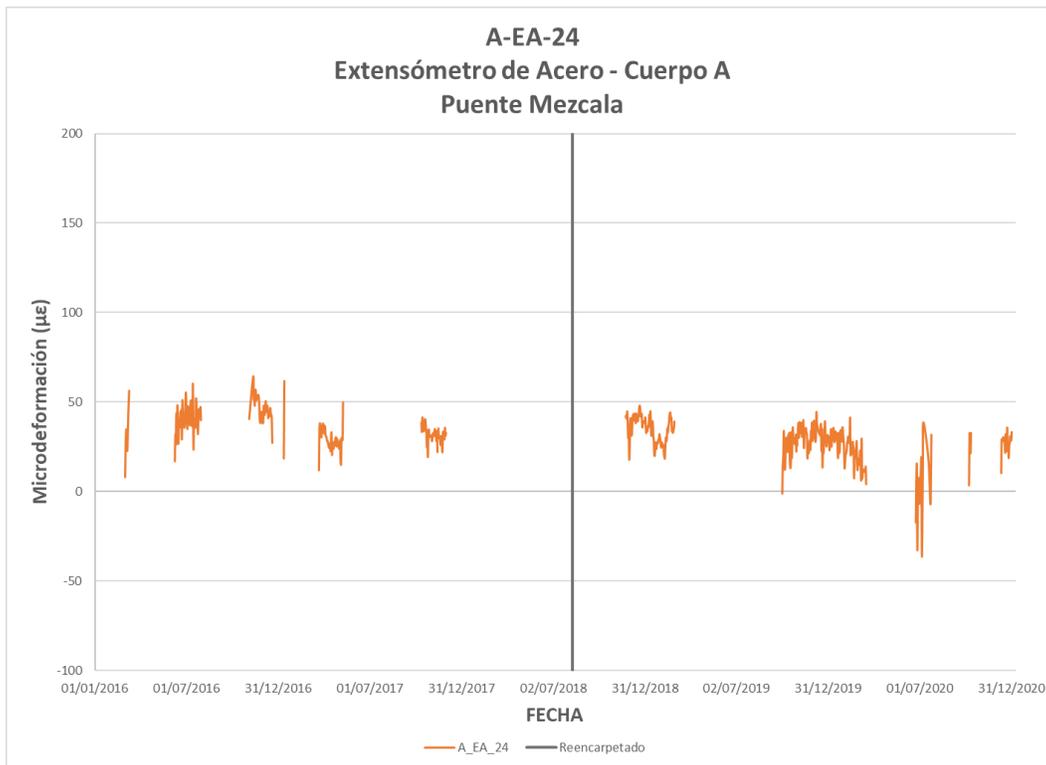


Figura 3.46 Valores de deformación del extensómetro A-EA-24

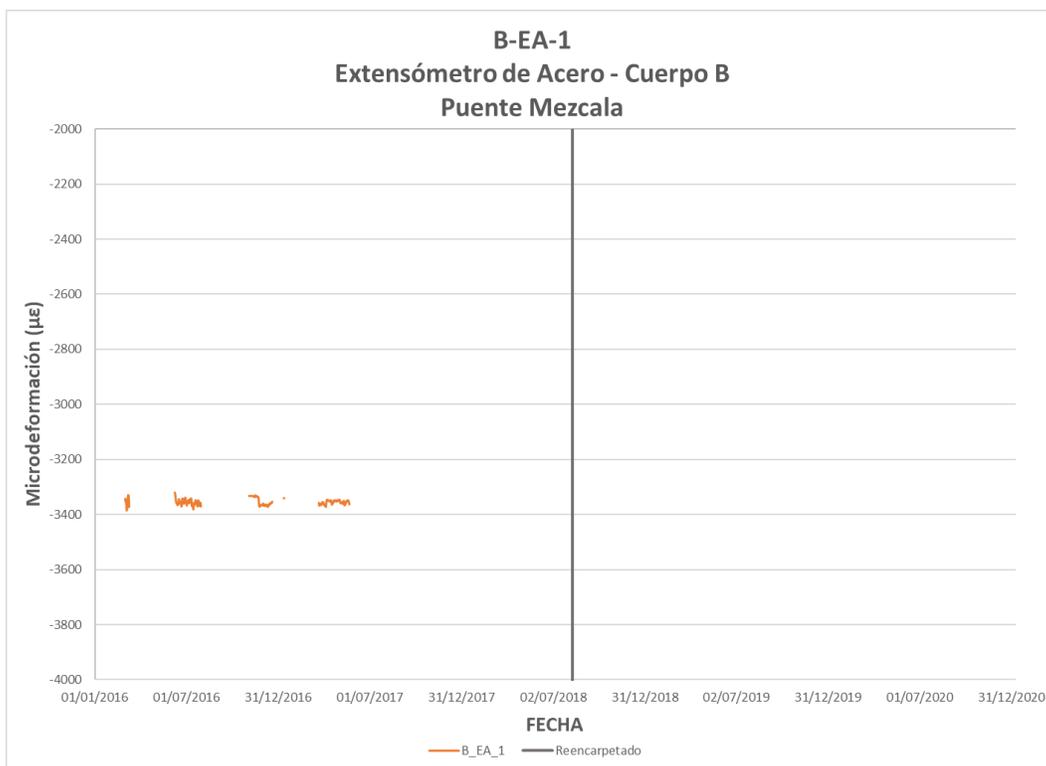


Figura 3.47 Valores de deformación del extensómetro B-EA-1

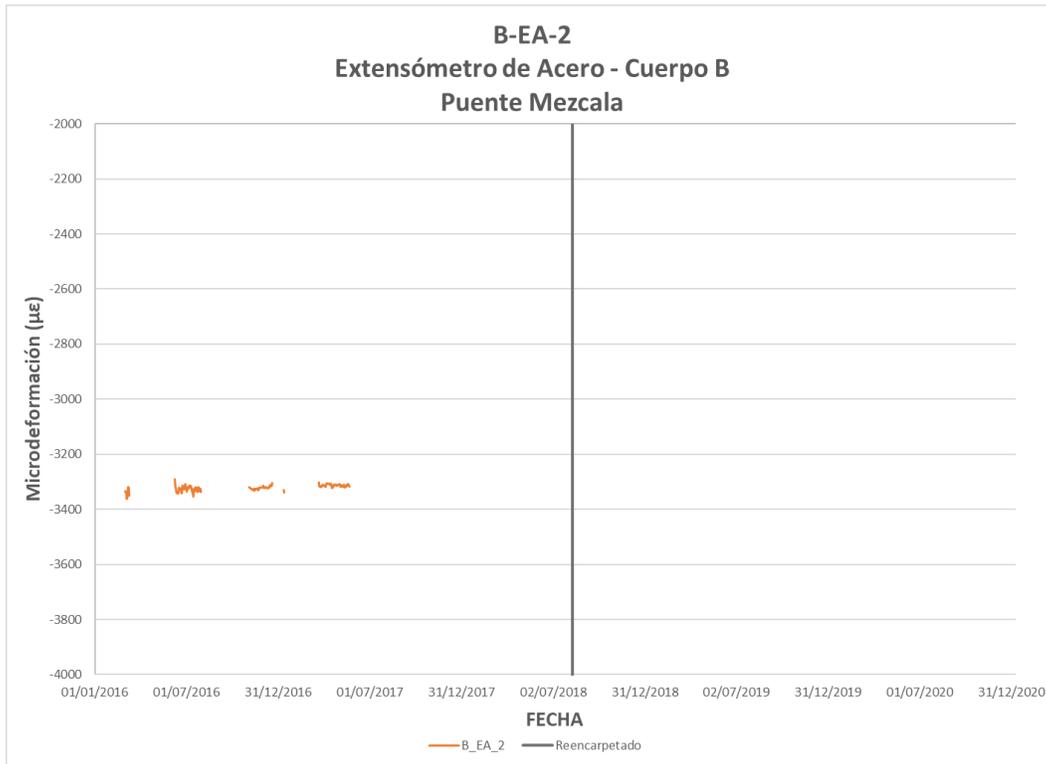


Figura 3.48 Valores de deformación del extensómetro B-EA-2

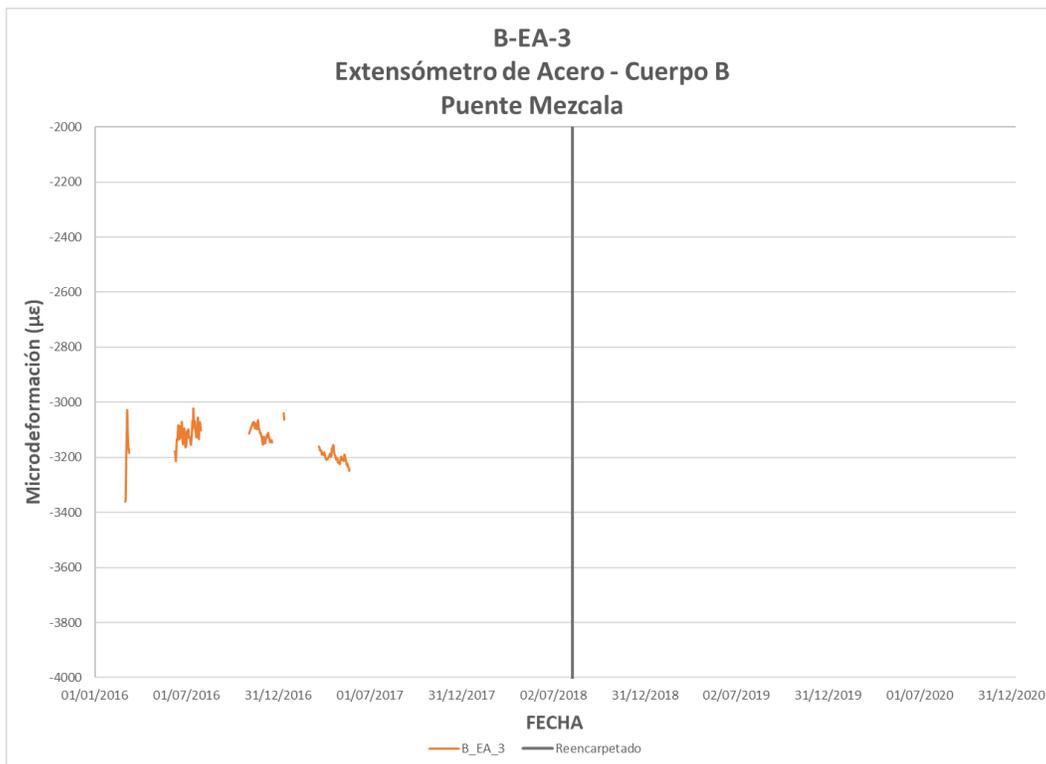


Figura 3.49 Valores de deformación del extensómetro B-EA-3

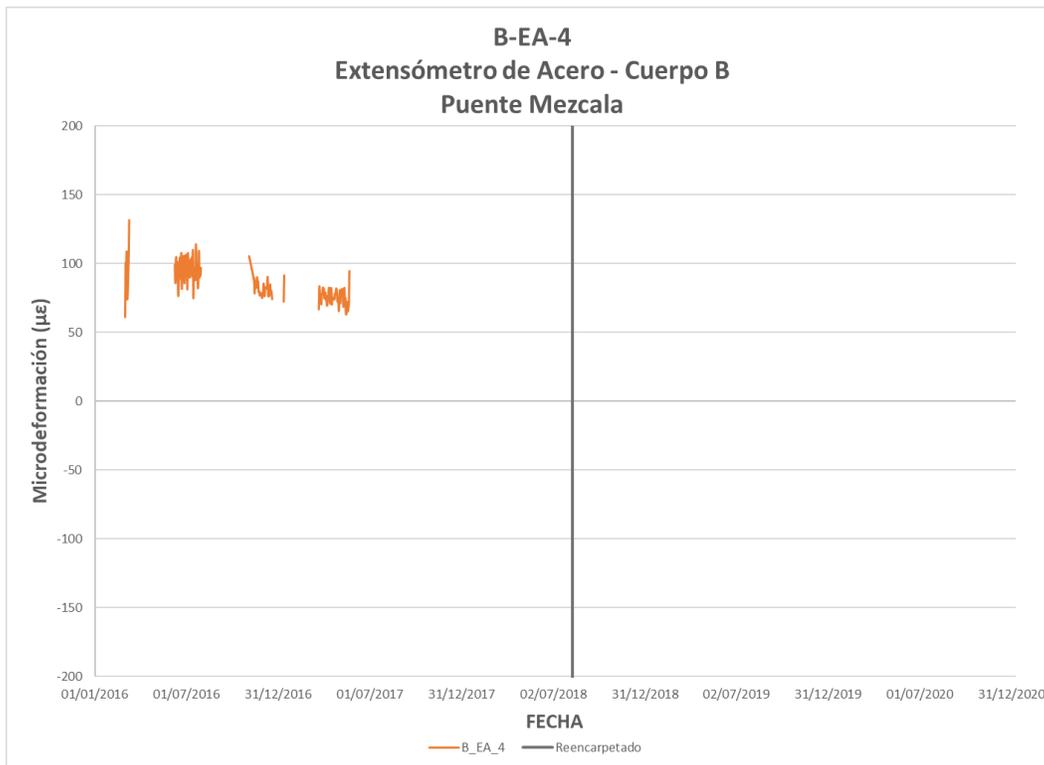


Figura 3.50 Valores de deformación del extensómetro B-EA-4

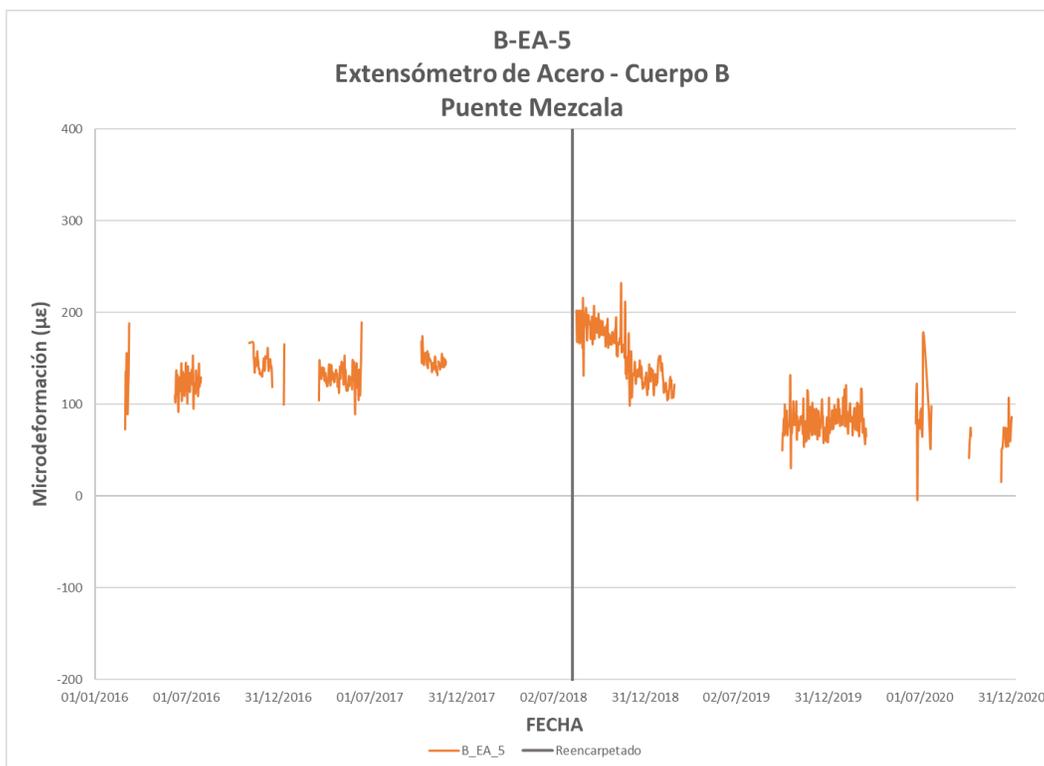


Figura 3.51 Valores de deformación del extensómetro B-EA-5

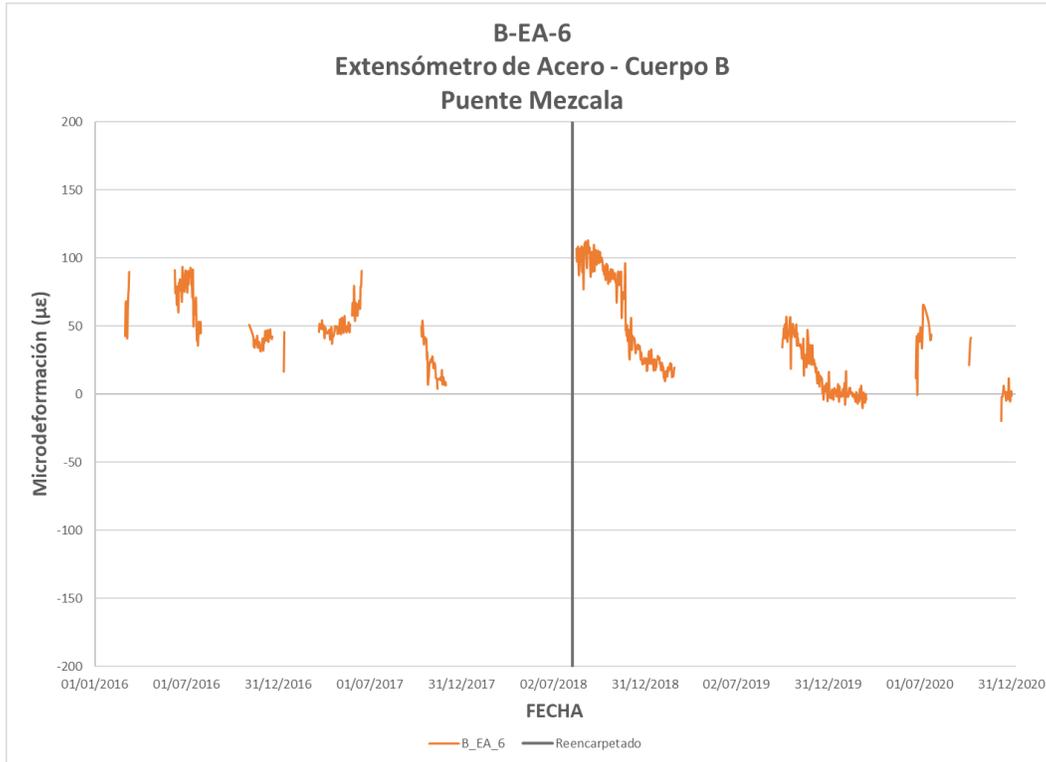


Figura 3.52 Valores de deformación del extensómetro B-EA-6



Figura 3.53 Valores de deformación del extensómetro B-EA-7

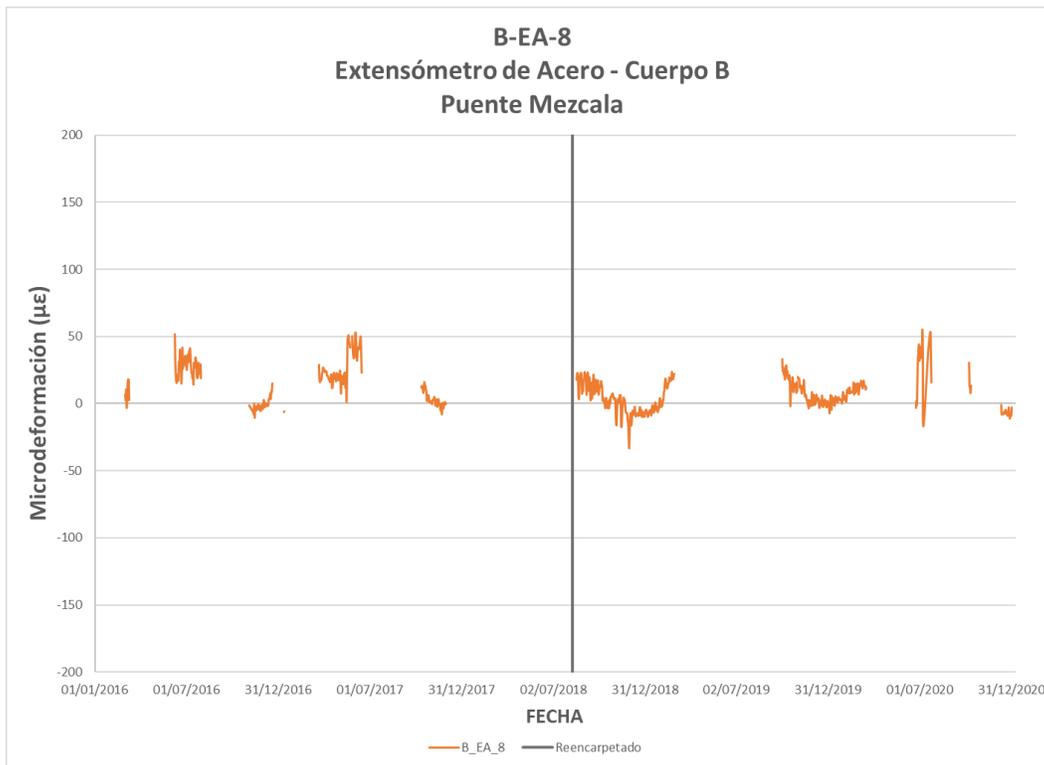


Figura 3.54 Valores de deformación del extensómetro B-EA-8

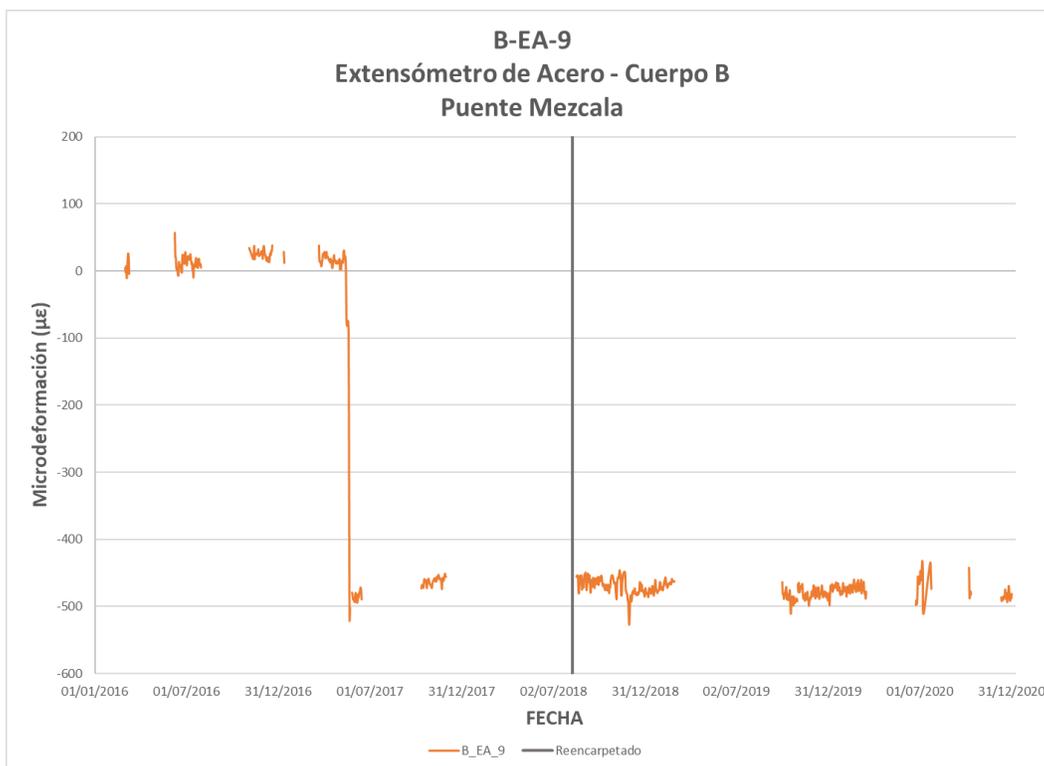


Figura 3.55 Valores de deformación del extensómetro B-EA-9

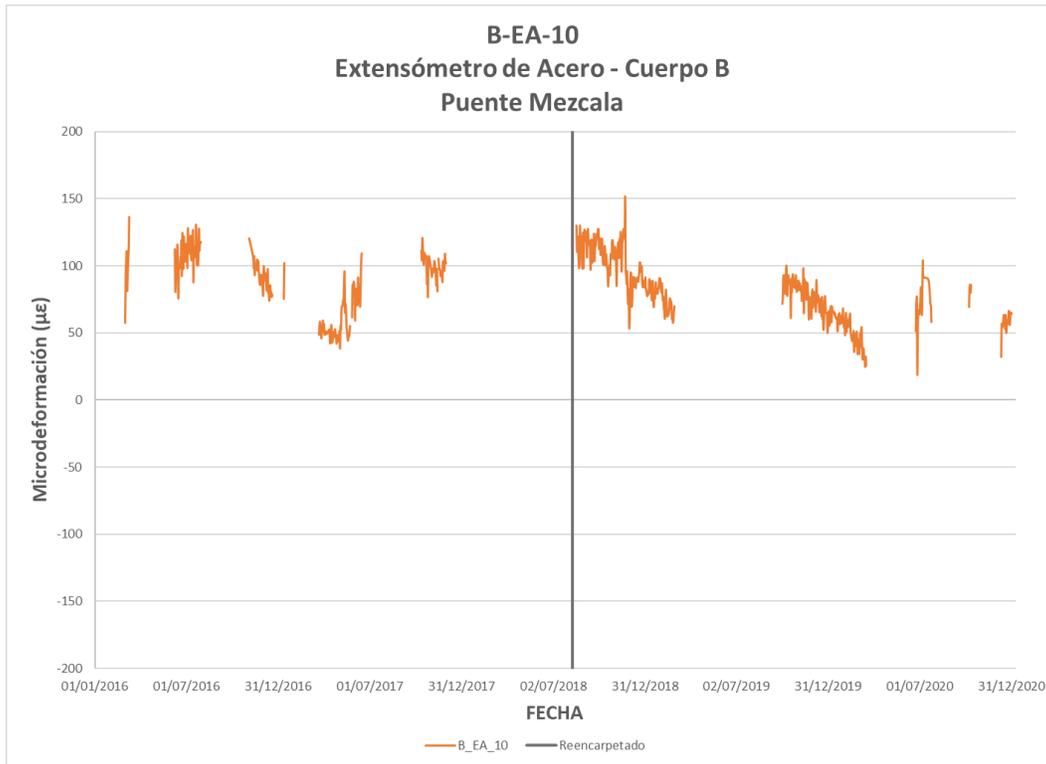


Figura 3.56 Valores de deformación del extensómetro B-EA-10

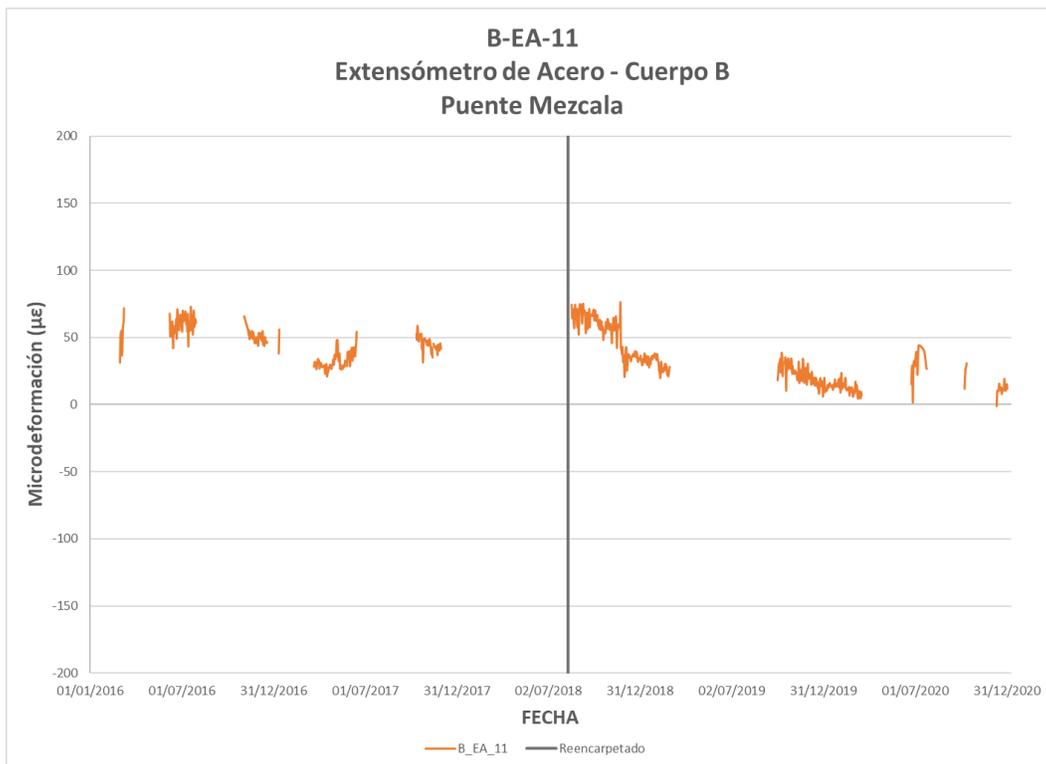


Figura 3.57 Valores de deformación del extensómetro B-EA-11

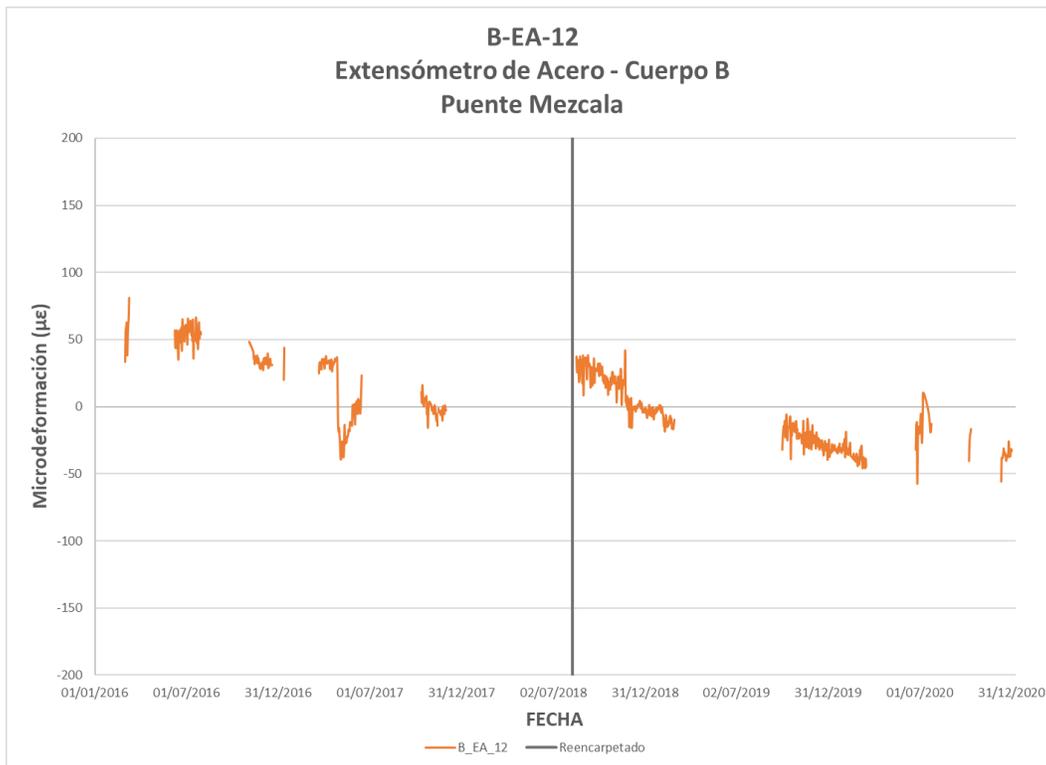


Figura 3.58 Valores de deformación del extensómetro B-EA-12

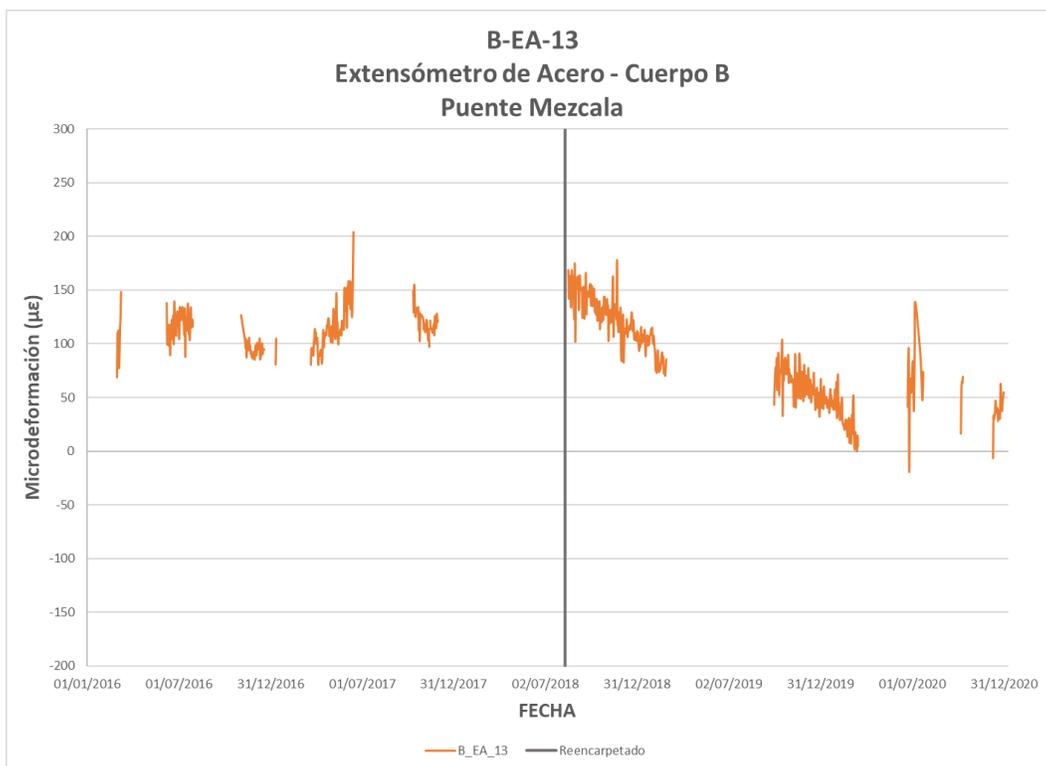


Figura 3.59 Valores de deformación del extensómetro B-EA-13

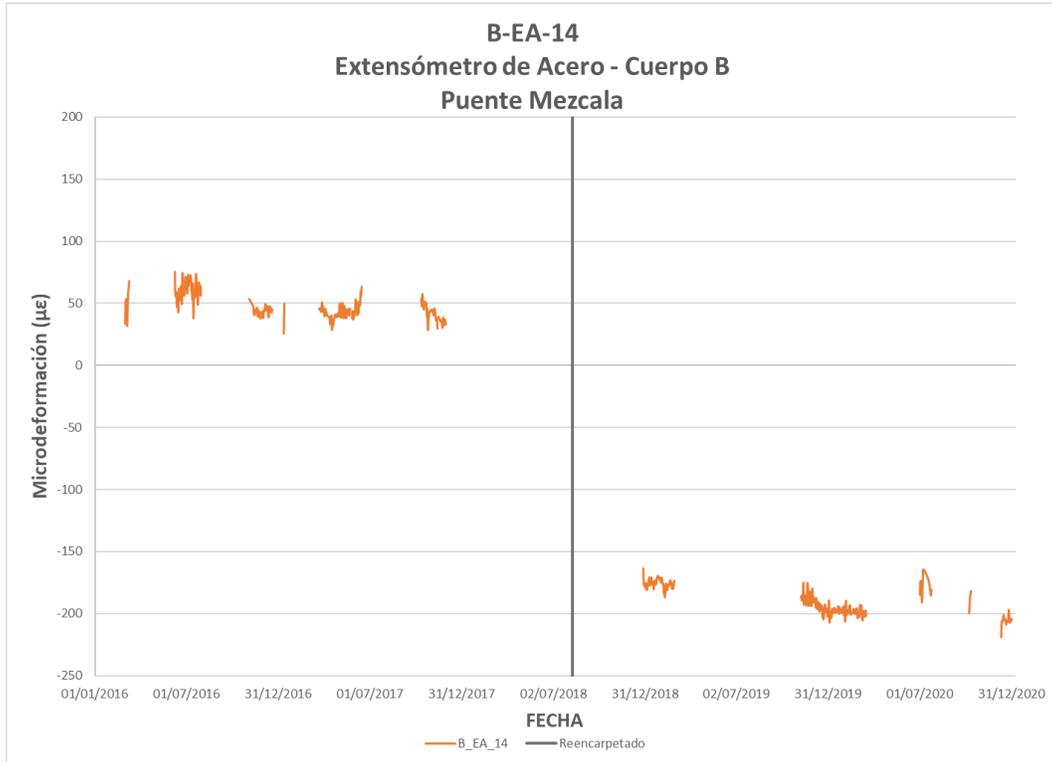


Figura 3.60 Valores de deformación del extensómetro B-EA-14

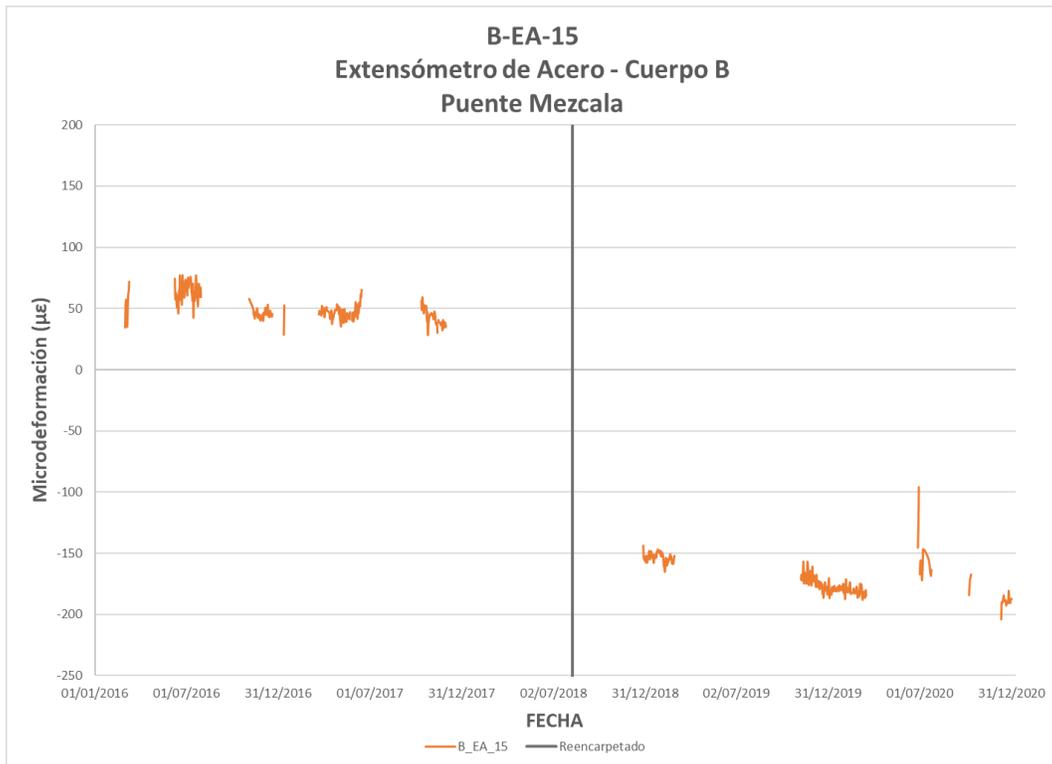


Figura 3.61 Valores de deformación del extensómetro B-EA-15

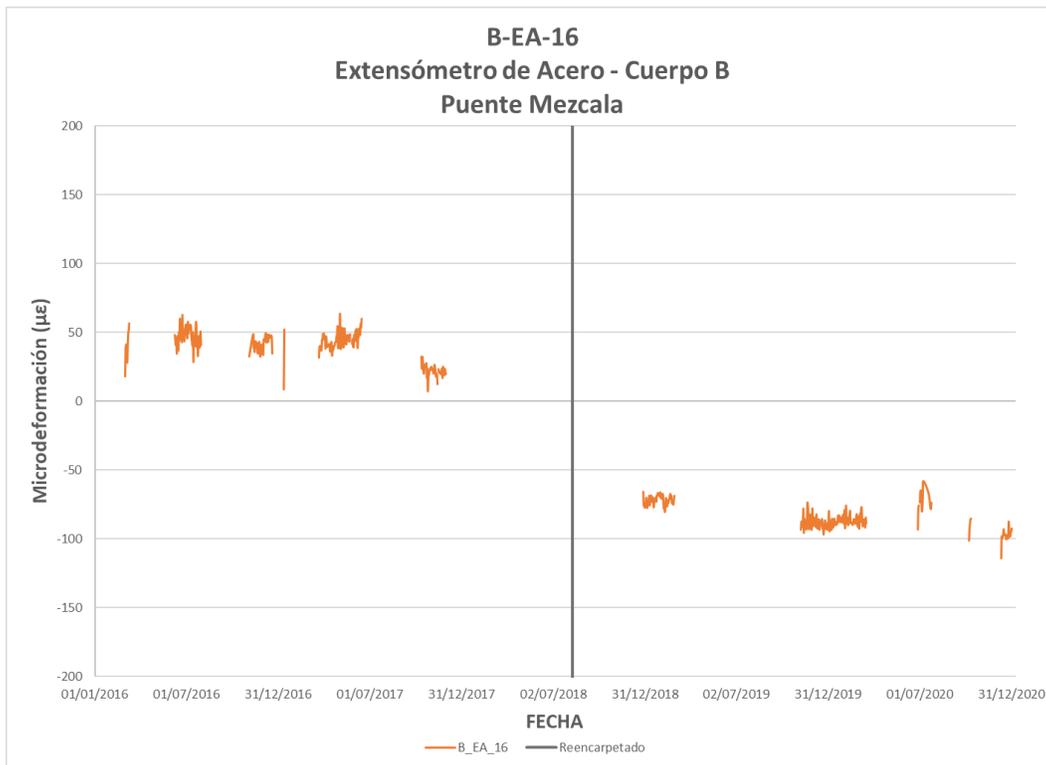


Figura 3.62 Valores de deformación del extensómetro B-EA-16

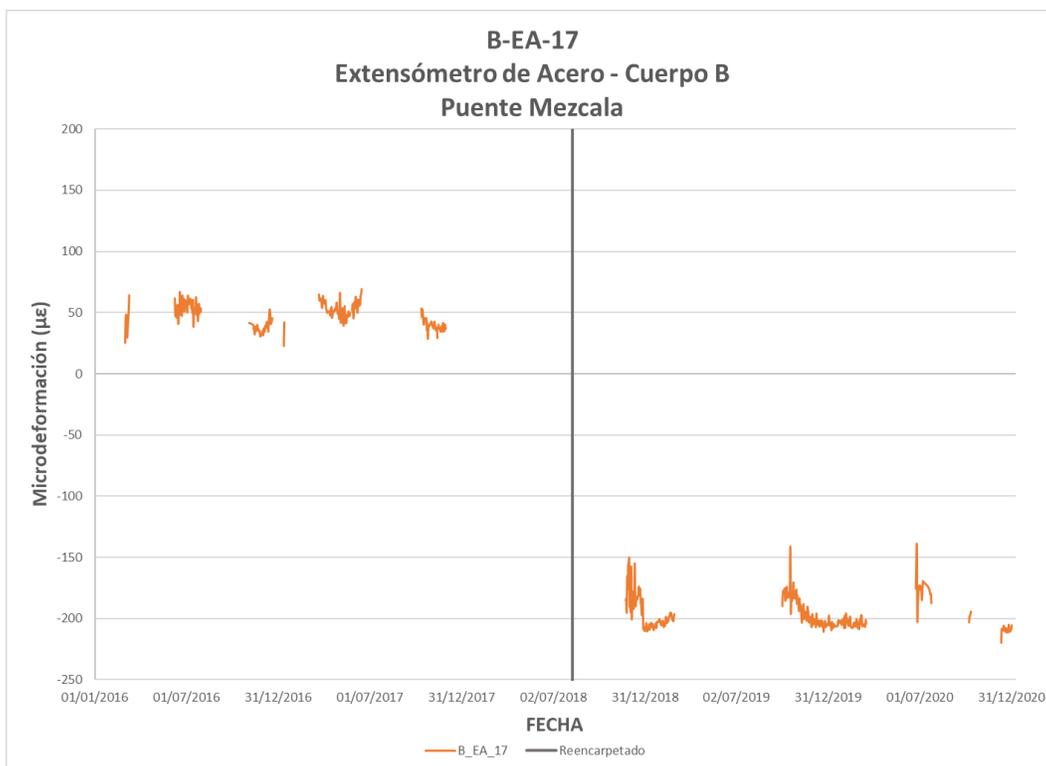


Figura 3.63 Valores de deformación del extensómetro B-EA-17

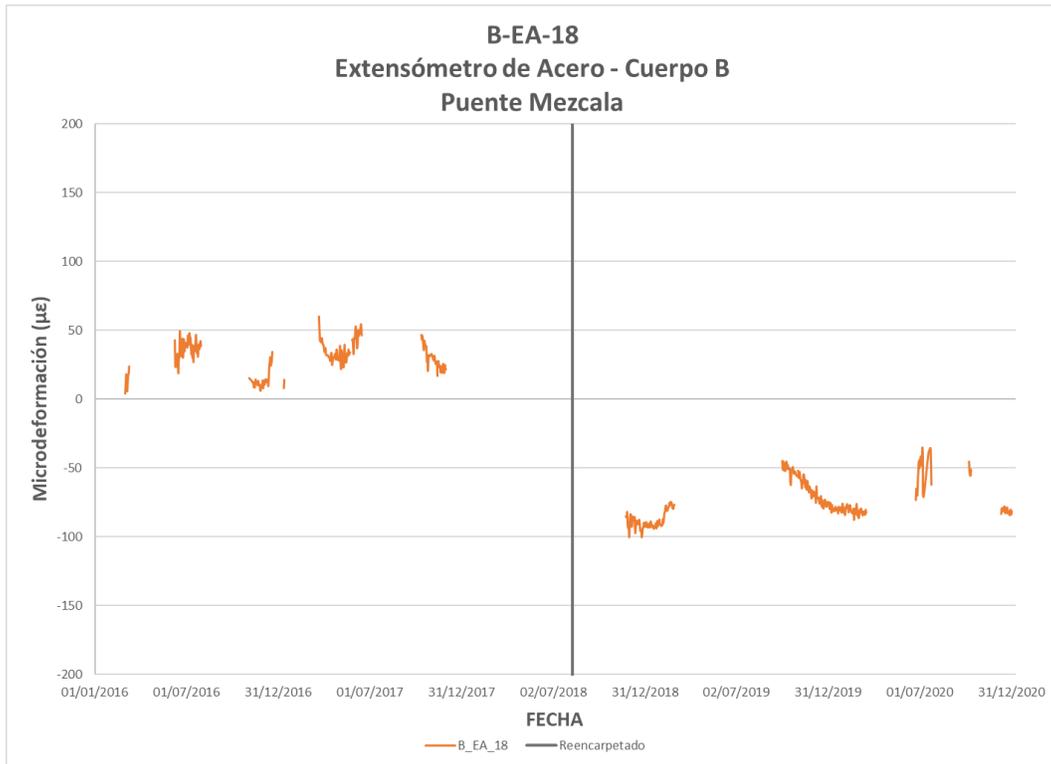


Figura 3.64 Valores de deformación del extensómetro B-EA-18

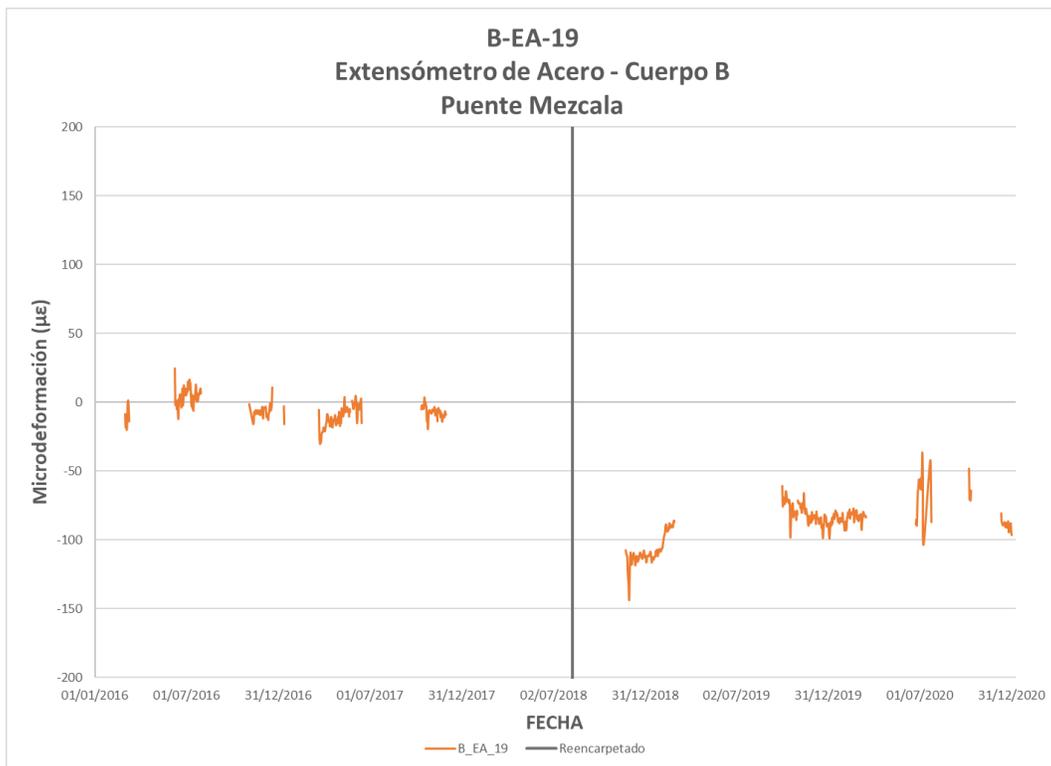


Figura 3.65 Valores de deformación del extensómetro B-EA-19

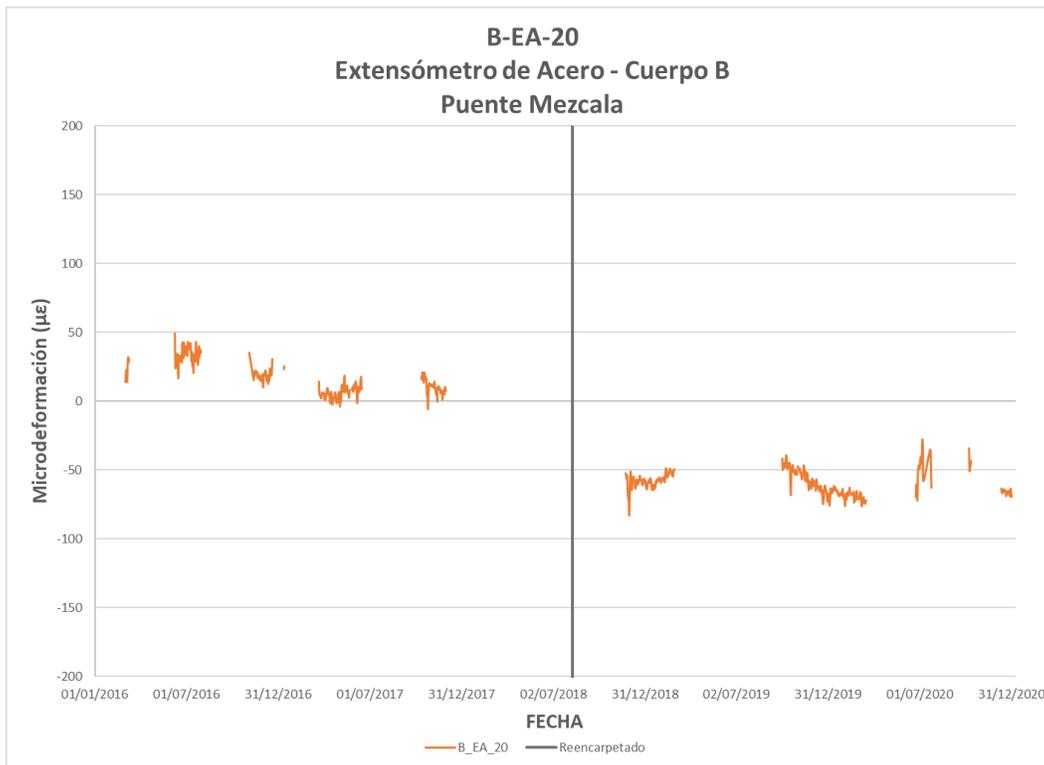


Figura 3.66 Valores de deformación del extensómetro B-EA-20

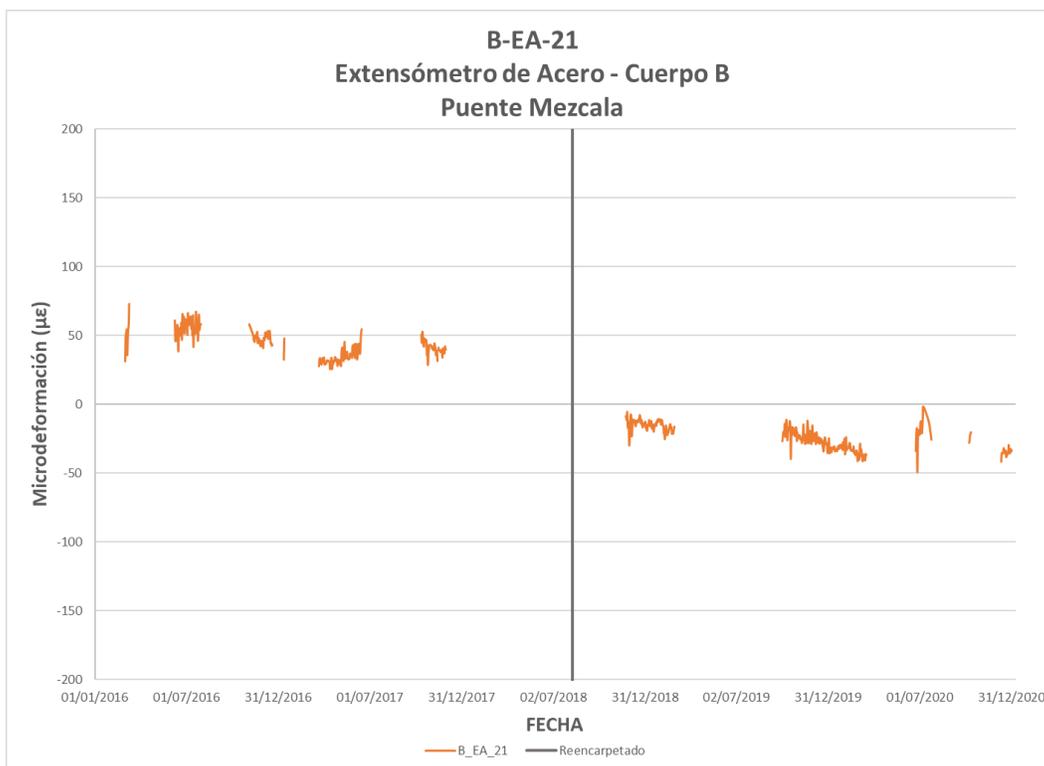


Figura 3.67 Valores de deformación del extensómetro B-EA-21



Figura 3.68 Valores de deformación del extensómetro B-EA-22

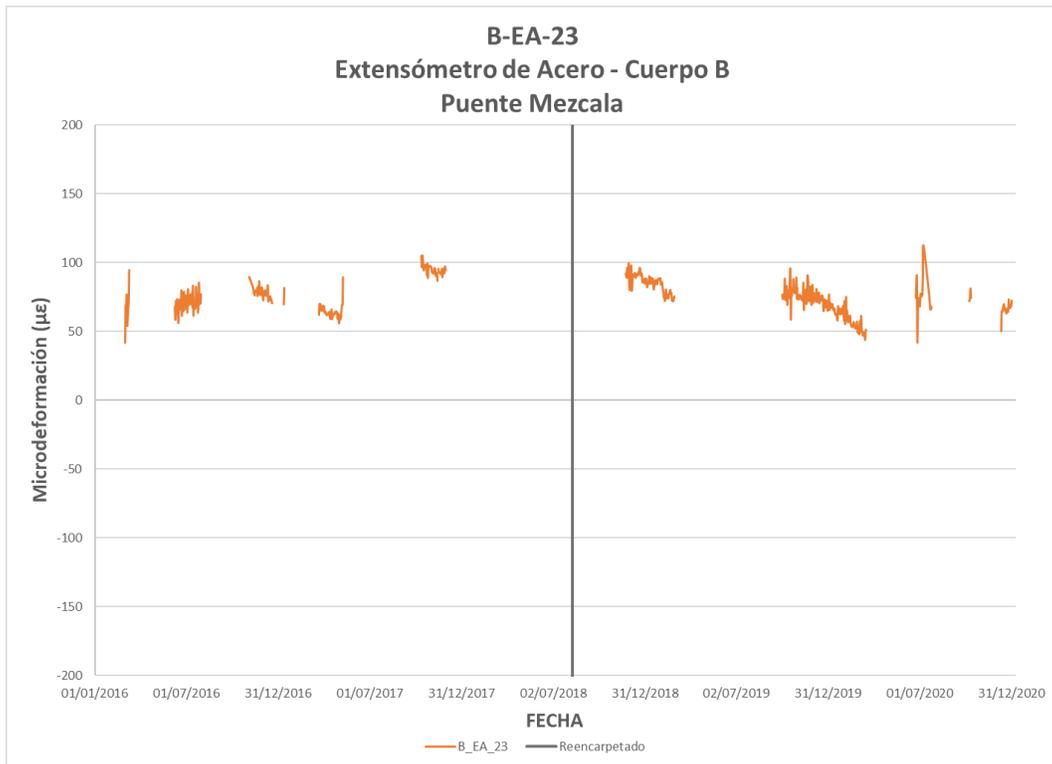


Figura 3.69 Valores de deformación del extensómetro B-EA-23

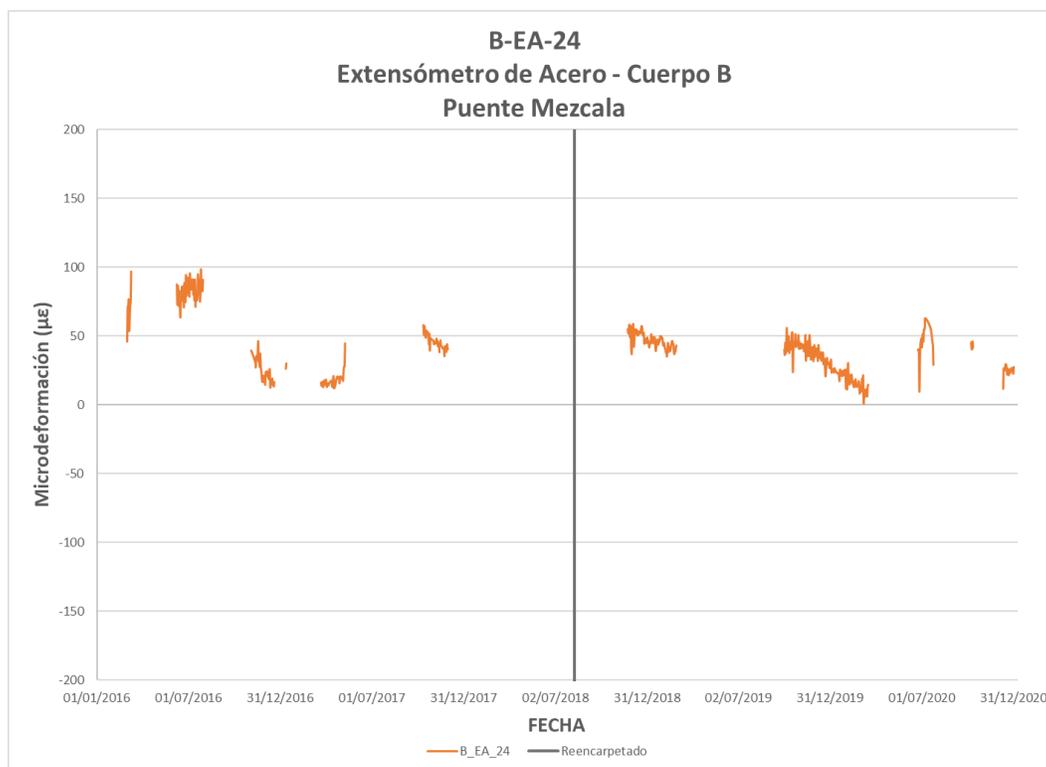


Figura 3.70 Valores de deformación del extensómetro B-EA-24

De la información del comportamiento de los sensores de deformación durante el año 2020, no se observan cambios significativos en su línea de referencia excepto por los sensores B-EA-9 y B-EA-19 que se ubican al centro del claro que comprenden las semi-arpas 10-11 y 8-9 respectivamente, por lo que es necesario inspeccionar la zona del puente y/o los sensores para determinar la razón de este cambio de deformación. En cuanto a la información del resto de sensores se puede concluir que el comportamiento estructural el puente es el esperado bajo condiciones de operación normal,

Por otra parte, en las figuras 3.71 a 3.80 se muestran la media de deformación de los extensómetros ubicados en las torres del puente.



Figura 3.71 Valores de deformación del extensómetro A-T3-EC-1

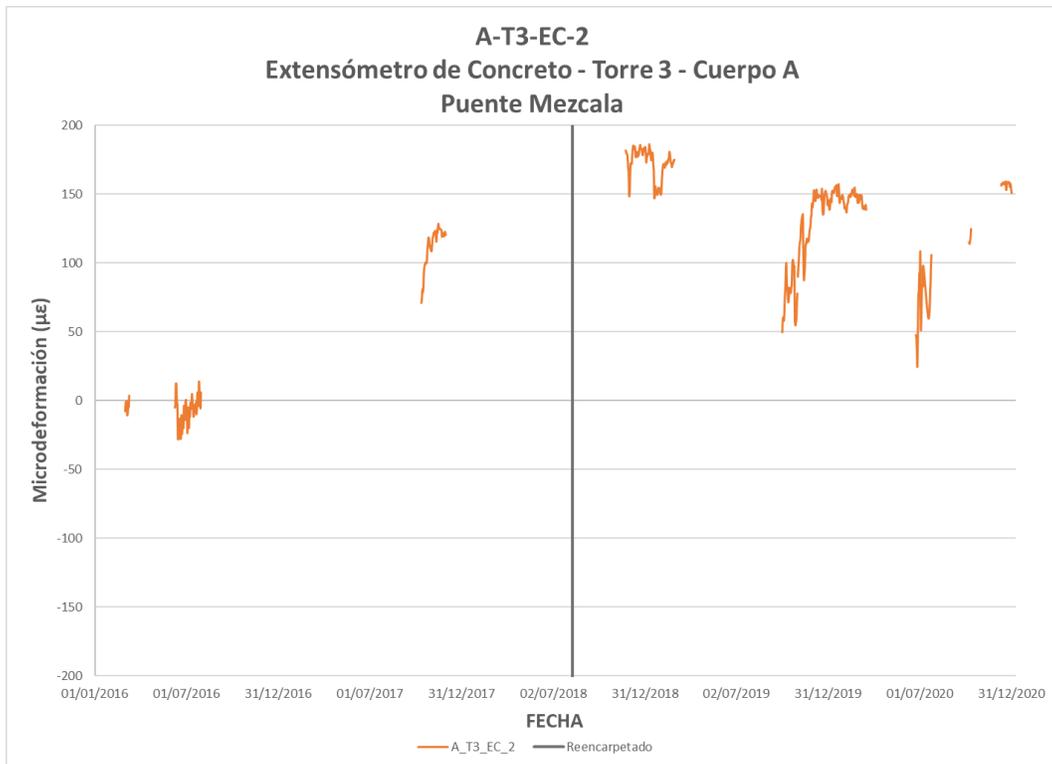


Figura 3.72 Valores de deformación del extensómetro A-T3-EC-2

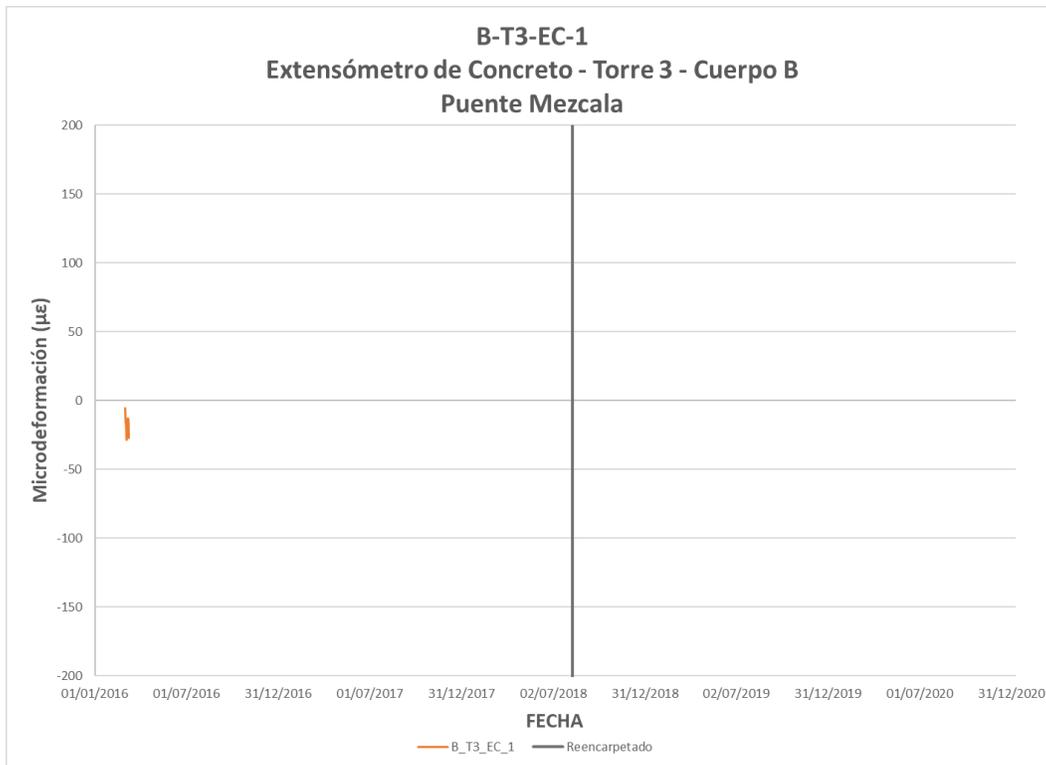


Figura 3.73 Valores de deformación del extensómetro B-T3-EC-1



Figura 3.74 Valores de deformación del extensómetro B-T3-EC-2

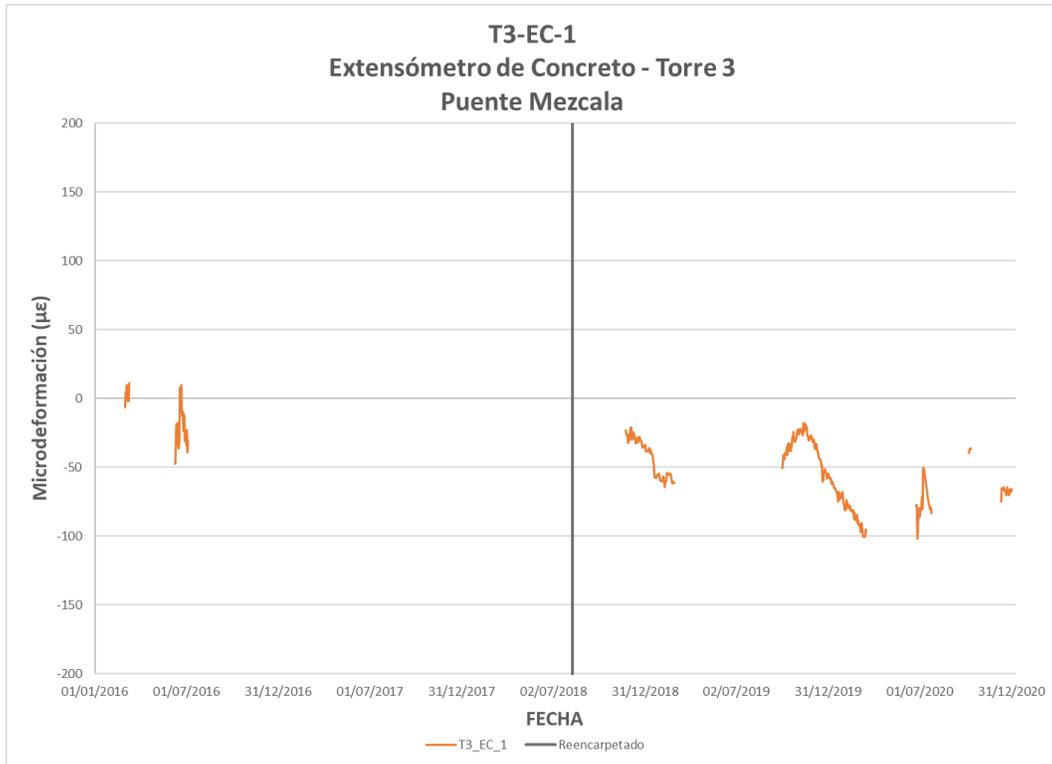


Figura 3.75 Valores de deformación del extensómetro T3-EC-1

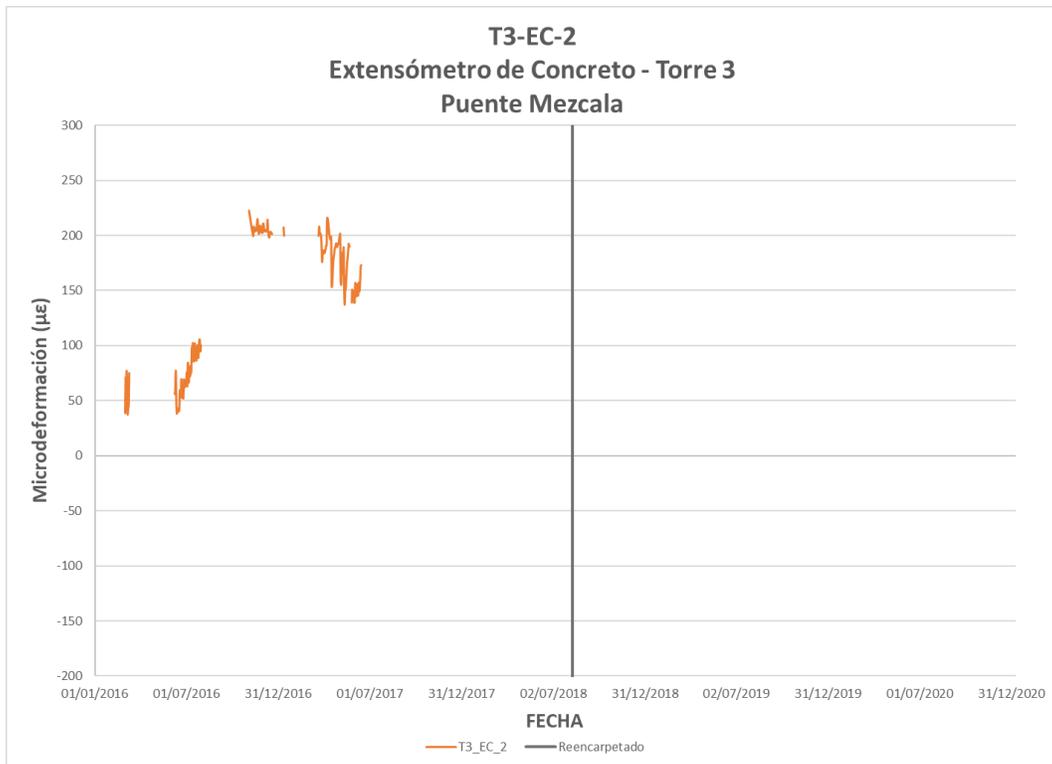


Figura 3.76 Valores de deformación del extensómetro T3-EC-2

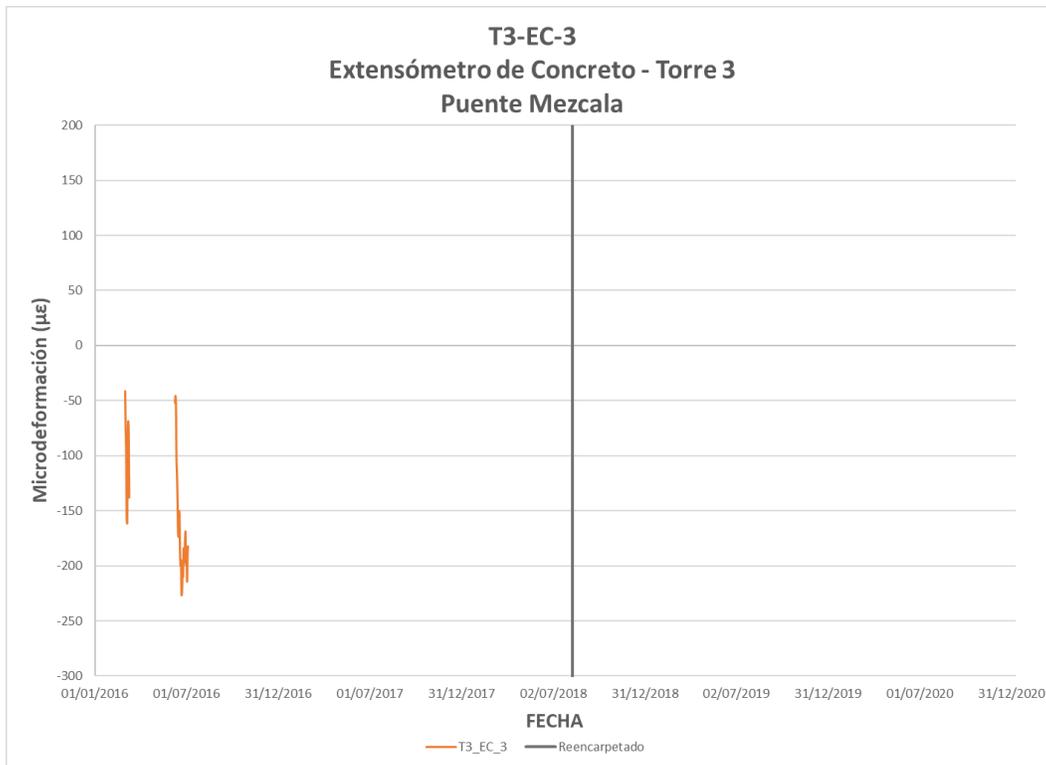


Figura 3.77 Valores de deformación del extensómetro T3-EC-3

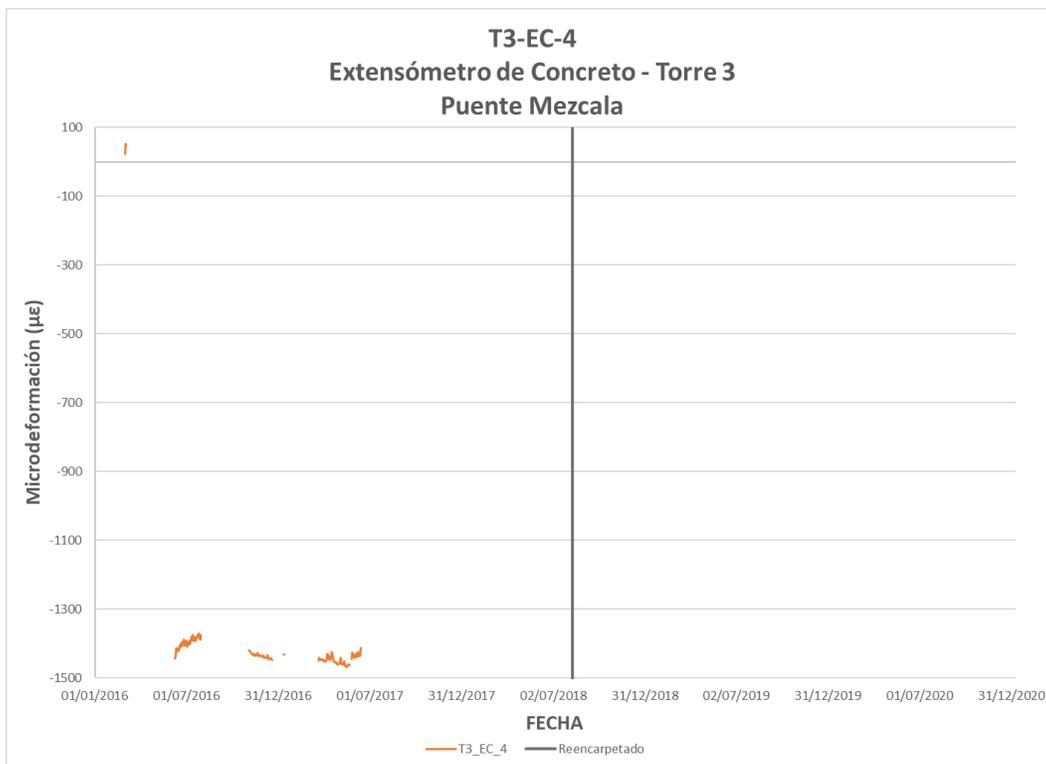


Figura 3.78 Valores de deformación del extensómetro T3-EC-4

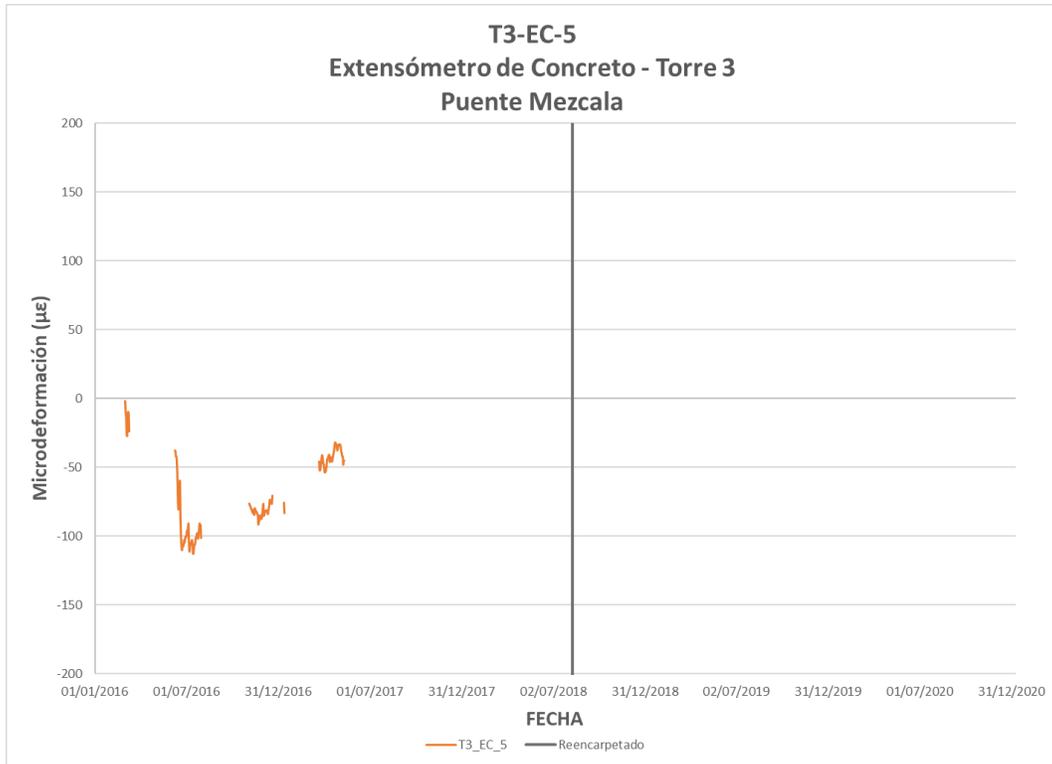


Figura 3.79 Valores de deformación del extensómetro T3-EC-5

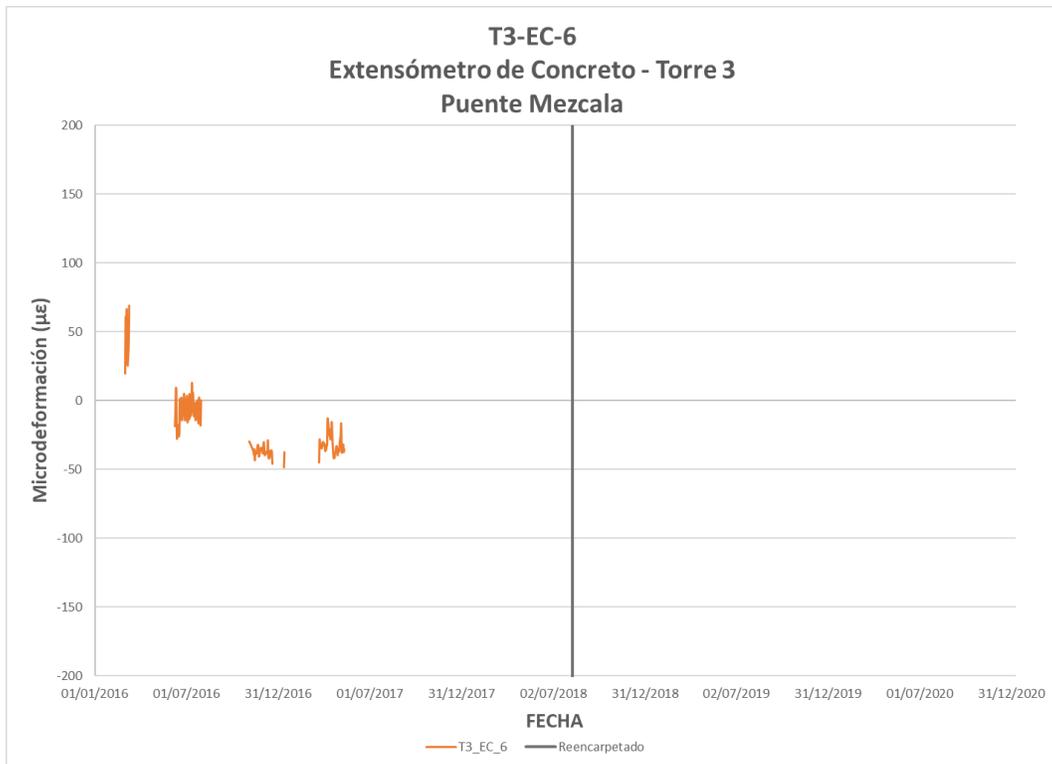


Figura 3.80 Valores de deformación del extensómetro T3-EC-6

Las figuras 3.81 a 3.96 muestran la información de los inclinómetros instalados en el puente Mezcala.

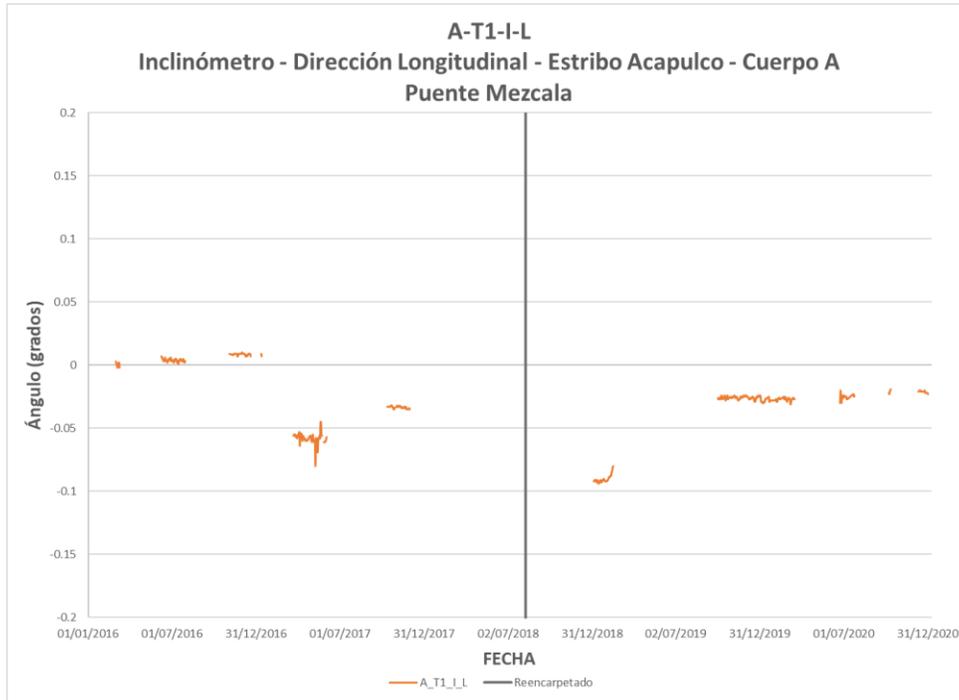


Figura 3.81 Valores de inclinación del sensor A-T1-I-L

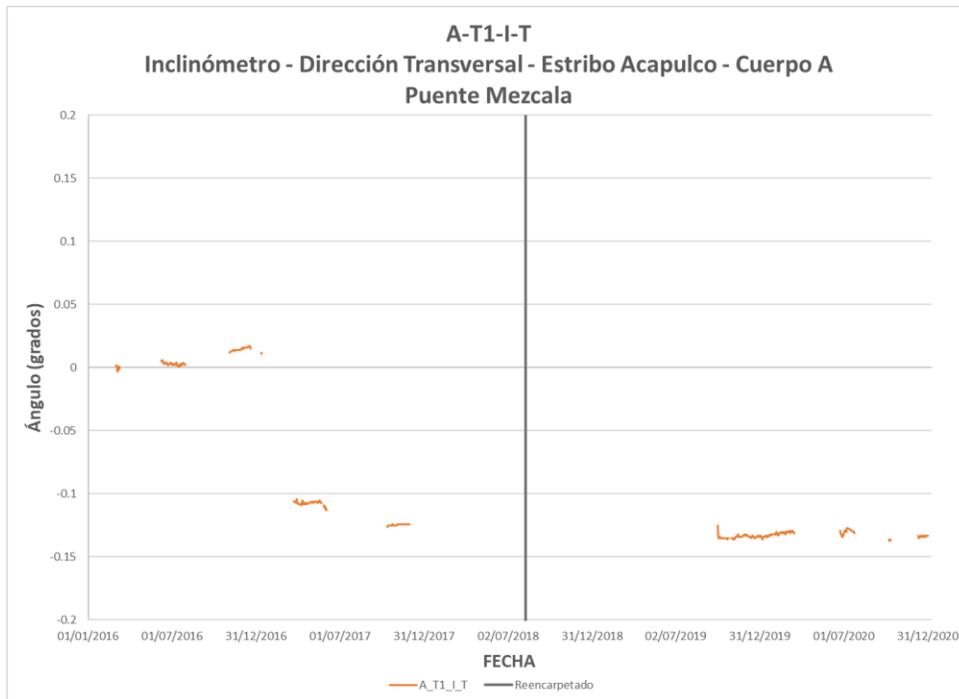


Figura 3.82 Valores de inclinación del sensor A-T1-I-T

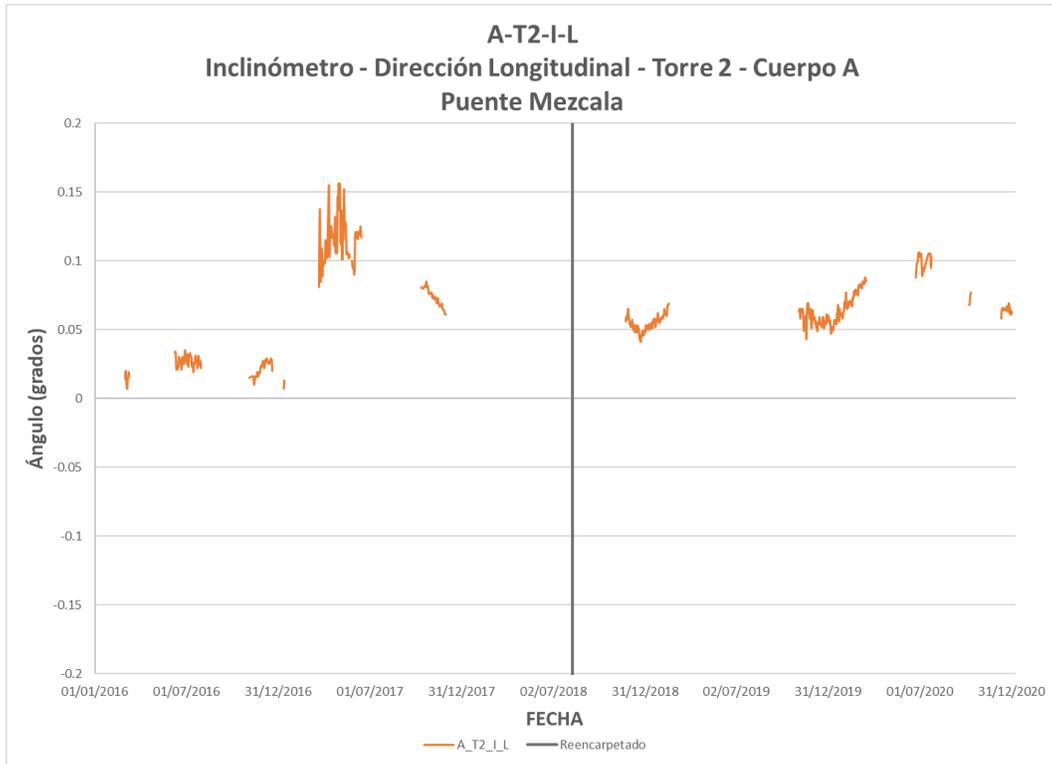


Figura 3.83 Valores de inclinación del sensor A-T2-I-L

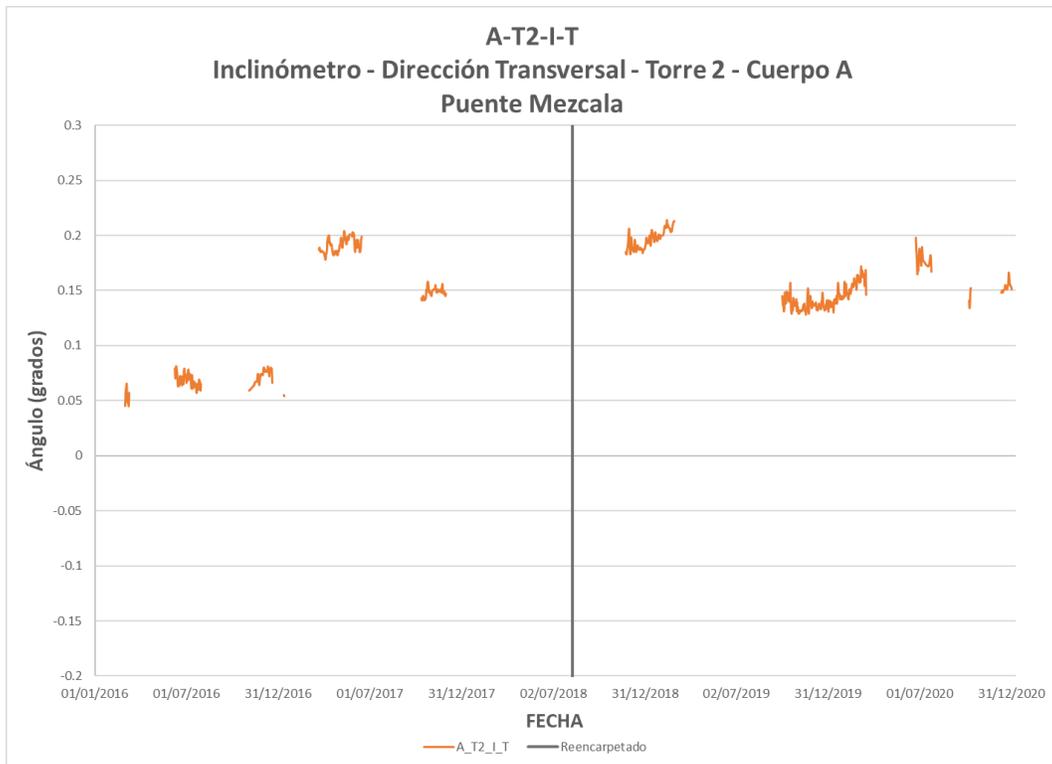


Figura 3.84 Valores de inclinación del sensor A-T2-I-T

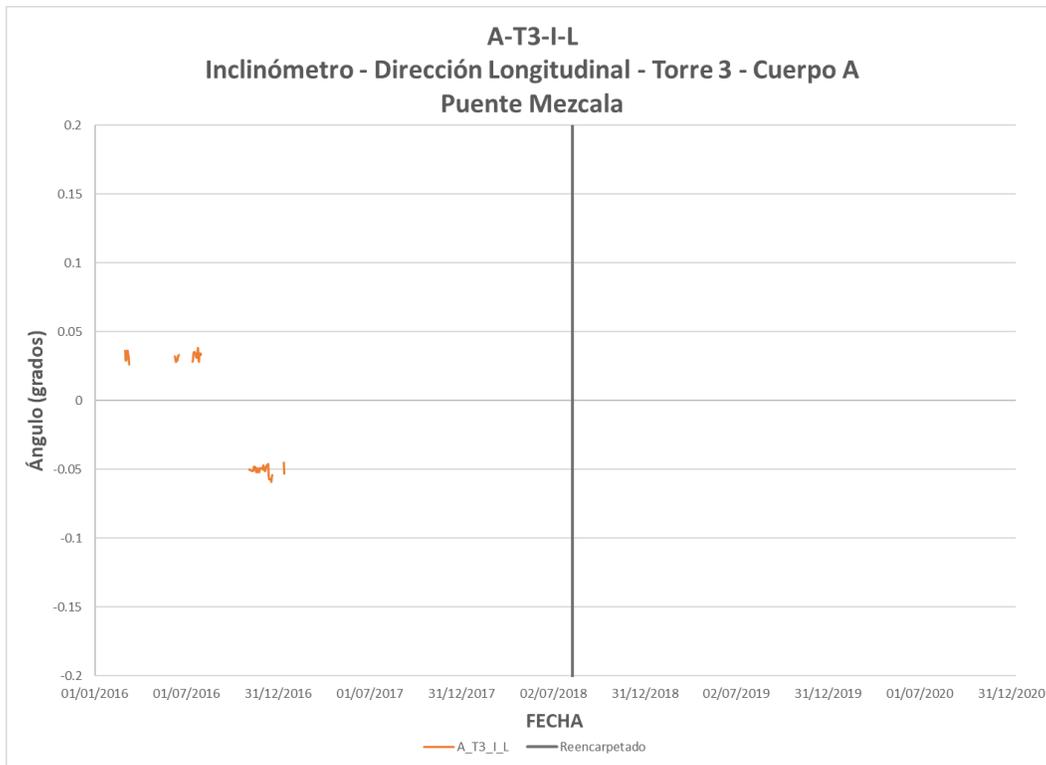


Figura 3.85 Valores de inclinación del sensor A-T3-I-L

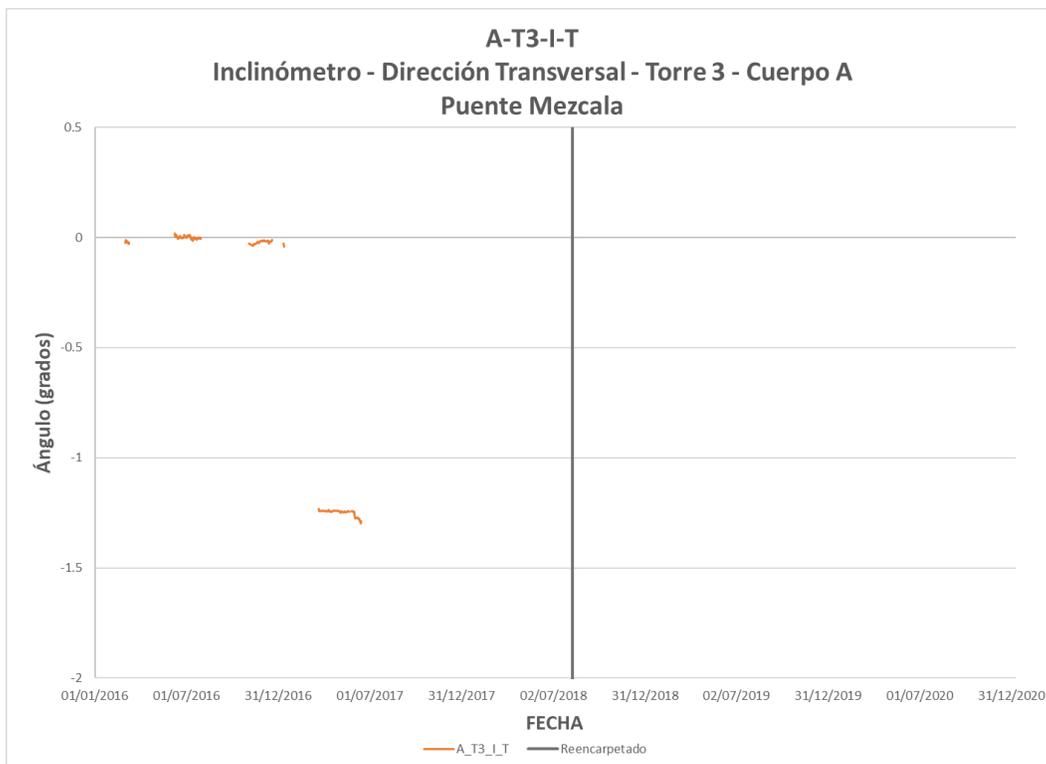


Figura 3.86 Valores de inclinación del sensor A-T3-I-T

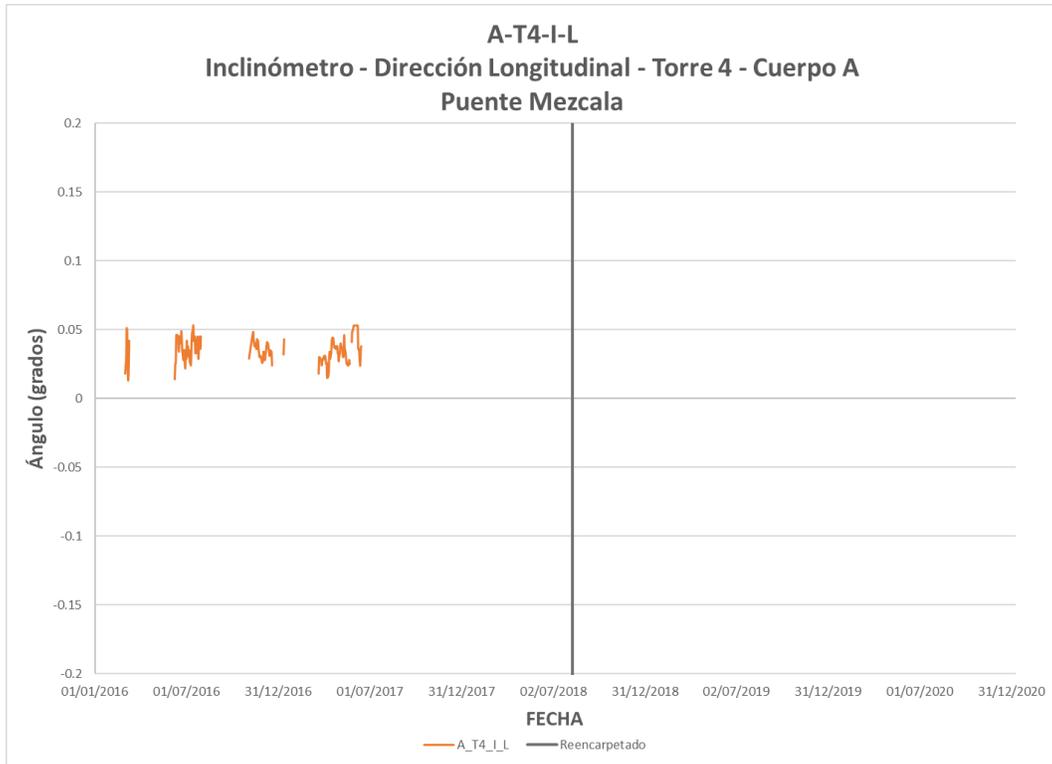


Figura 3.87 Valores de inclinación del sensor A-T4-I-L

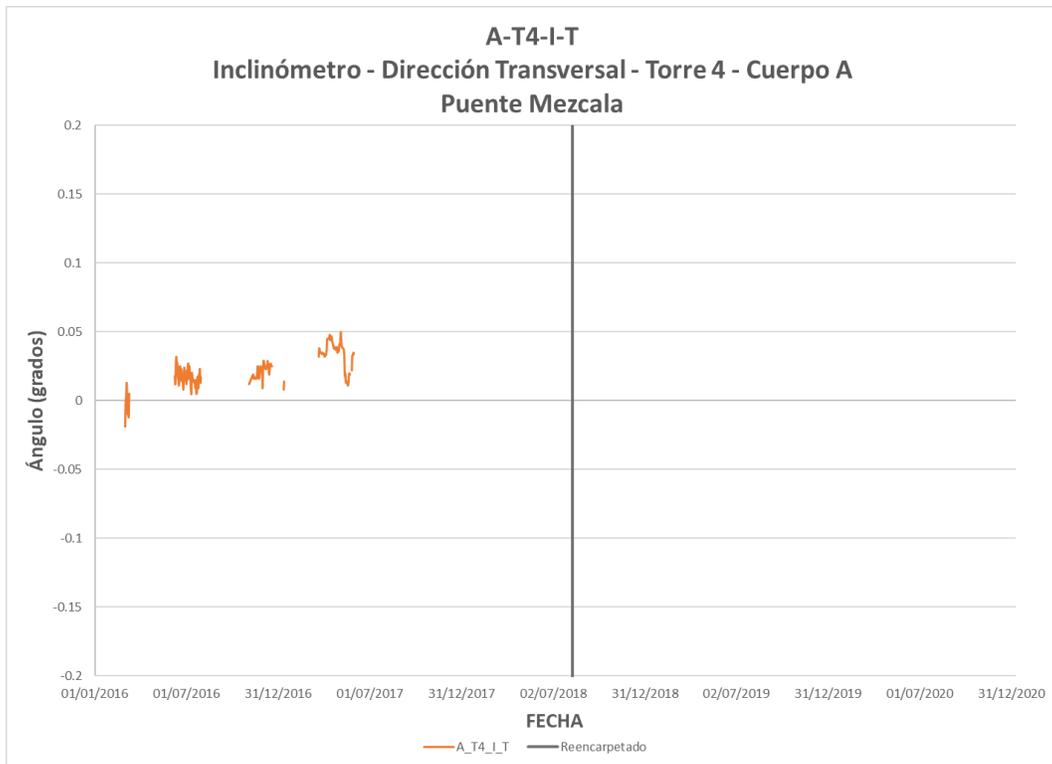


Figura 3.88 Valores de inclinación del sensor A-T4-I-T

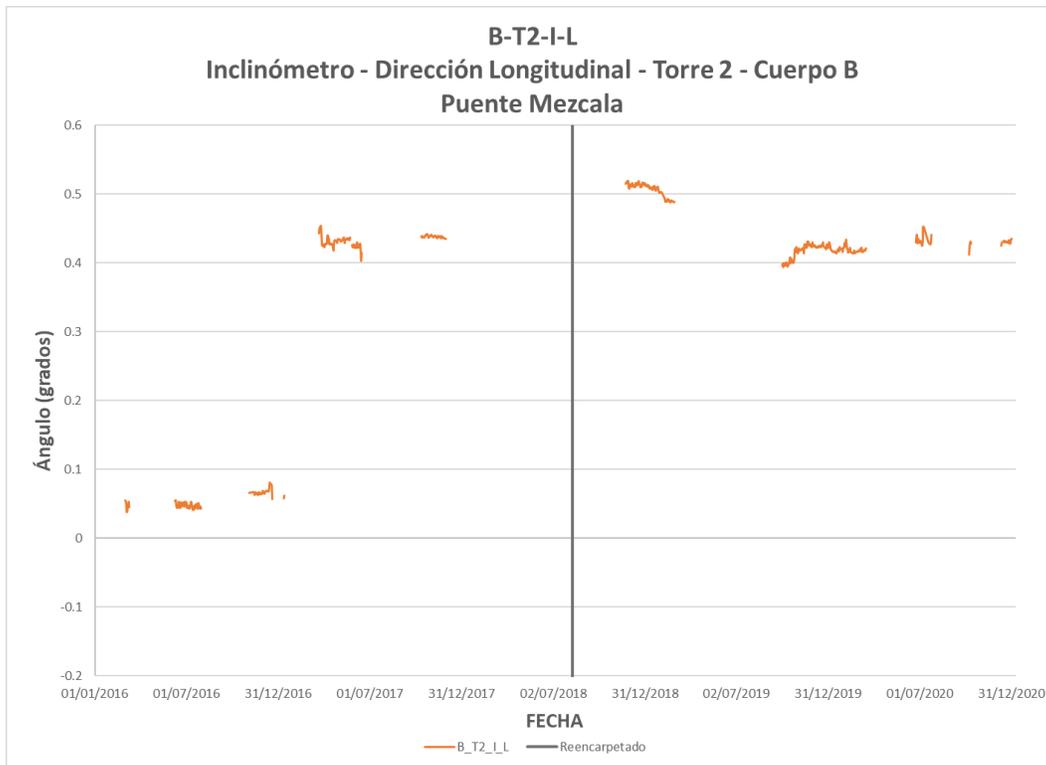


Figura 3.89 Valores de inclinación del sensor B-T2-I-L

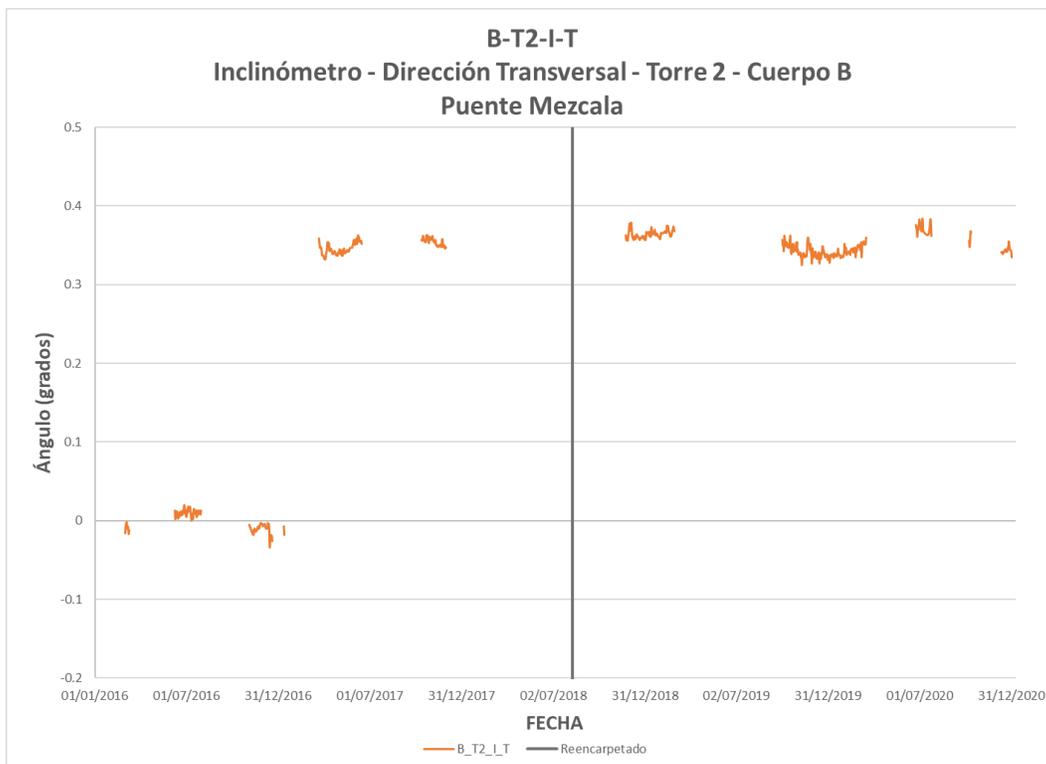


Figura 3.90 Valores de inclinación del sensor B-T2-I-T

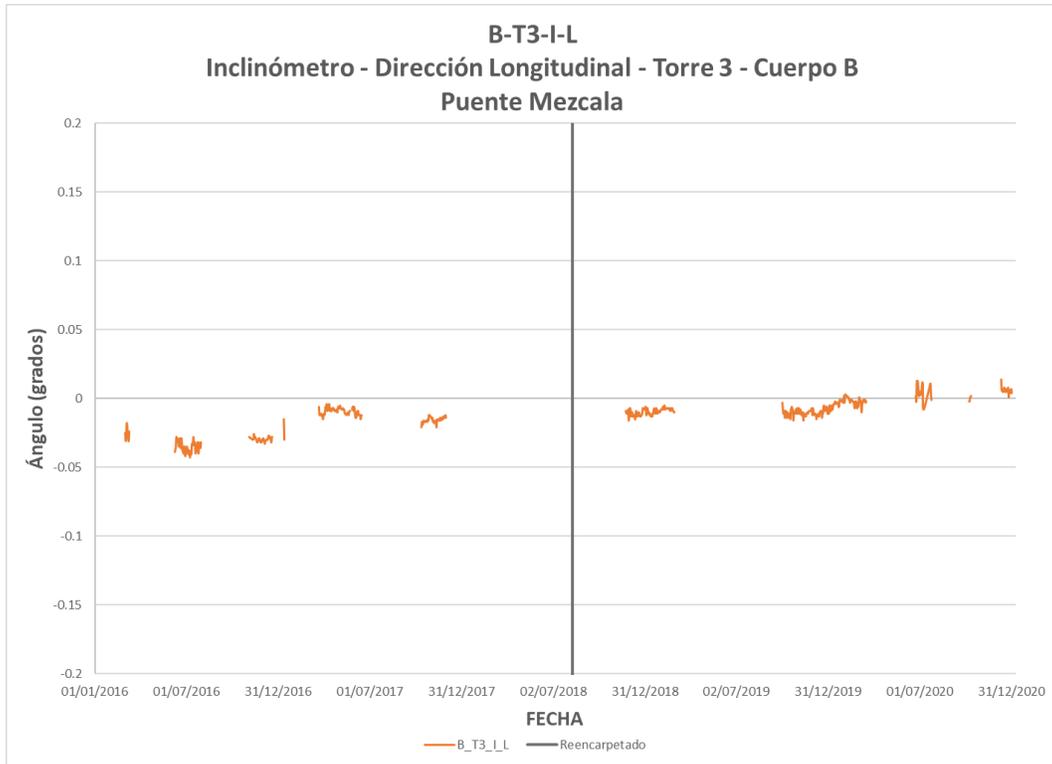


Figura 3.91 Valores de inclinación del sensor B-T3-I-L

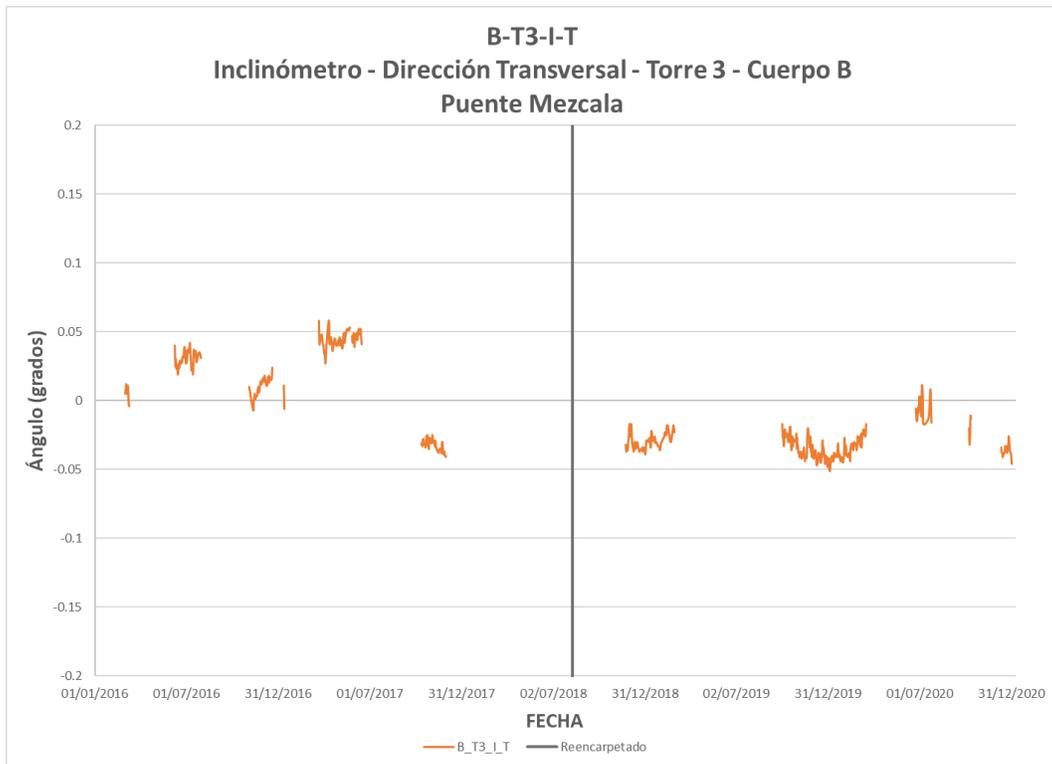


Figura 3.92 Valores de inclinación del sensor B-T3-I-T

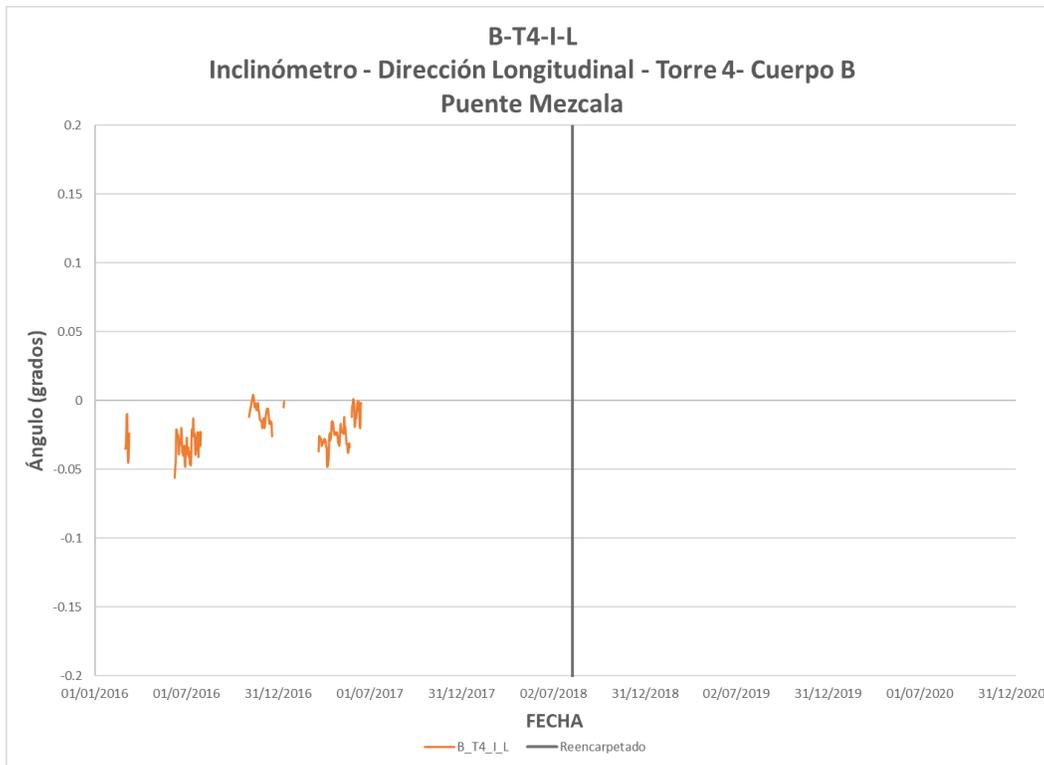


Figura 3.93 Valores de inclinación del sensor B-T4-I-L

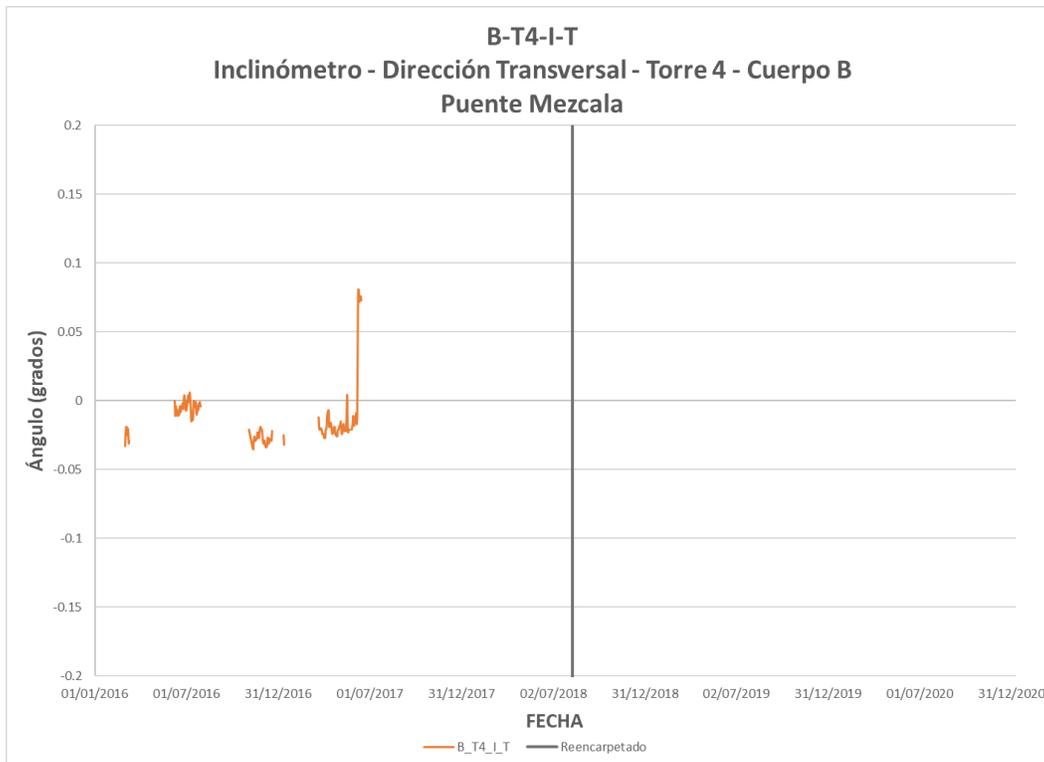


Figura 3.94 Valores de inclinación del sensor B-T4-I-T

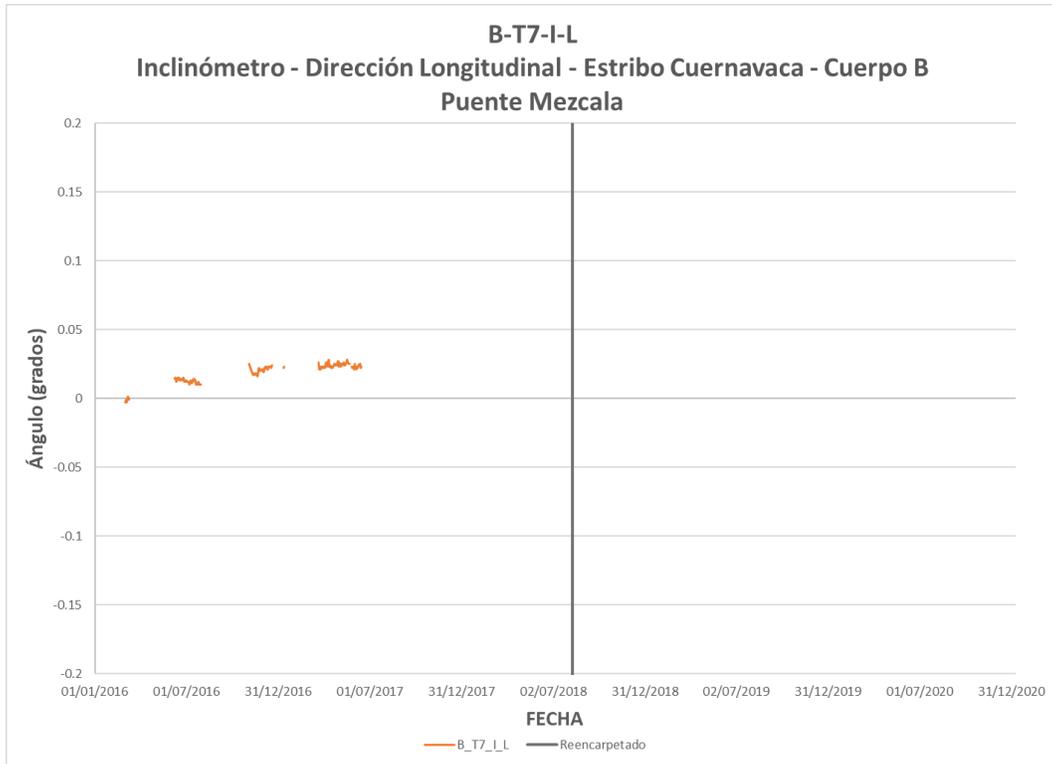


Figura 3.95 Valores de inclinación del sensor B-T7-I-L

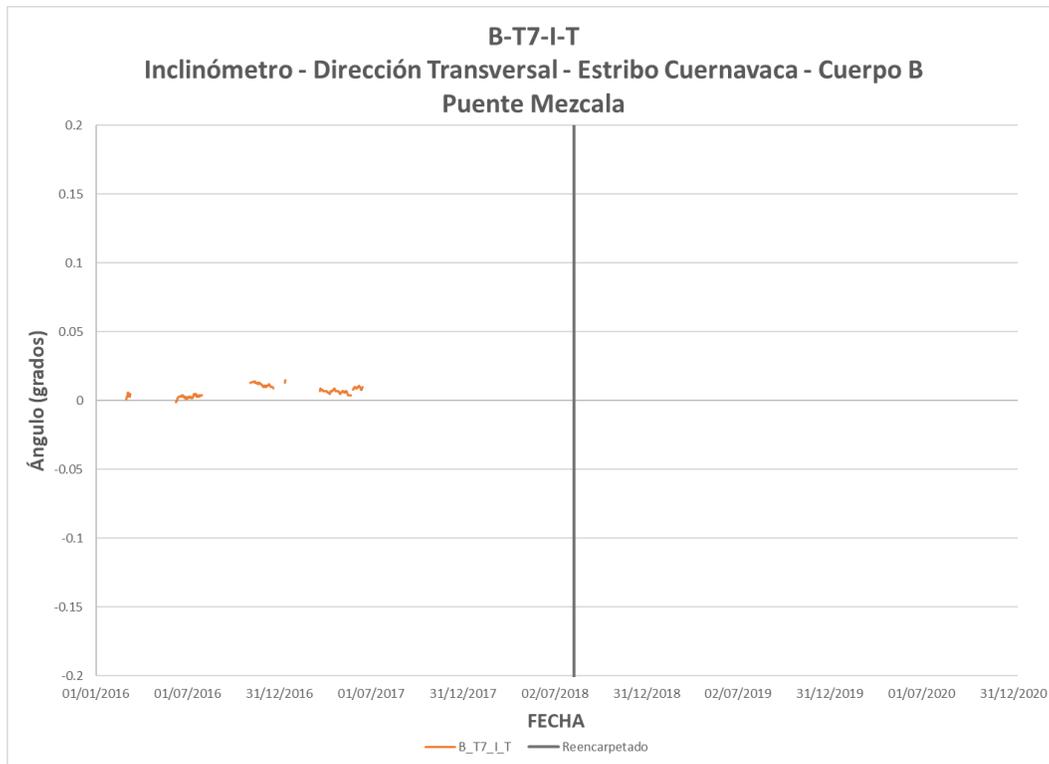


Figura 3.96 Valores de inclinación del sensor B-T7-I-T

En las figuras 3.97 a 3.120, 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.

Las tensiones de los tirantes son obtenidas mediante el método lineal indirecto, al monitorear las frecuencias naturales del tirante y conociendo sus parámetros constantes como longitud y masa total es posible monitorear su tensión en tiempo real.

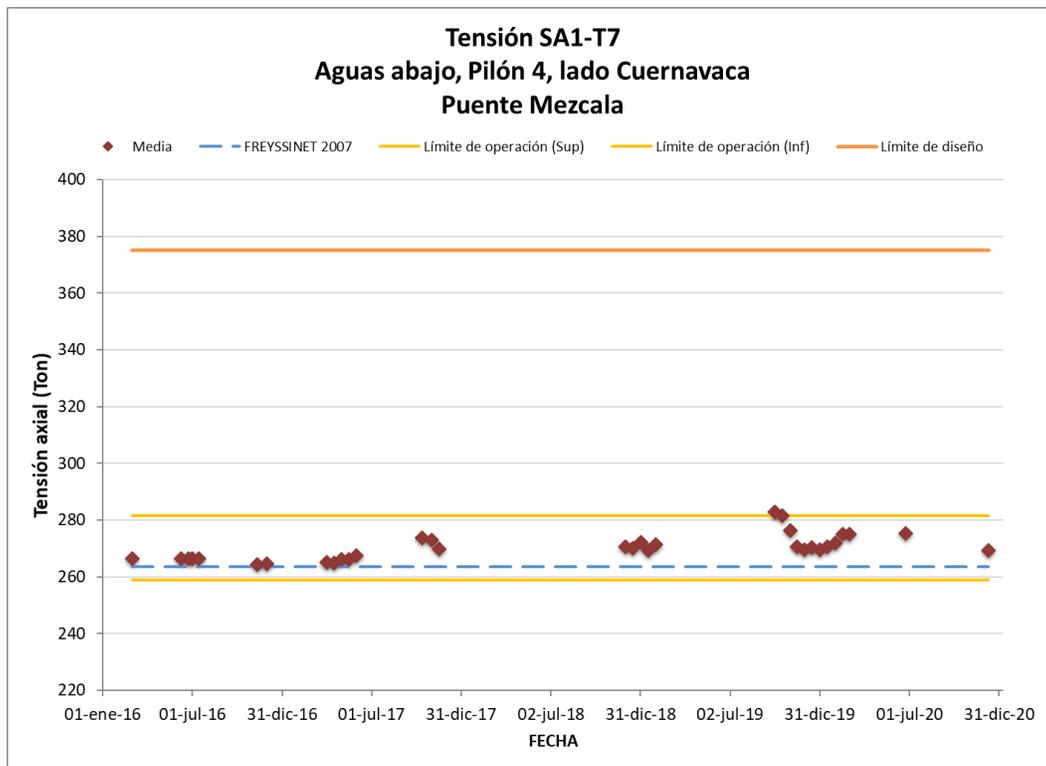


Figura 3.97 Valores de tensión del tirante SA1-T7

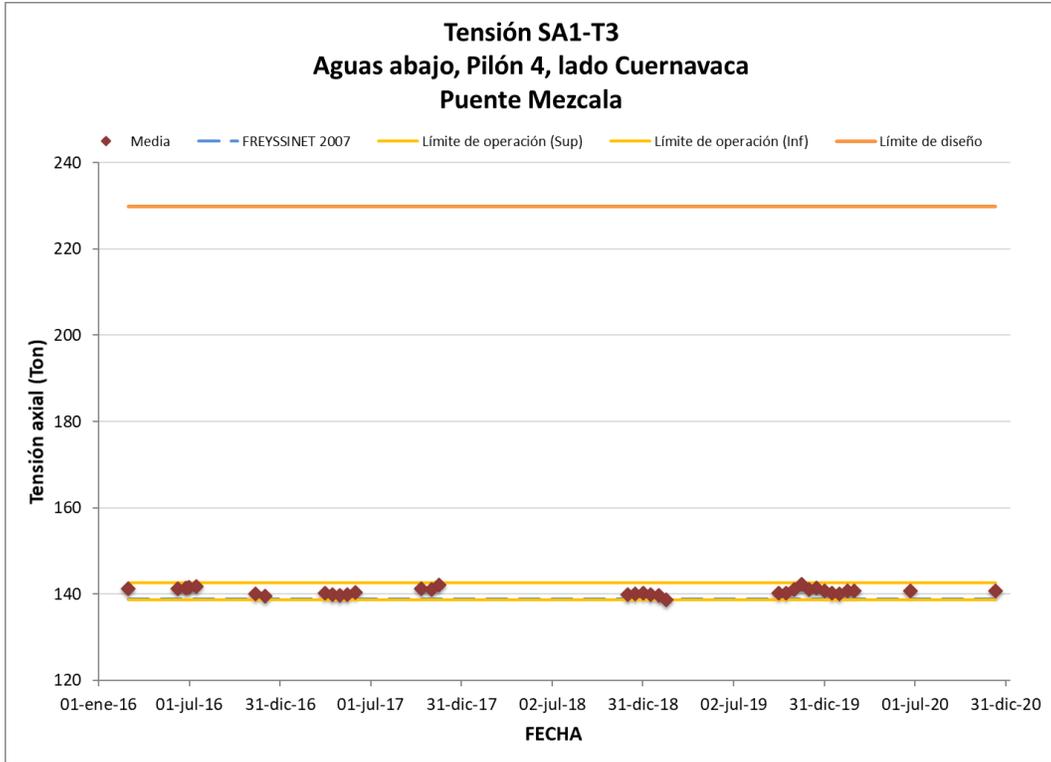


Figura 3.98 Valores de tensión del tirante SA1-T3

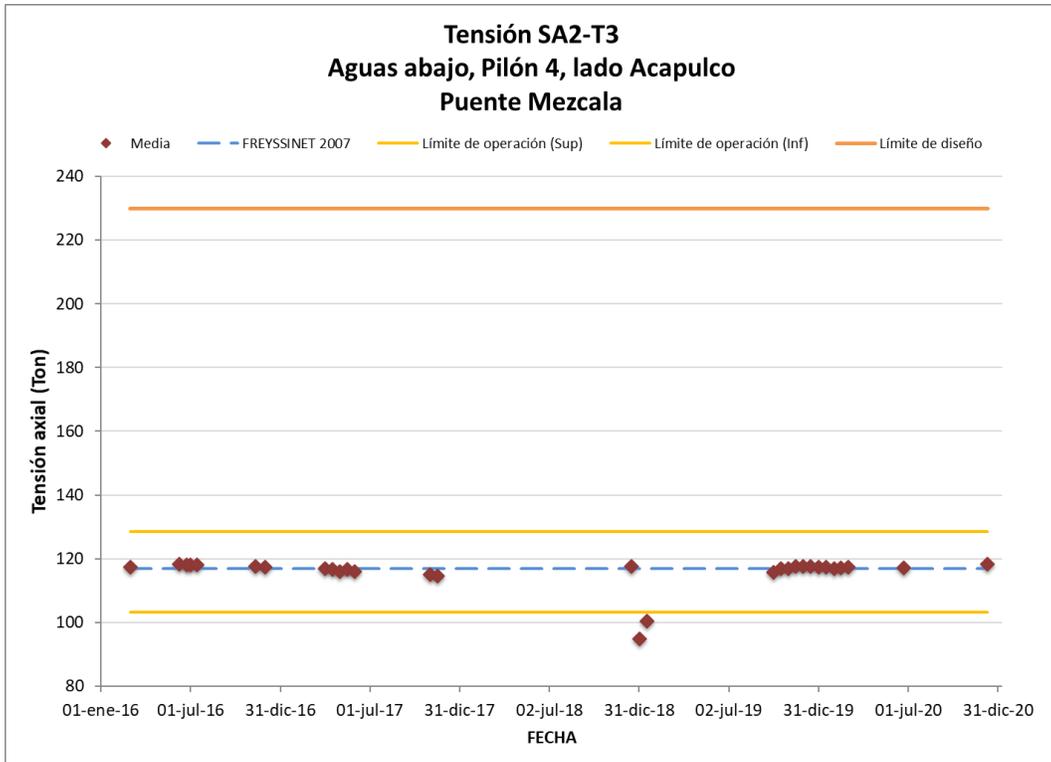


Figura 3.99 Valores de tensión del tirante SA2-T3

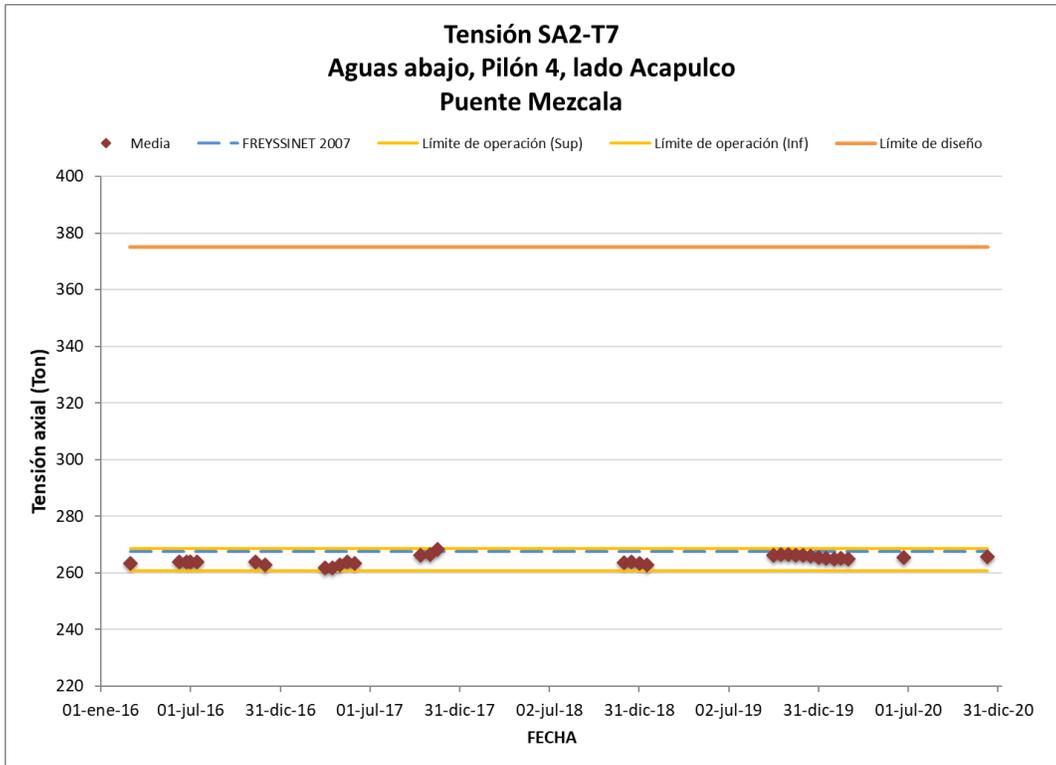


Figura 3.100 Valores de tensión del tirante SA2-T7

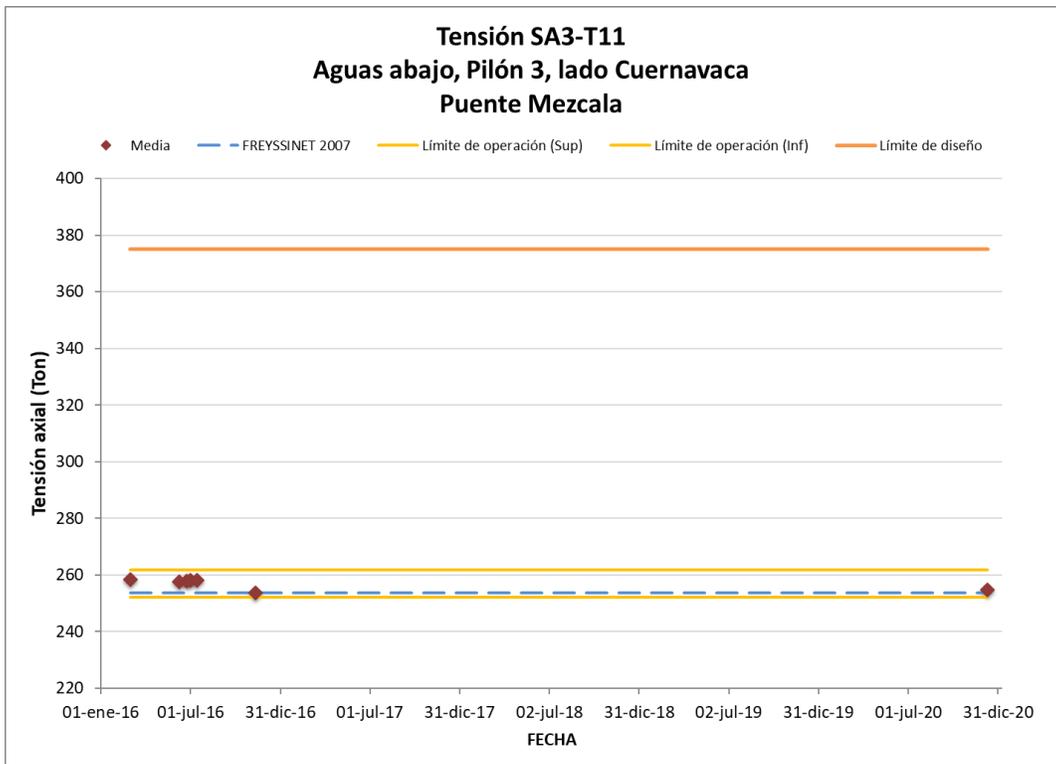


Figura 3.101 Valores de tensión del tirante SA3-T11

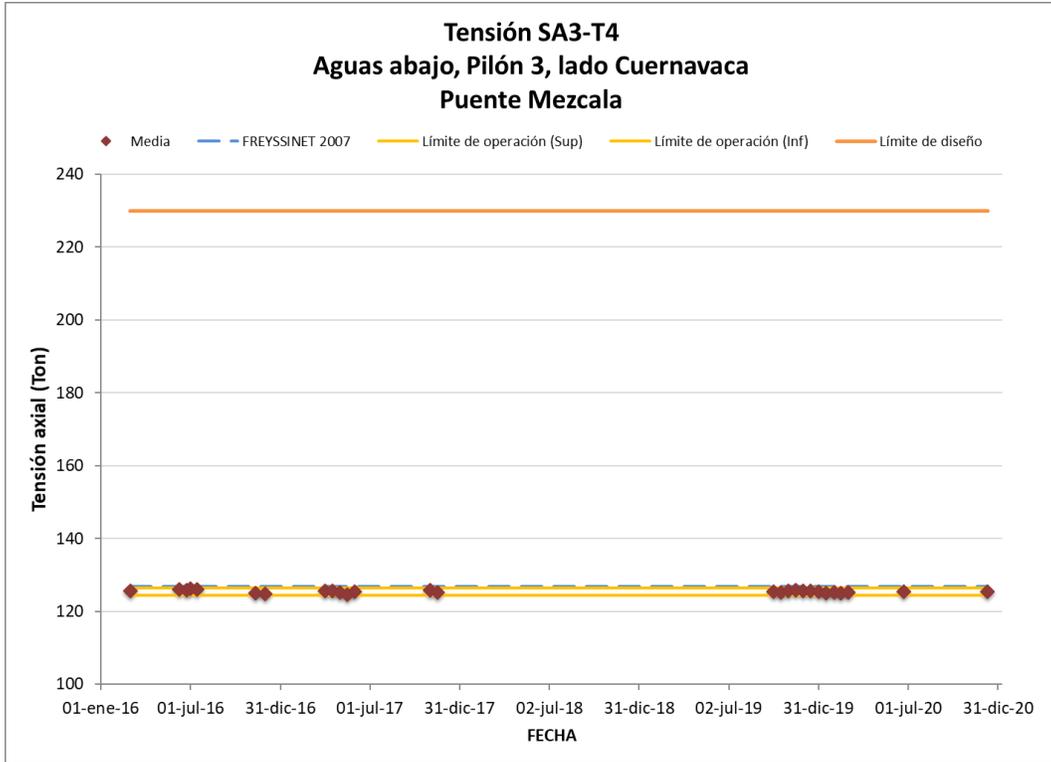


Figura 3.102 Valores de tensión del tirante SA3-T4

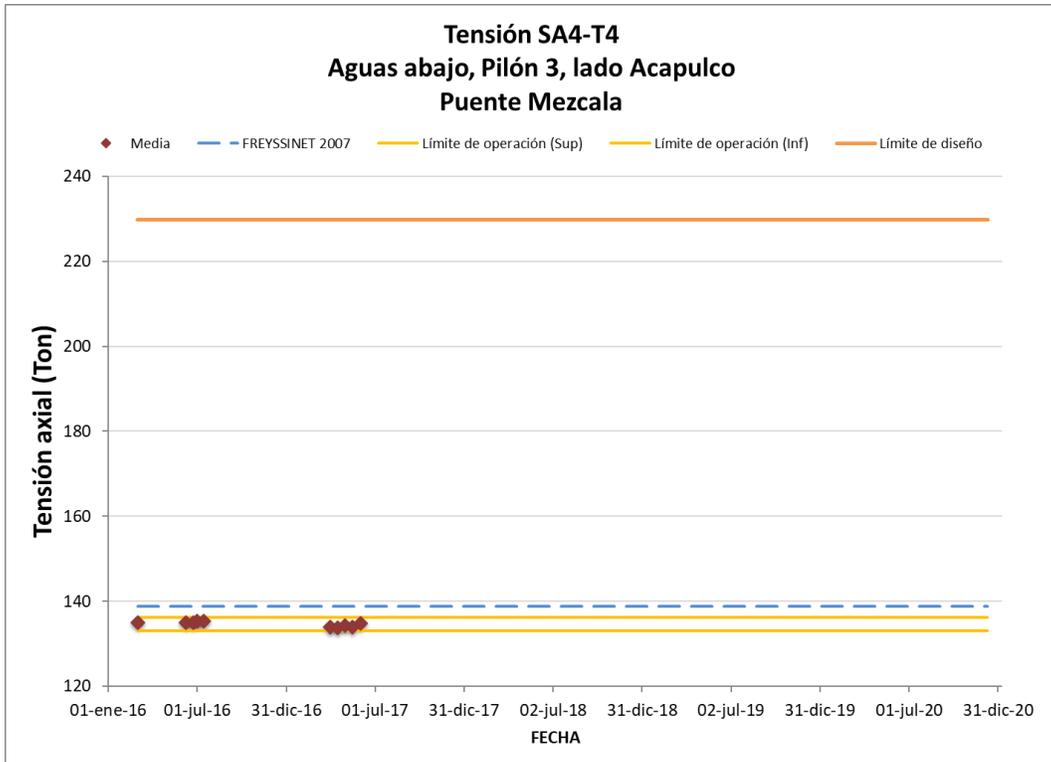


Figura 3.103 Valores de tensión del tirante SA4-T4

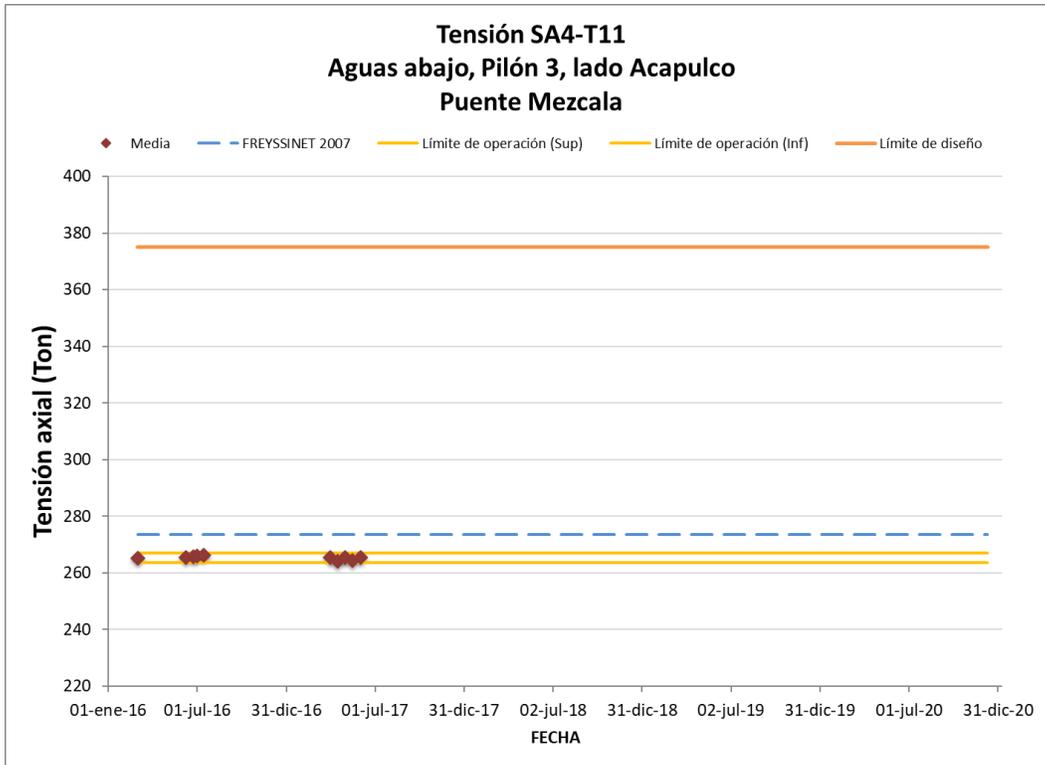


Figura 3.104 Valores de tensión del tirante SA4-T11

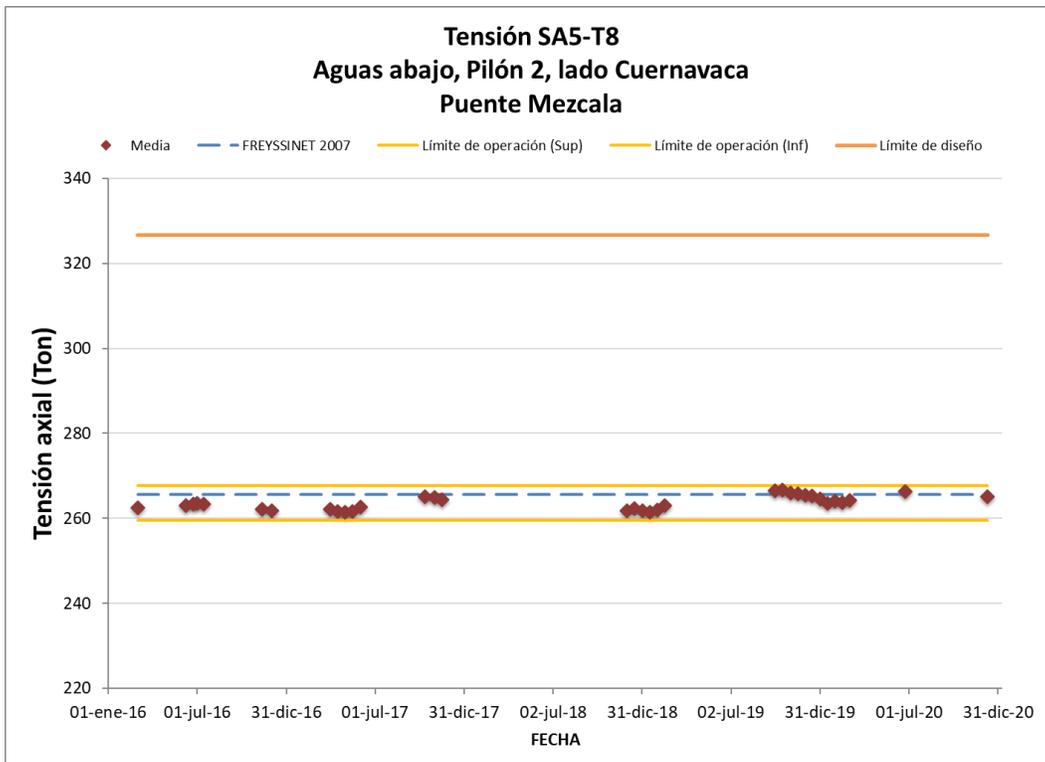


Figura 3.105 Valores de tensión del tirante SA5-T8

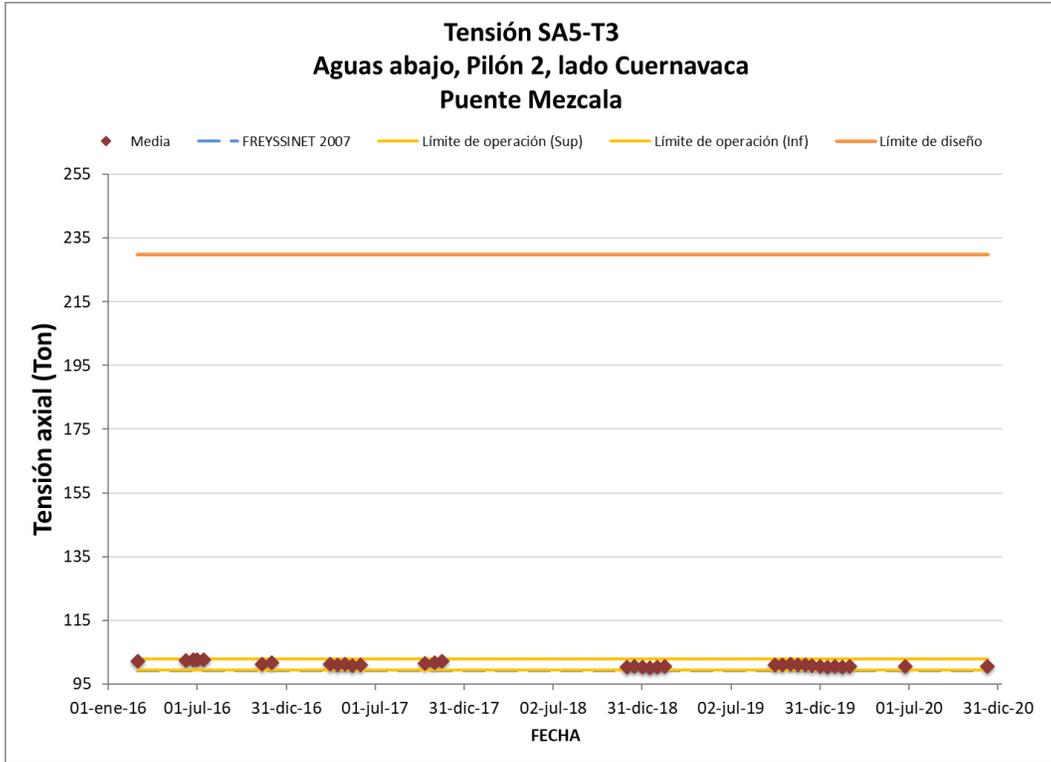


Figura 3.106 Valores de tensión del tirante SA5-T3

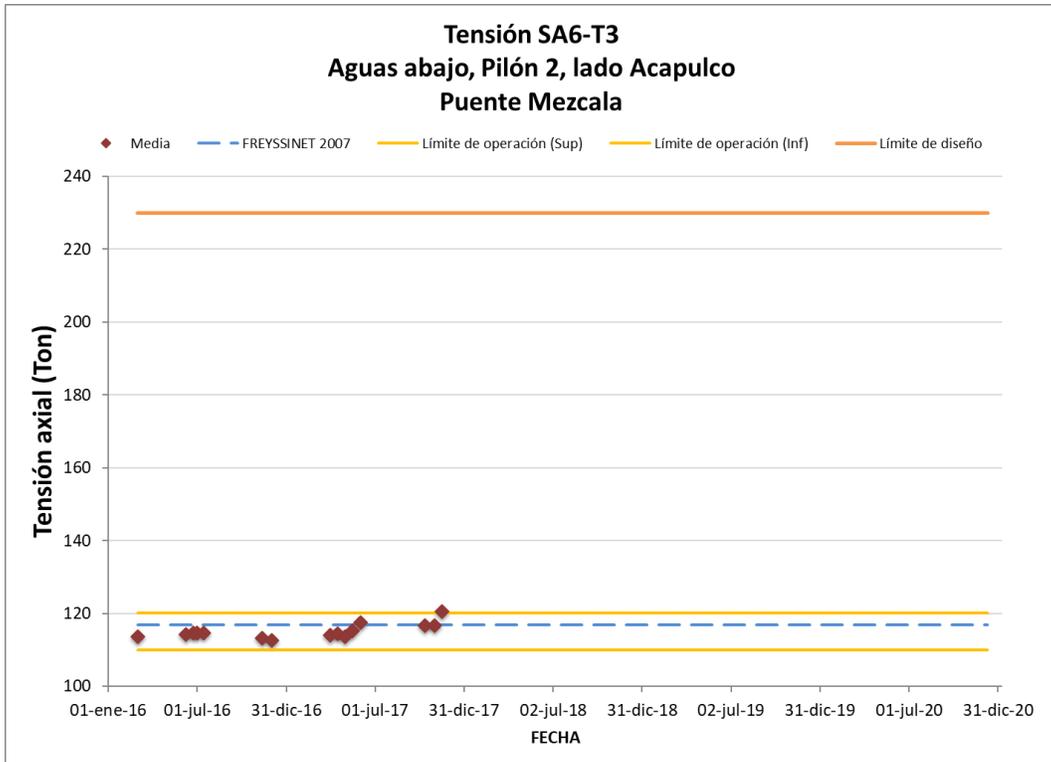


Figura 3.107 Valores de tensión del tirante SA6-T3

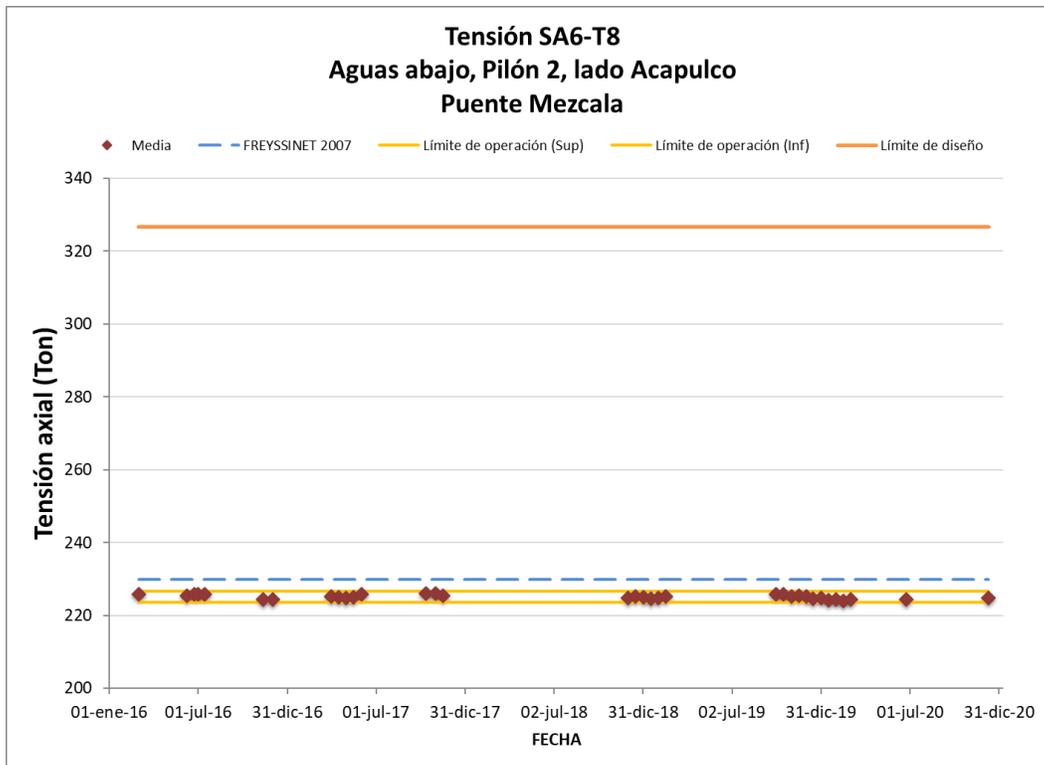


Figura 3.108 Valores de tensión del tirante SA6-T8

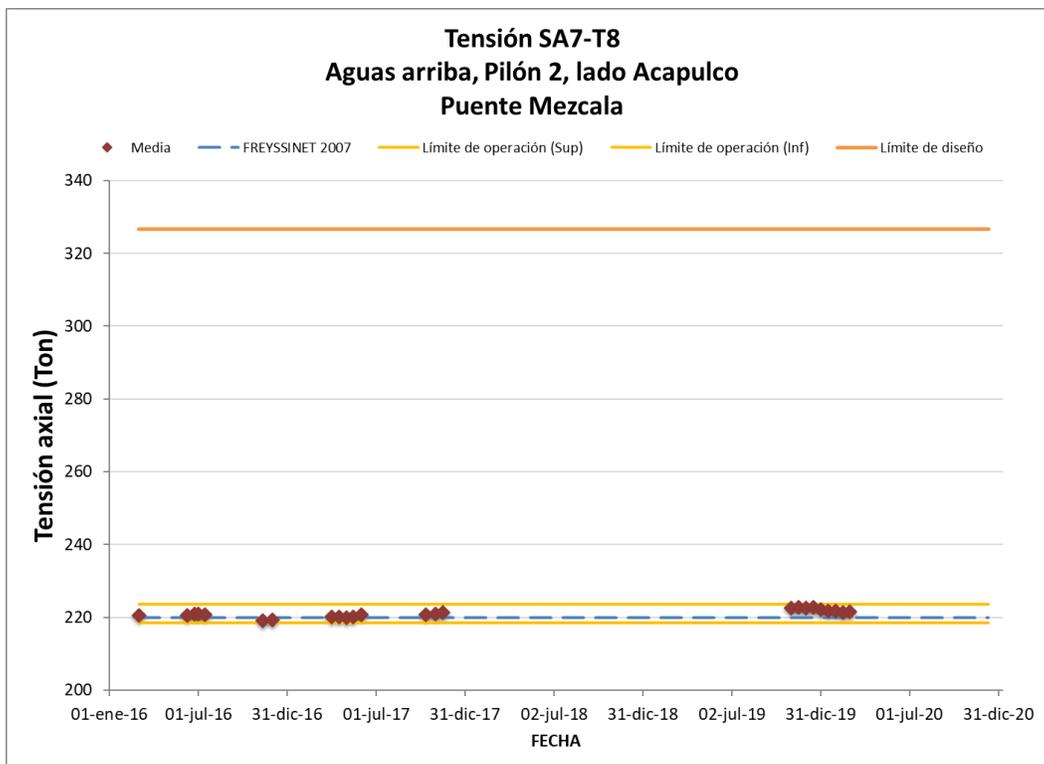


Figura 3.109 Valores de tensión del tirante SA7-T8

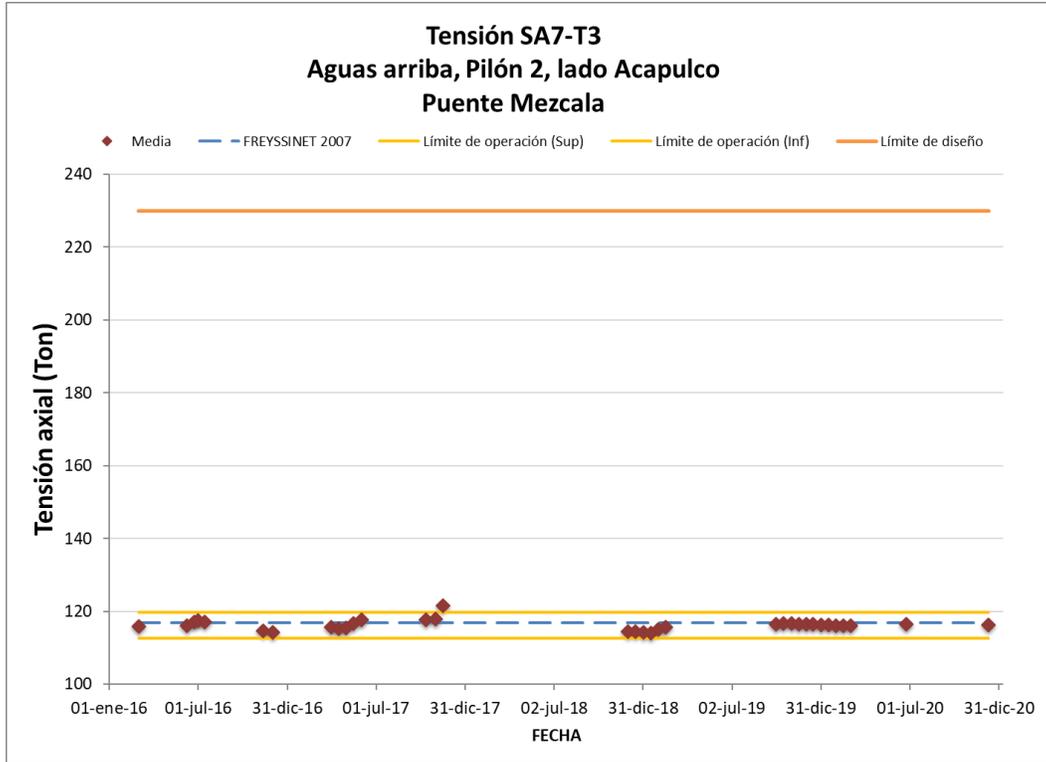


Figura 3.110 Valores de tensión del tirante SA7-T3

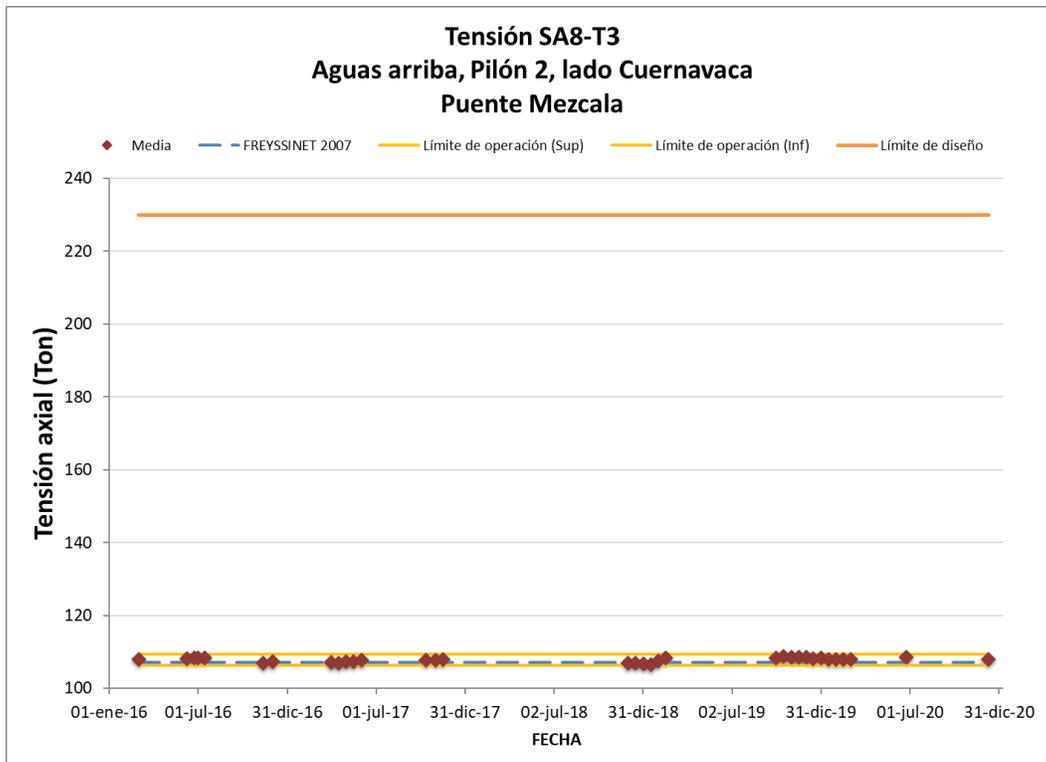


Figura 3.111 Valores de tensión del tirante SA8-T3

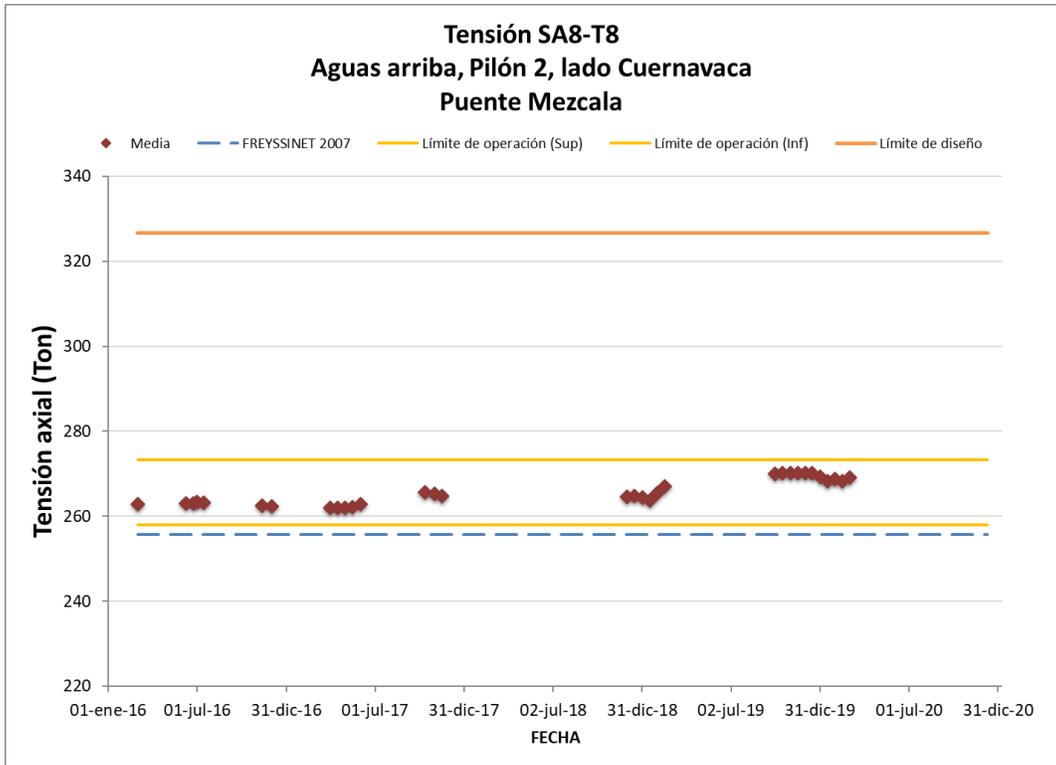


Figura 3.112 Valores de tensión del tirante SA8-T8

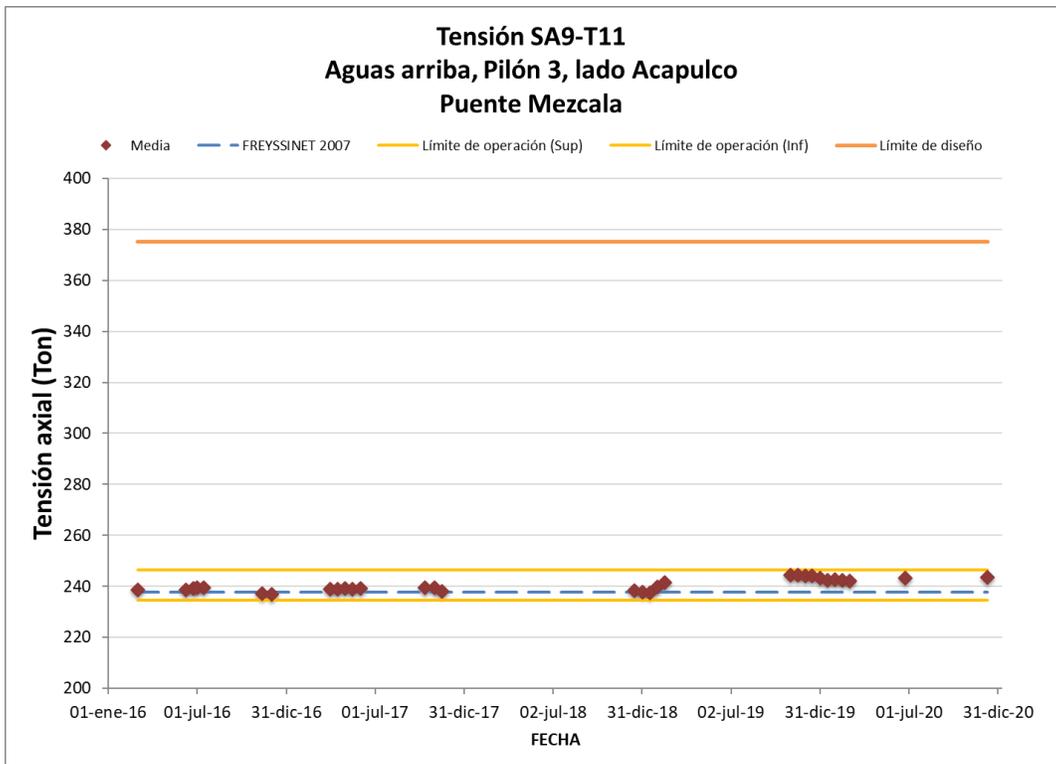


Figura 3.113 Valores de tensión del tirante SA9-T11

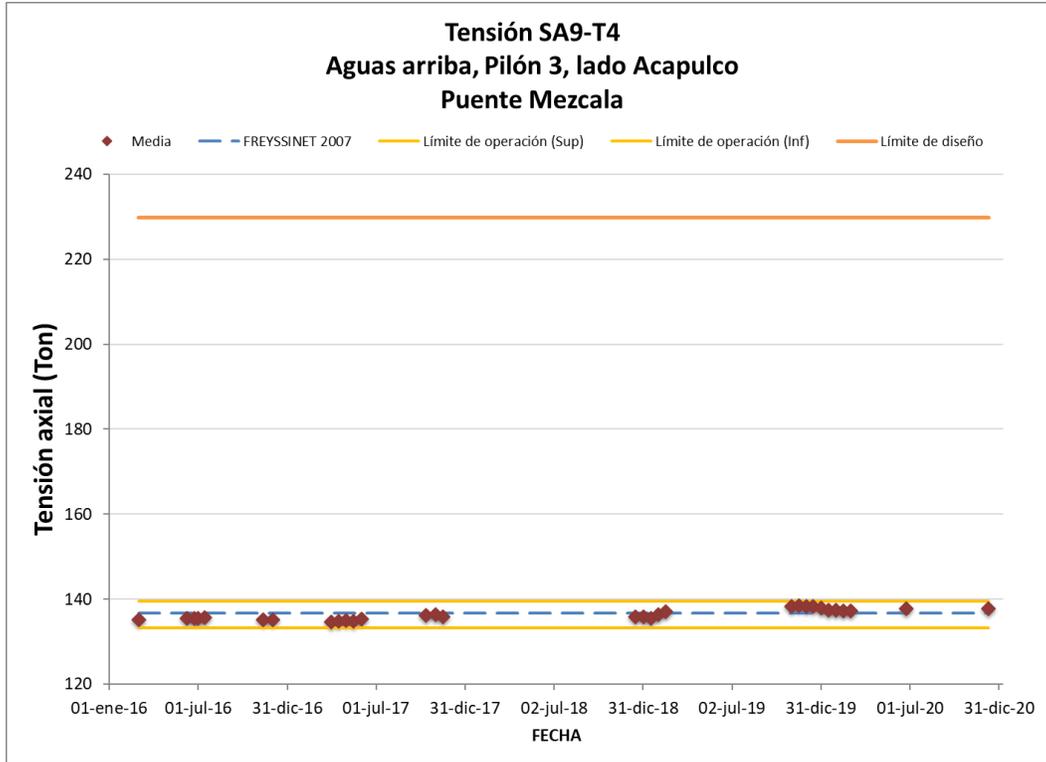


Figura 3.114 Valores de tensión del tirante SA9-T4

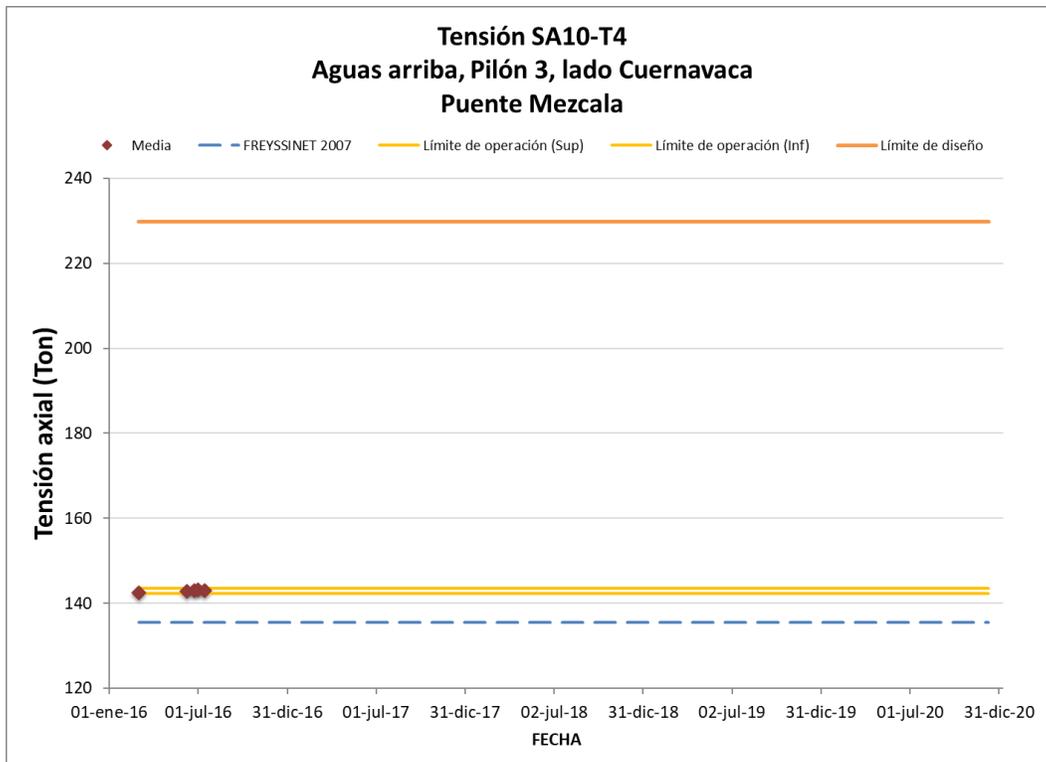


Figura 3.115 Valores de tensión del tirante SA10-T4

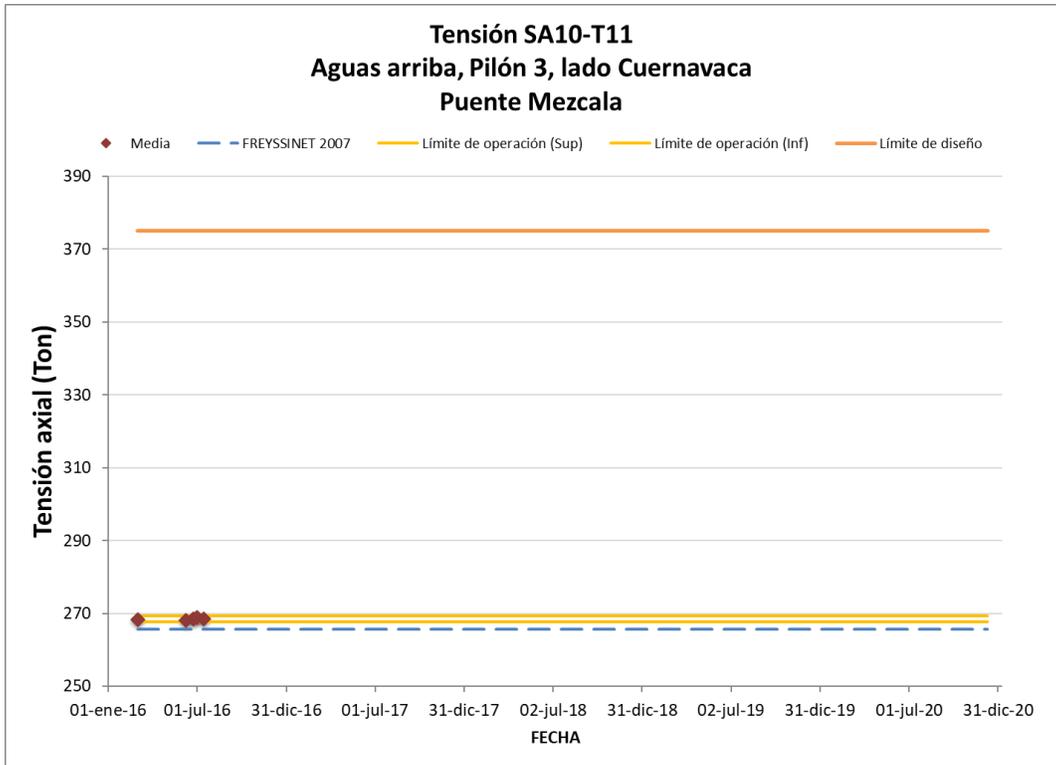


Figura 3.116 Valores de tensión del tirante SA10-T11

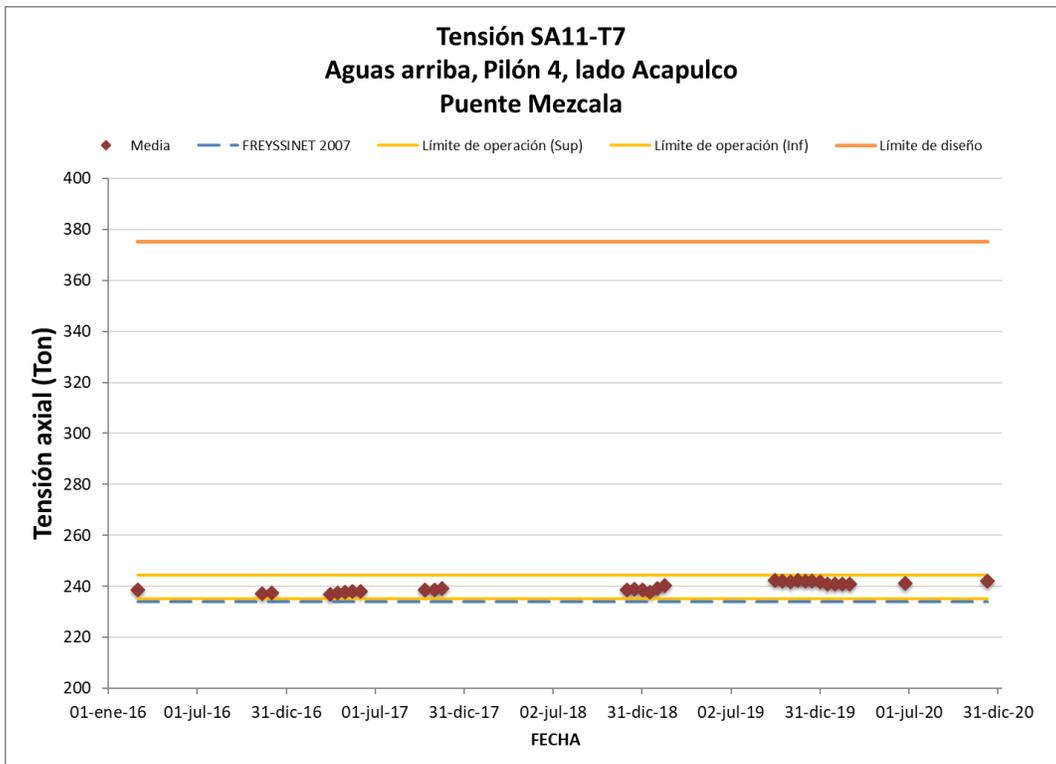


Figura 3.117 Valores de tensión del tirante SA11-T7

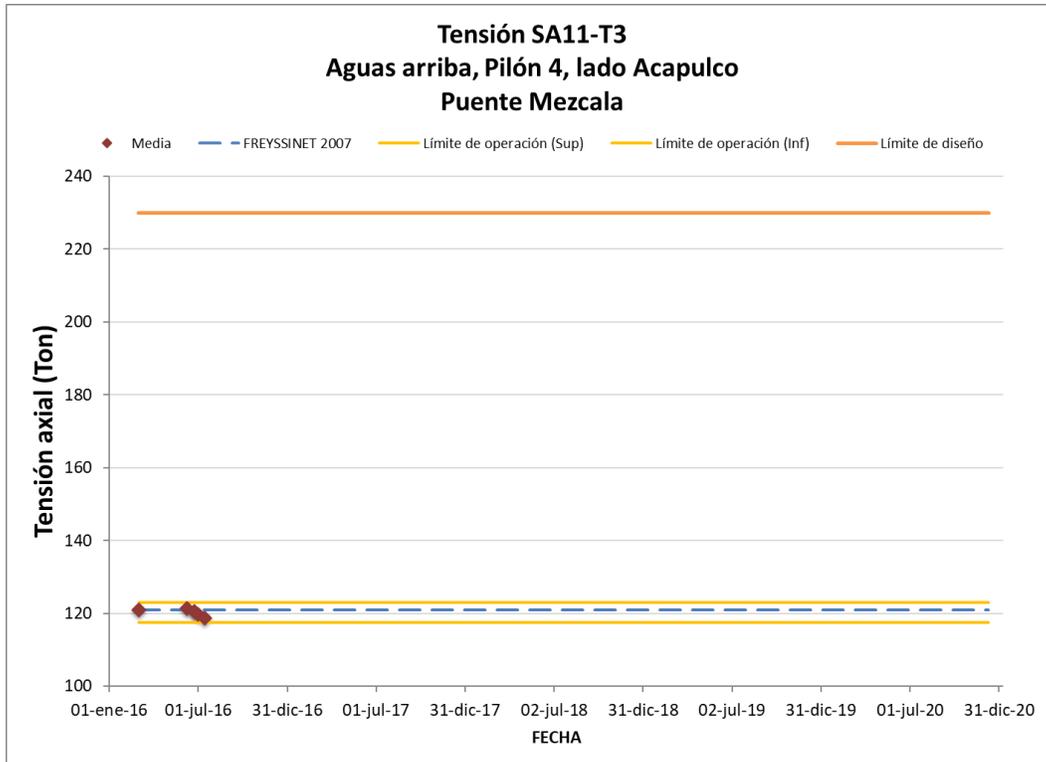


Figura 3.118 Valores de tensión del tirante SA11-T3

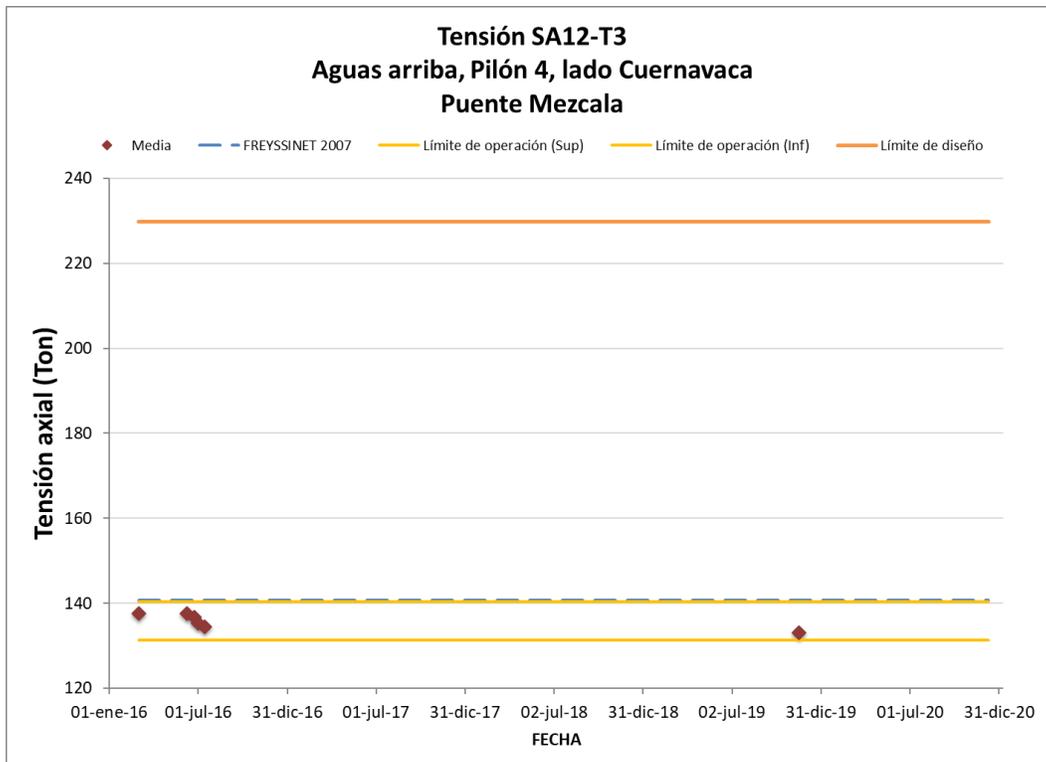
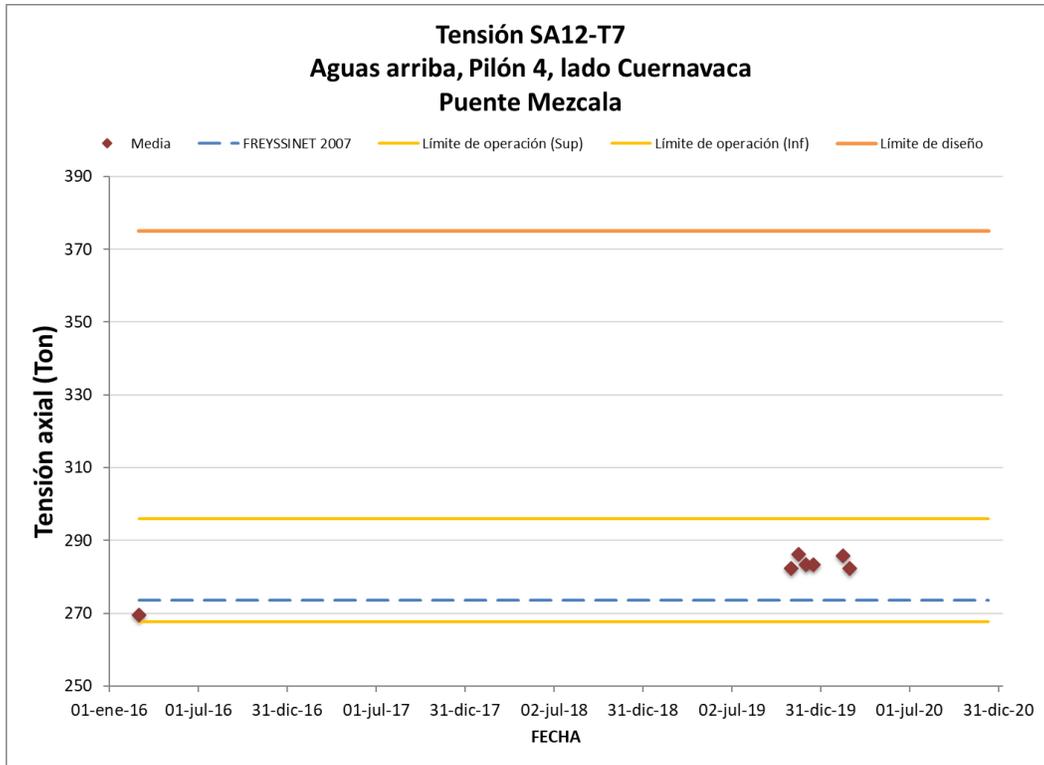


Figura 3.119 Valores de tensión del tirante SA12-T3



**Figura 3.120 Valores de tensión del tirante SA12-T7**

Se puede concluir que los valores de las tensiones de los tirantes monitoreados se encuentran en el rango de variación aceptable tomando como referencia las tensiones obtenidas mediante pesajes directos con gatos hidráulicos realizados en 2007.

Otra de las variables a considerar durante el monitoreo estructural del puente Mezcala, es el valor de la media estadística de deformación unitaria provocada por las cargas vivas (vehículos que circulan por el puente Mezcala), 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.

Las gráficas de las figuras de la 3.121 a la 3.216 muestran el valor de la media de cada sensor a tensión y compresión desde el año de 2016.

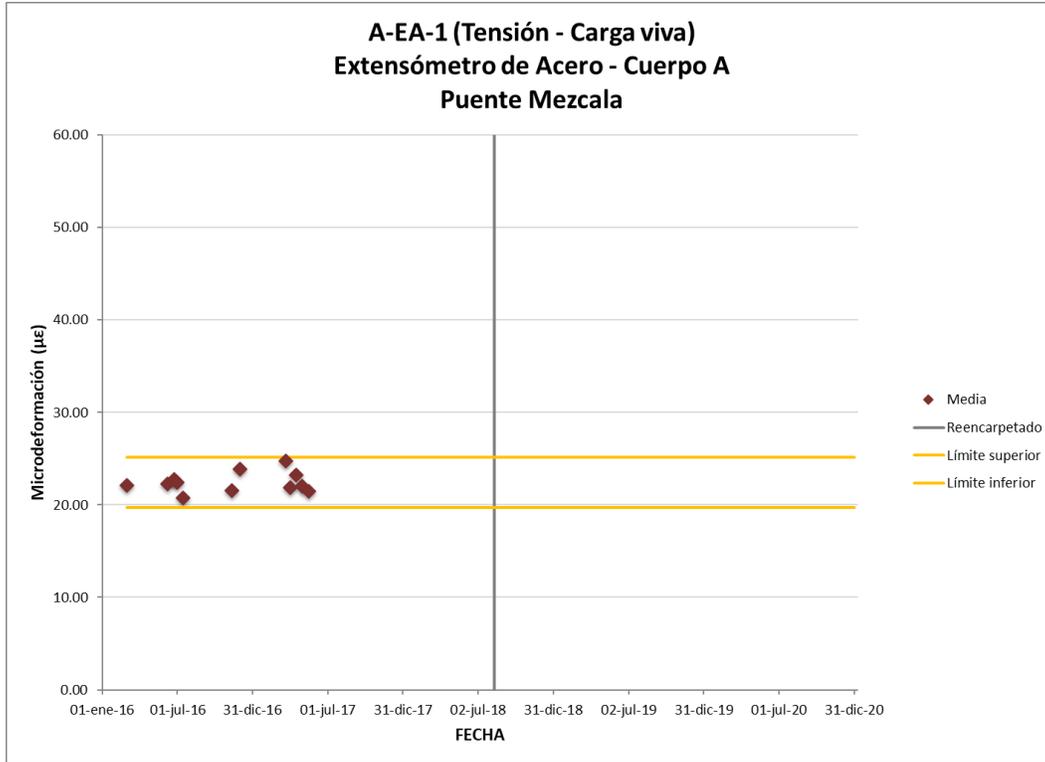


Figura 3.121 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-1

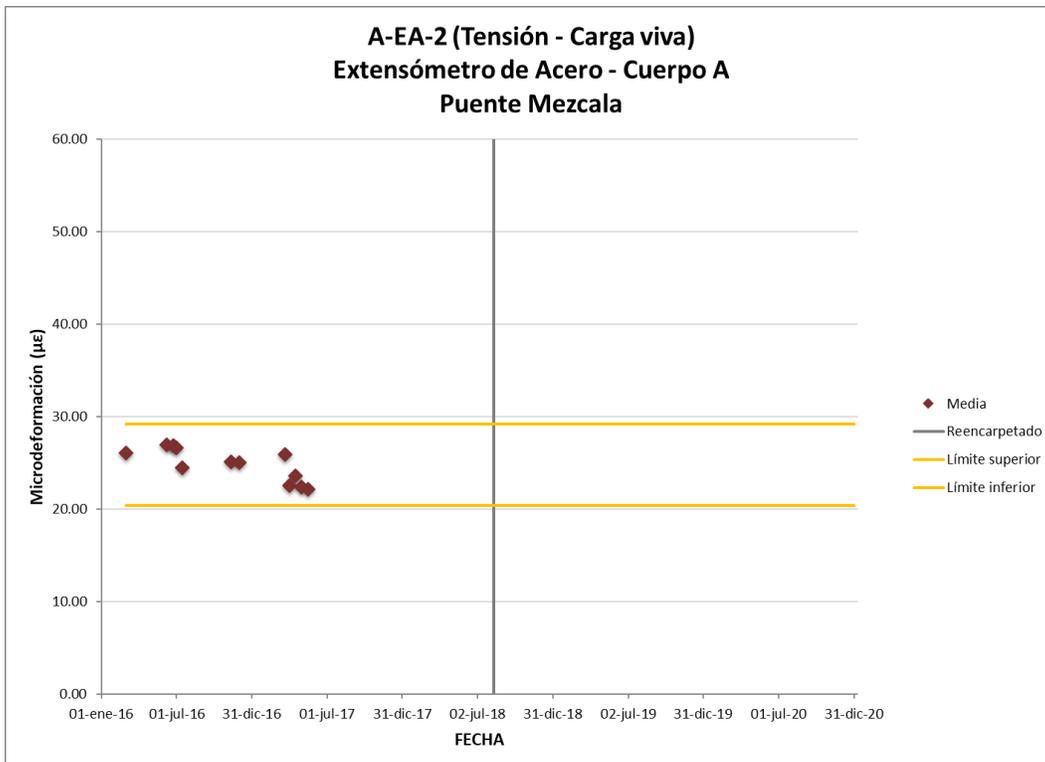


Figura 3.122 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-2

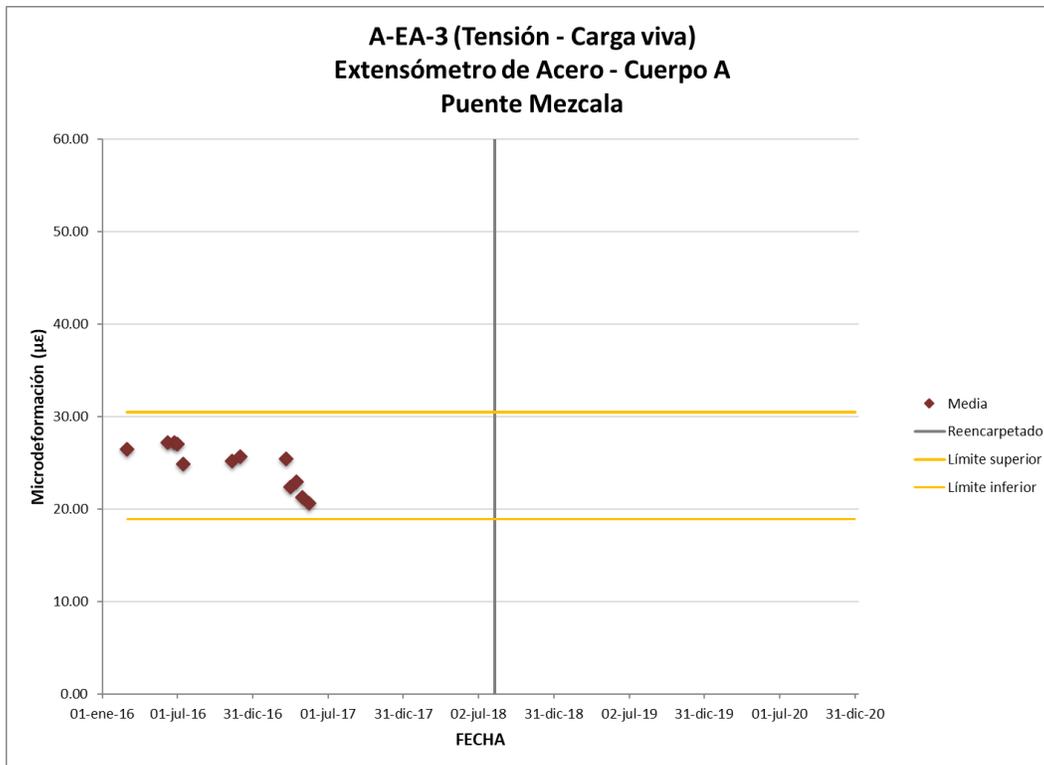


Figura 3.123 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-3

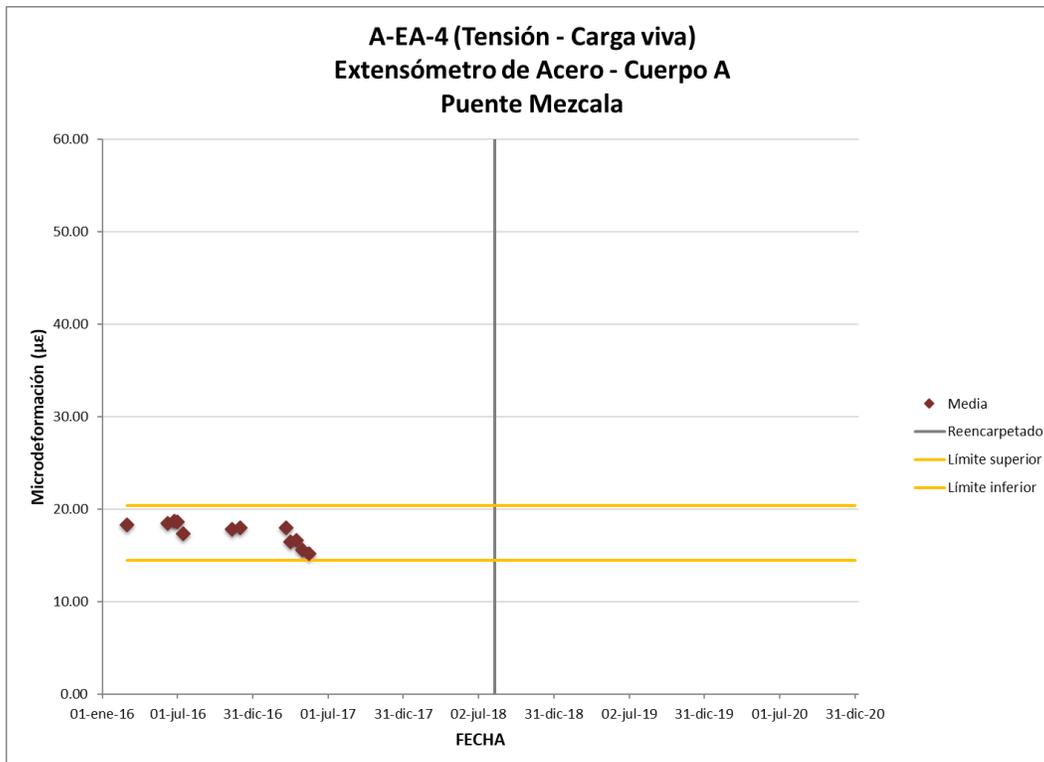


Figura 3.124 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-4

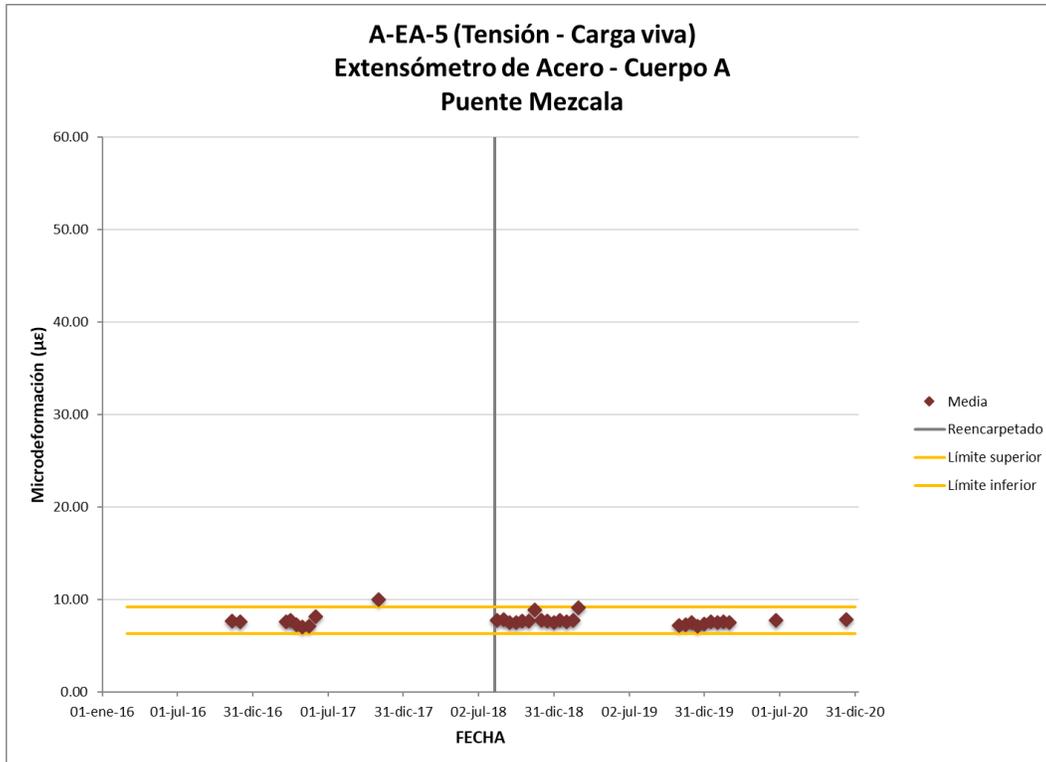


Figura 3.125 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-5

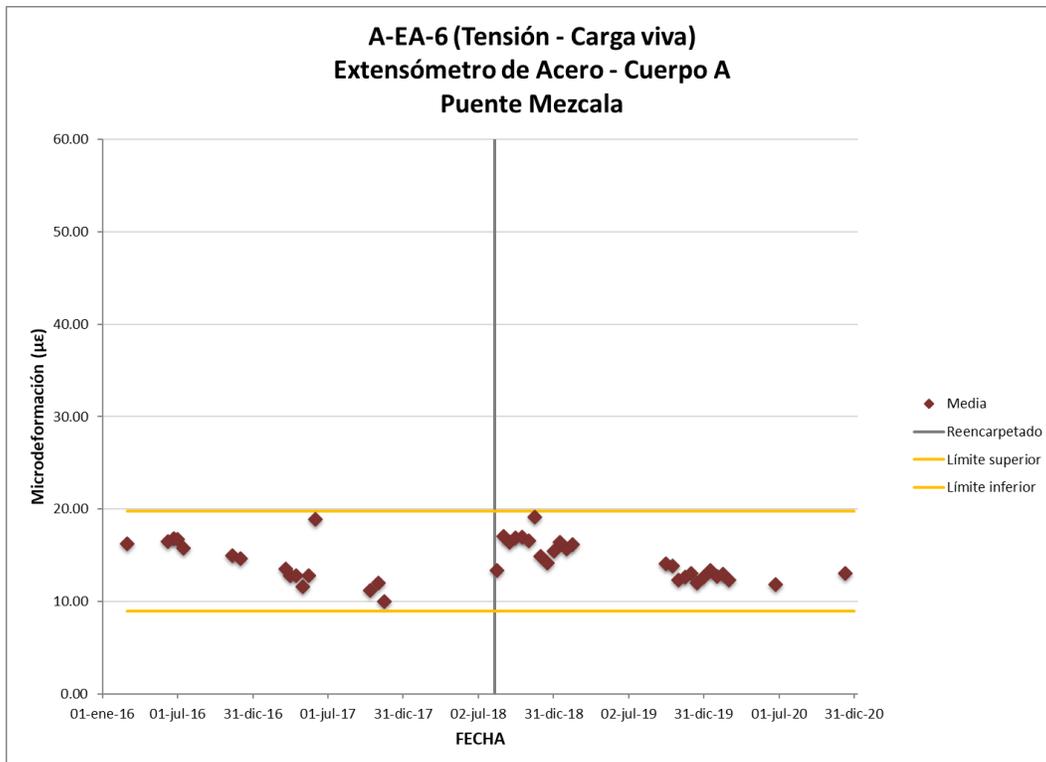


Figura 3.126 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-6

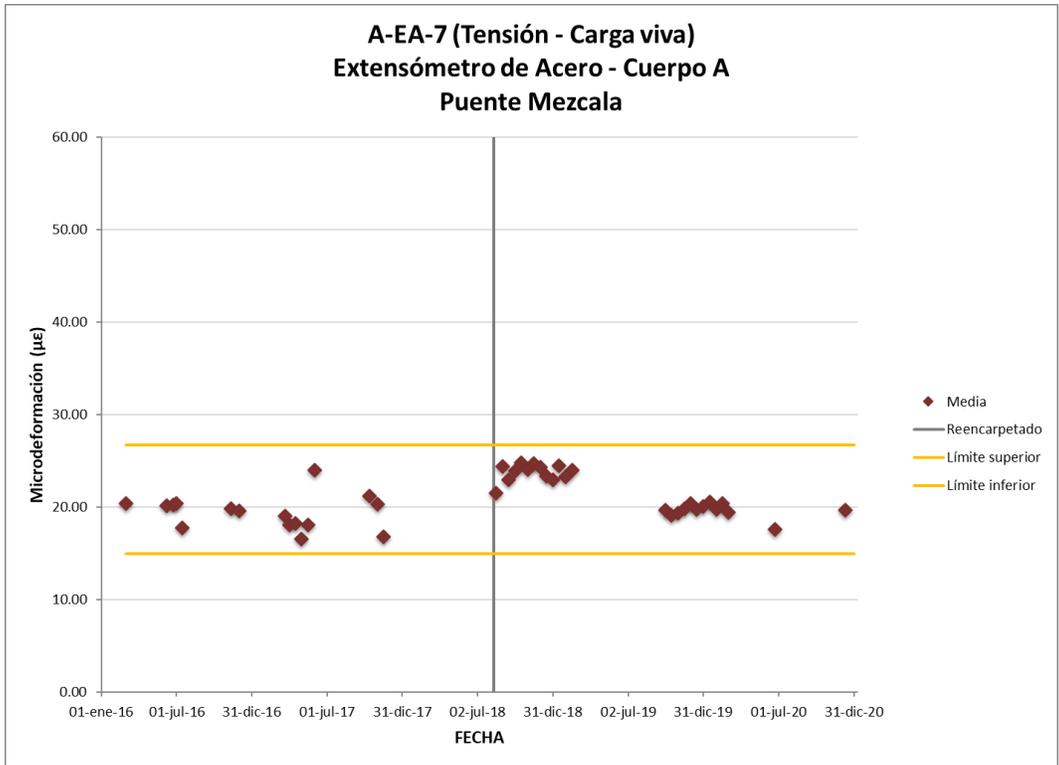


Figura 3.127 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-7

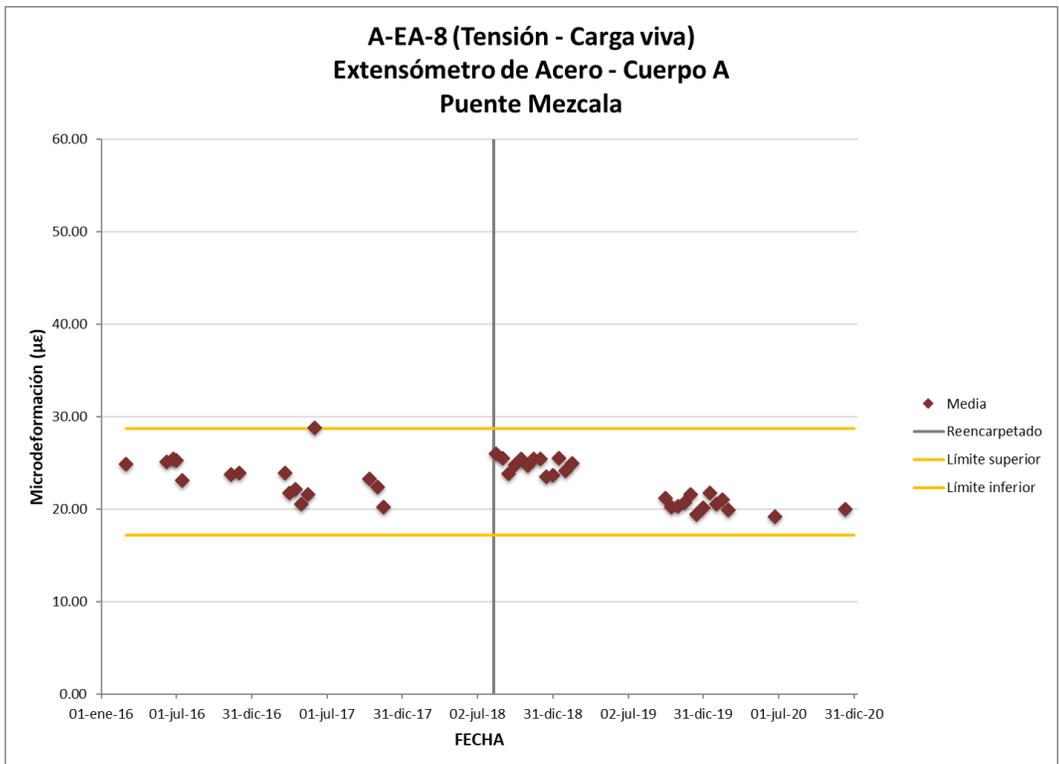


Figura 3.128 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-8

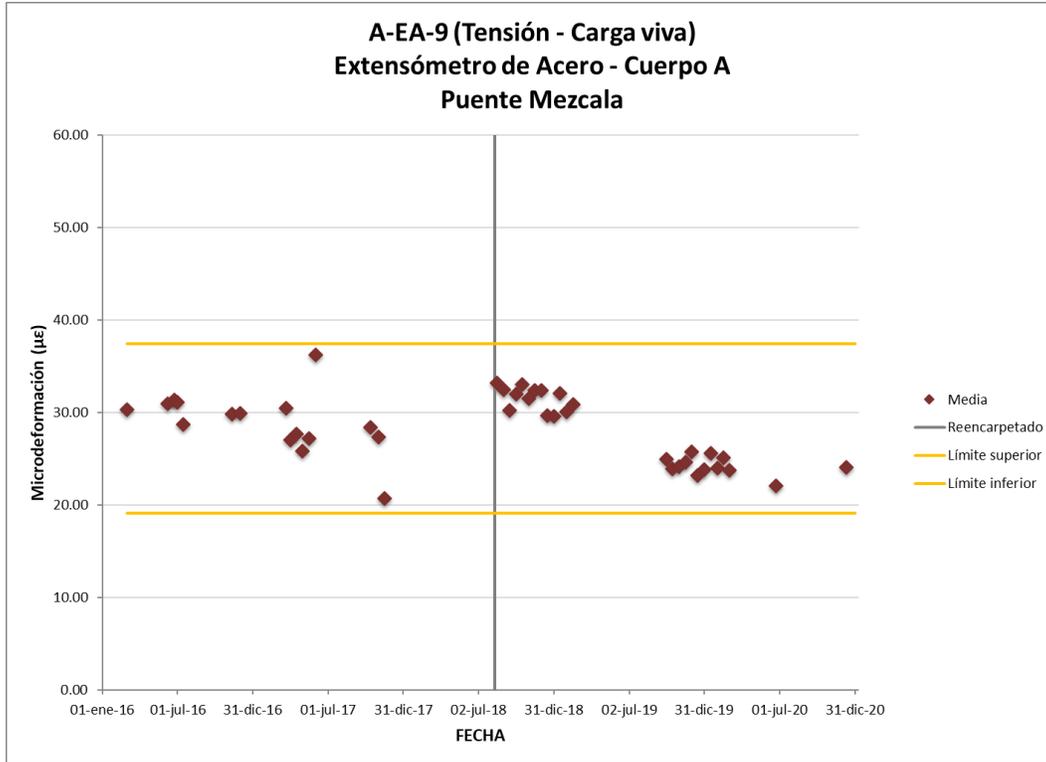


Figura 3.129 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-9

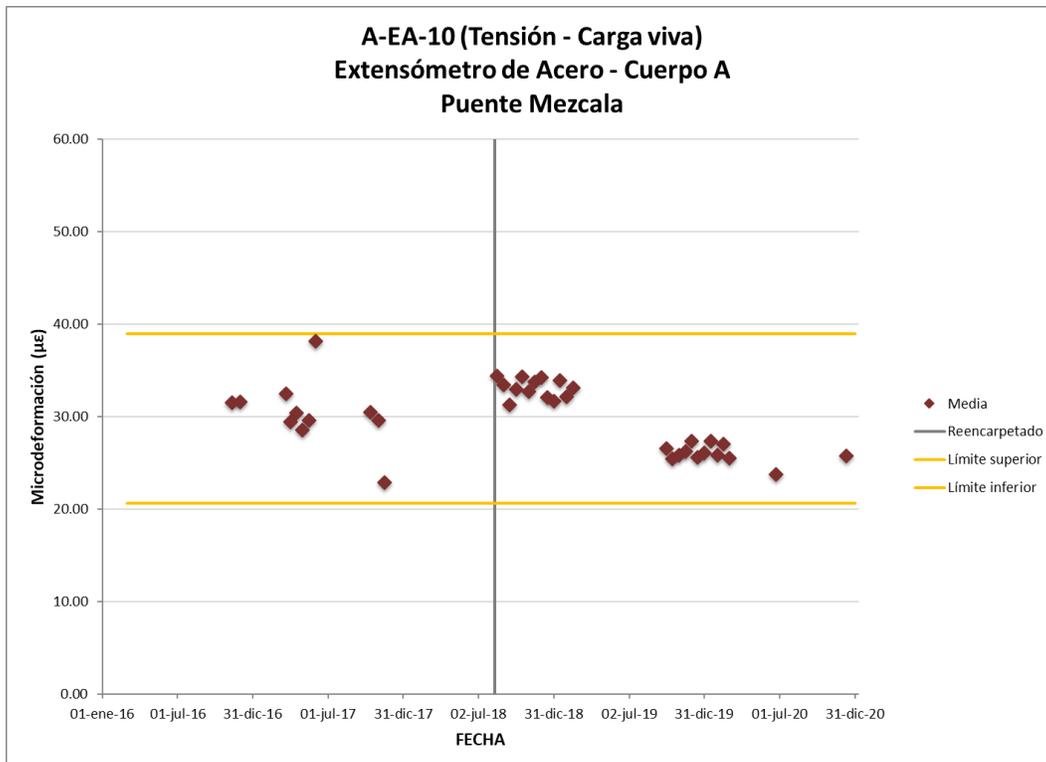


Figura 3.130 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-10

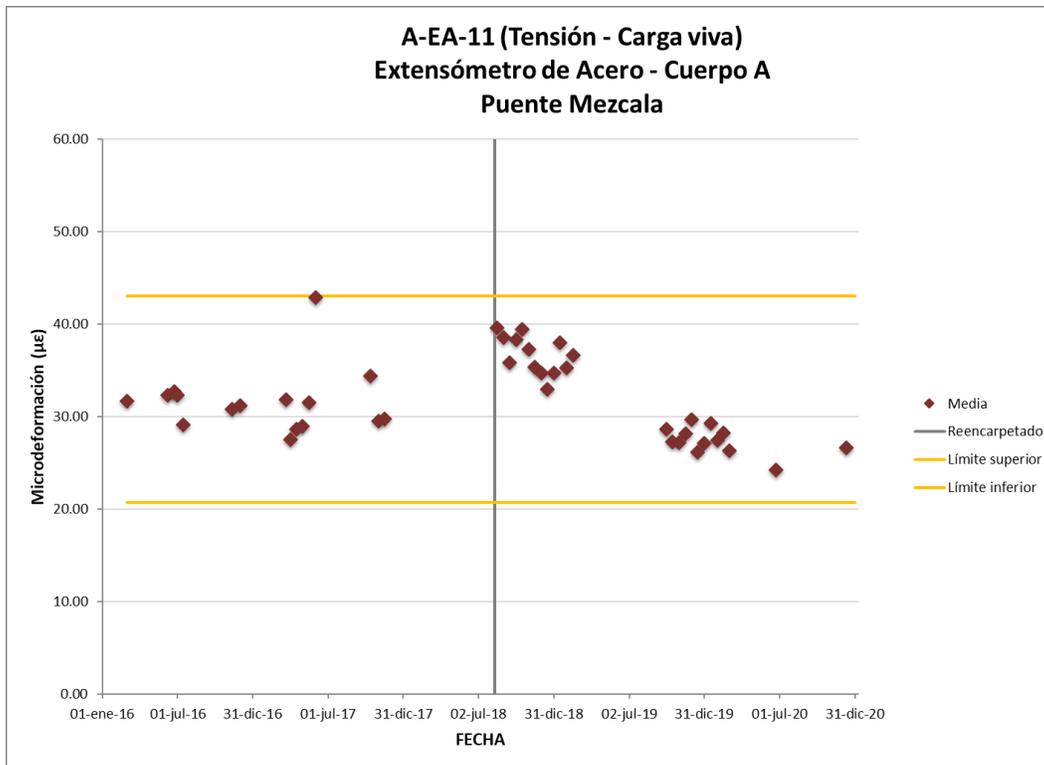


Figura 3.131 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-11

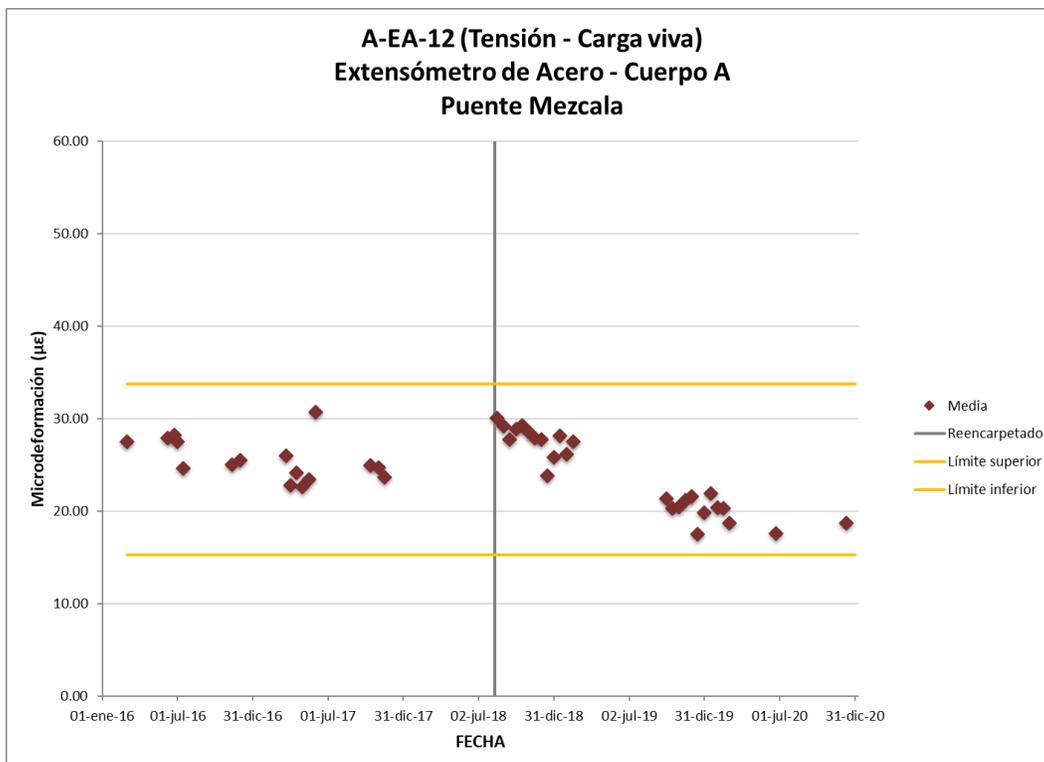


Figura 3.132 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-12

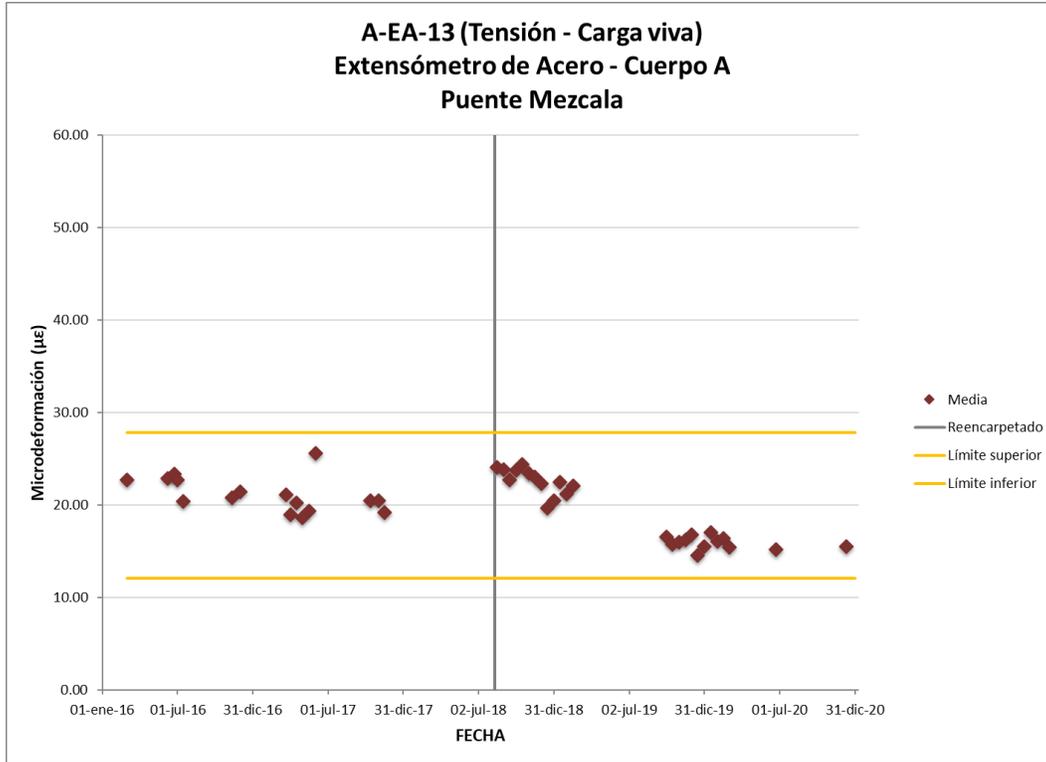


Figura 3.133 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-13

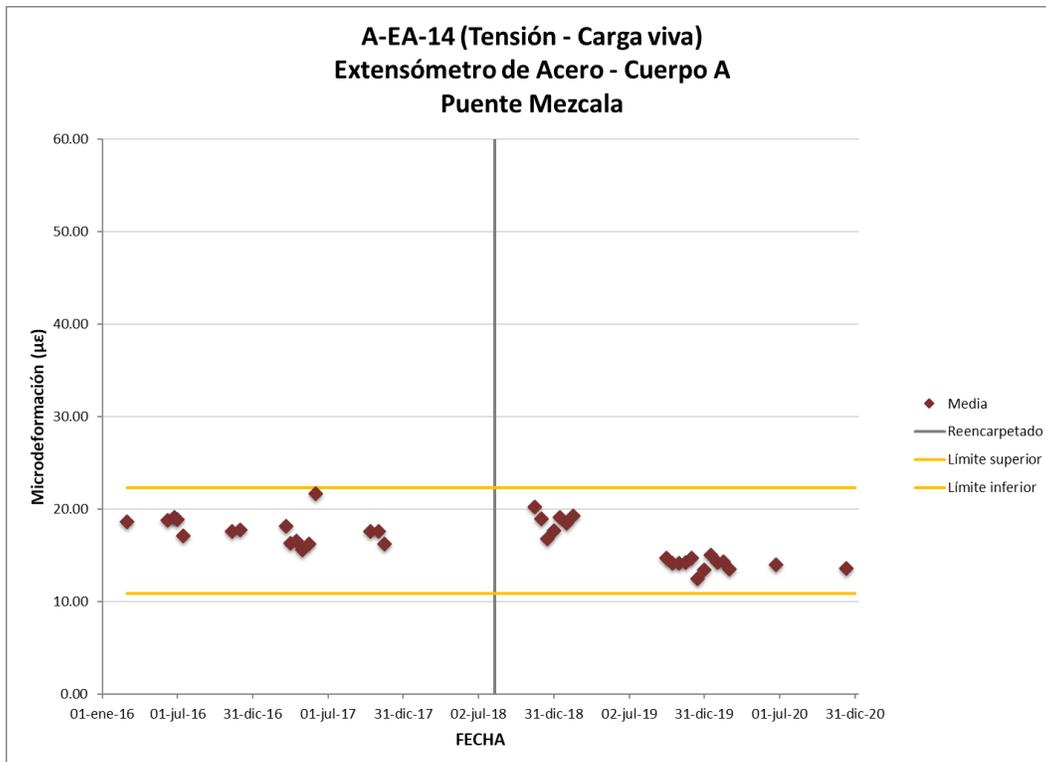


Figura 3.134 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-14

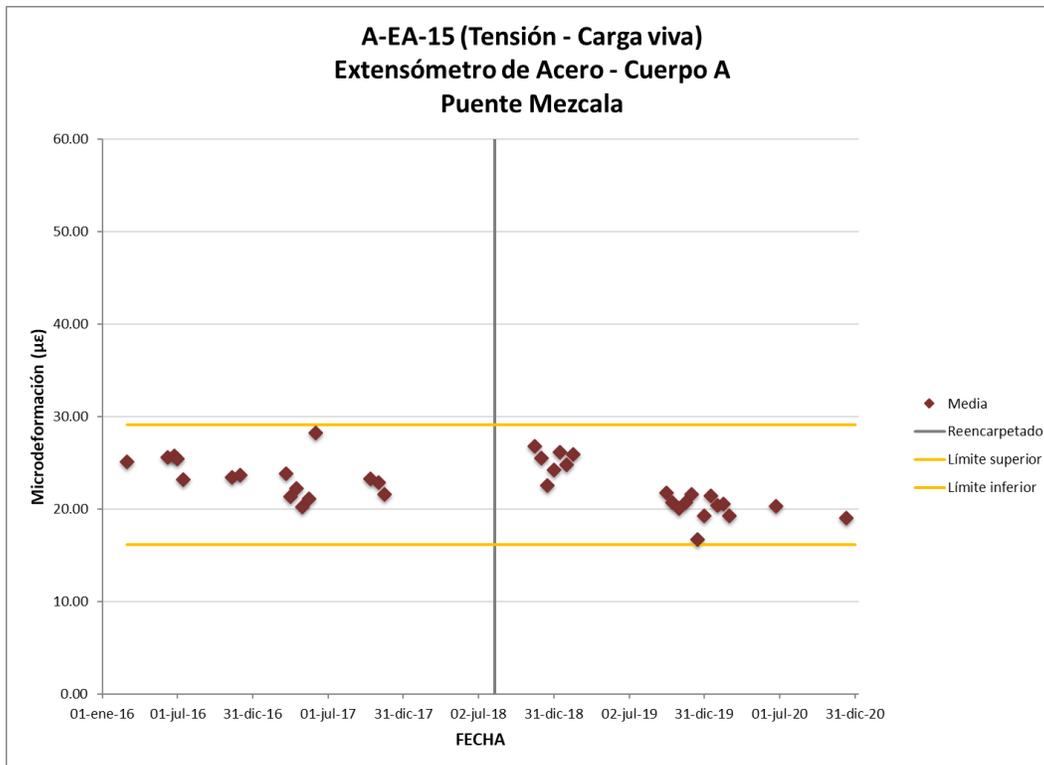


Figura 3.135 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-15

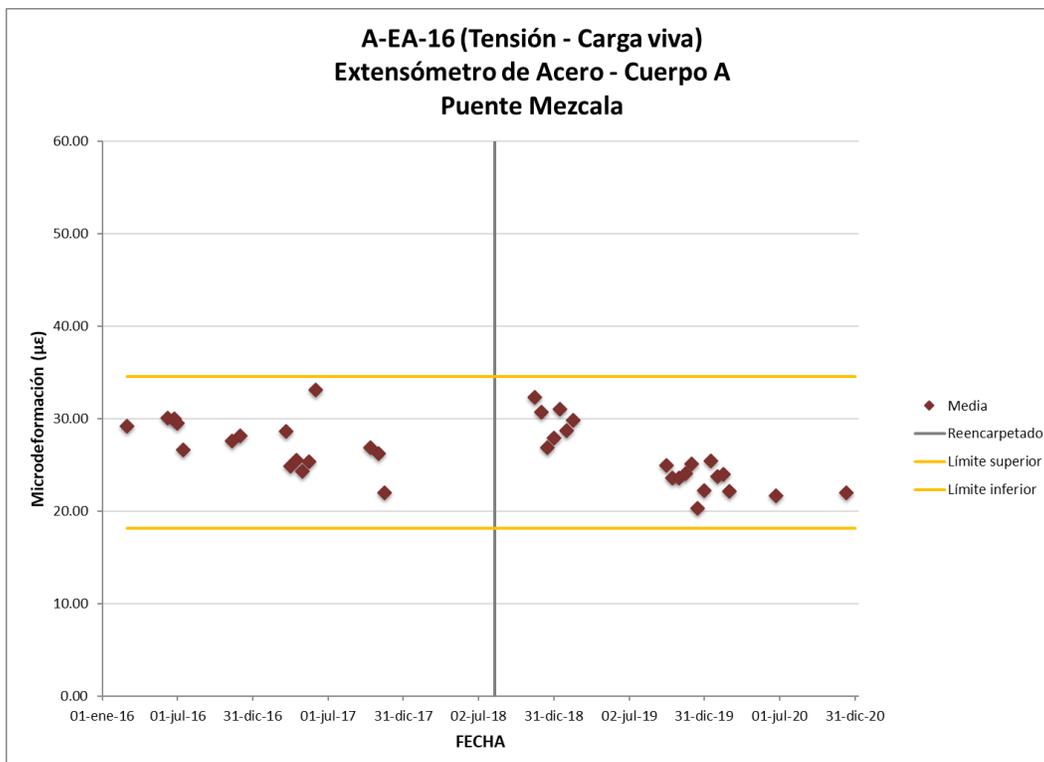


Figura 3.136 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-16

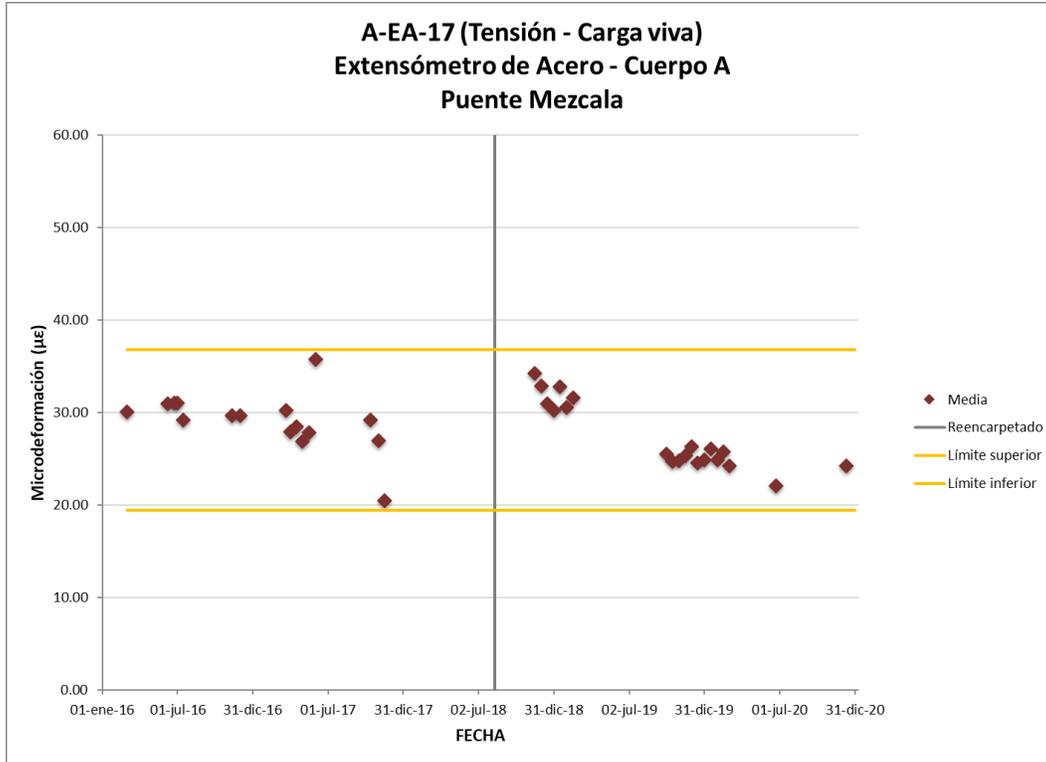


Figura 3.137 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-17

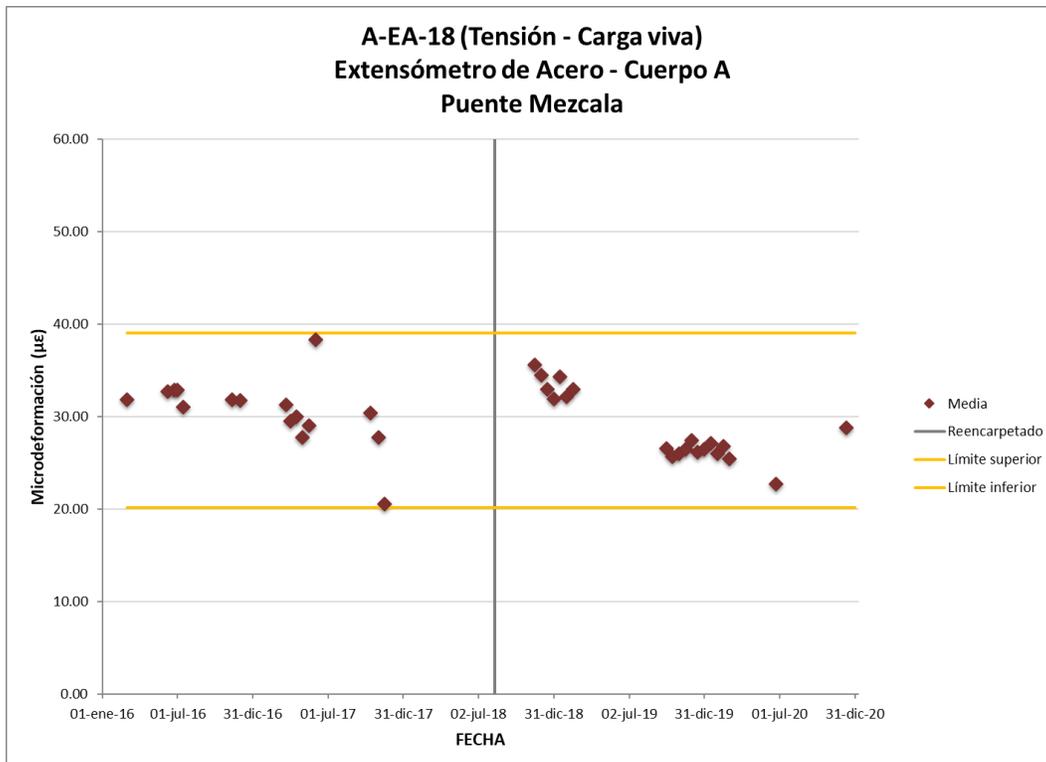


Figura 3.138 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-18

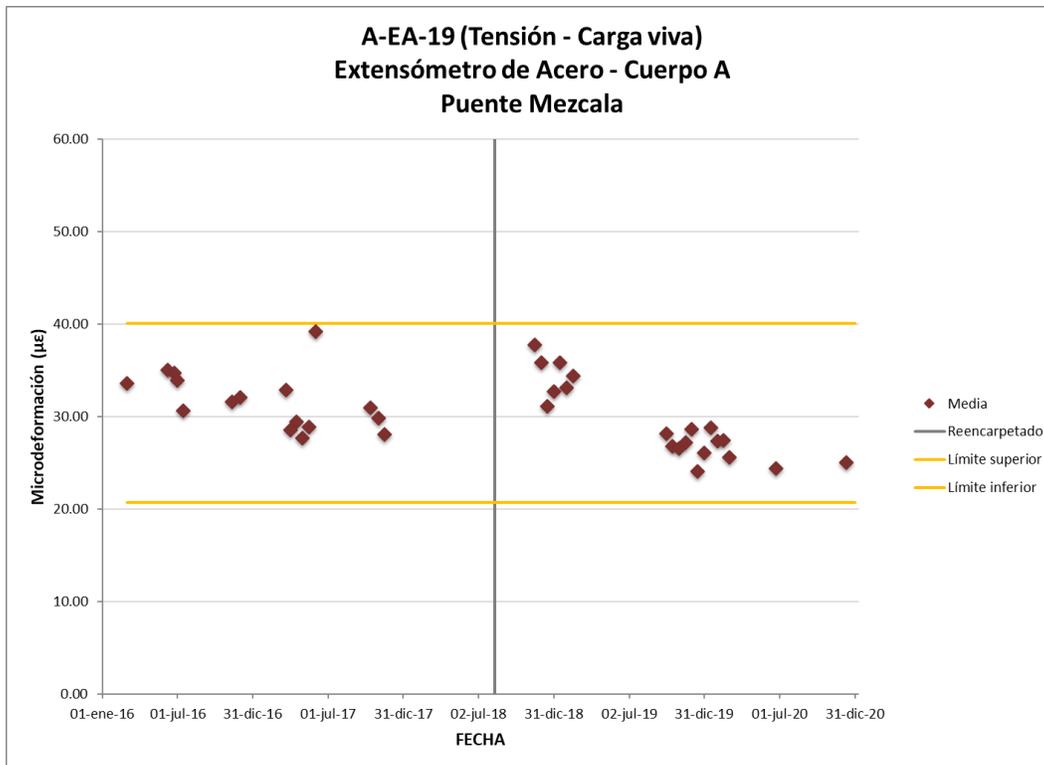


Figura 3.139 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-19

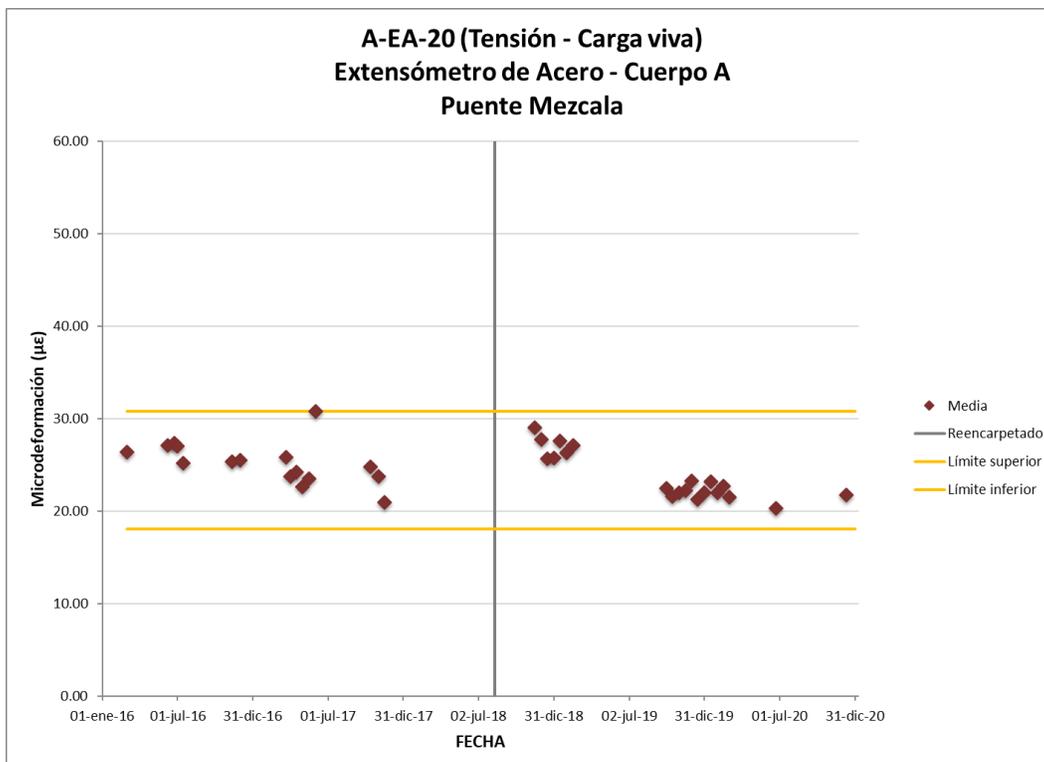


Figura 3.140 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-20

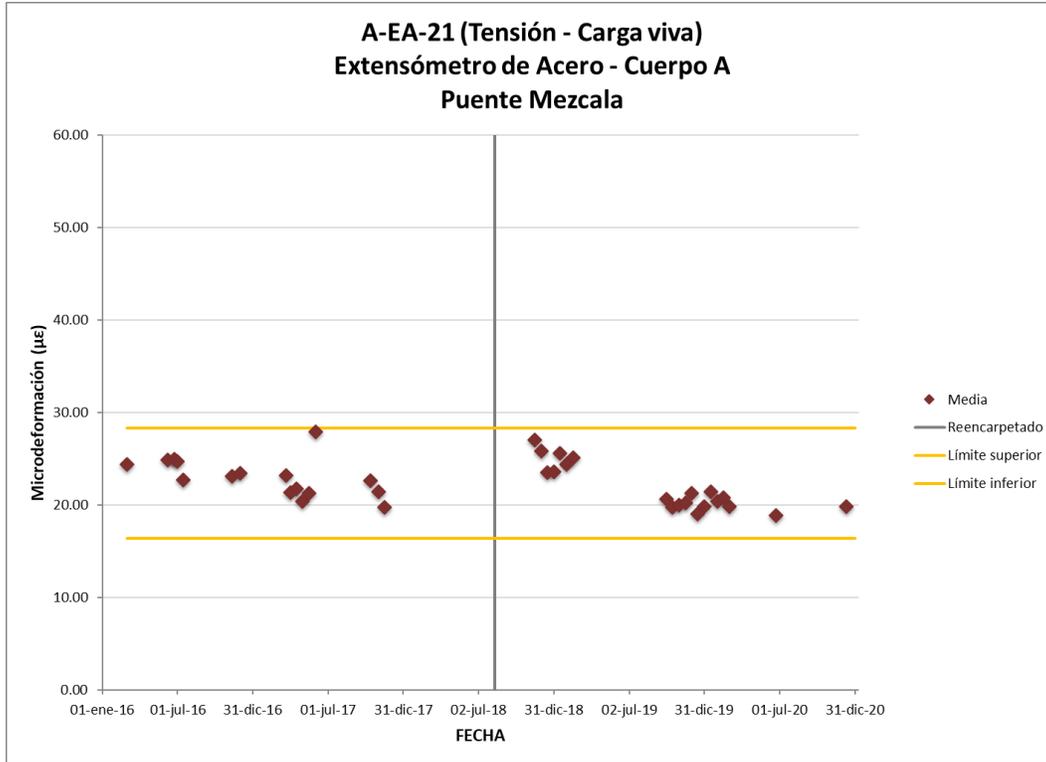


Figura 3.141 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-21

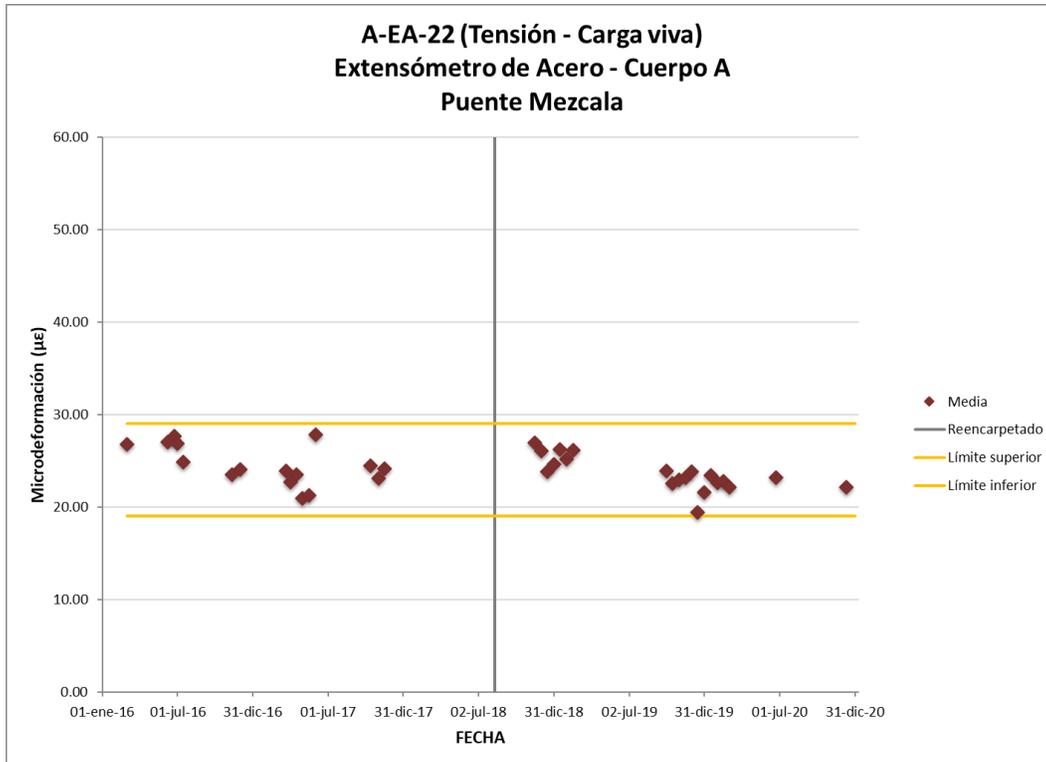


Figura 3.142 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-22

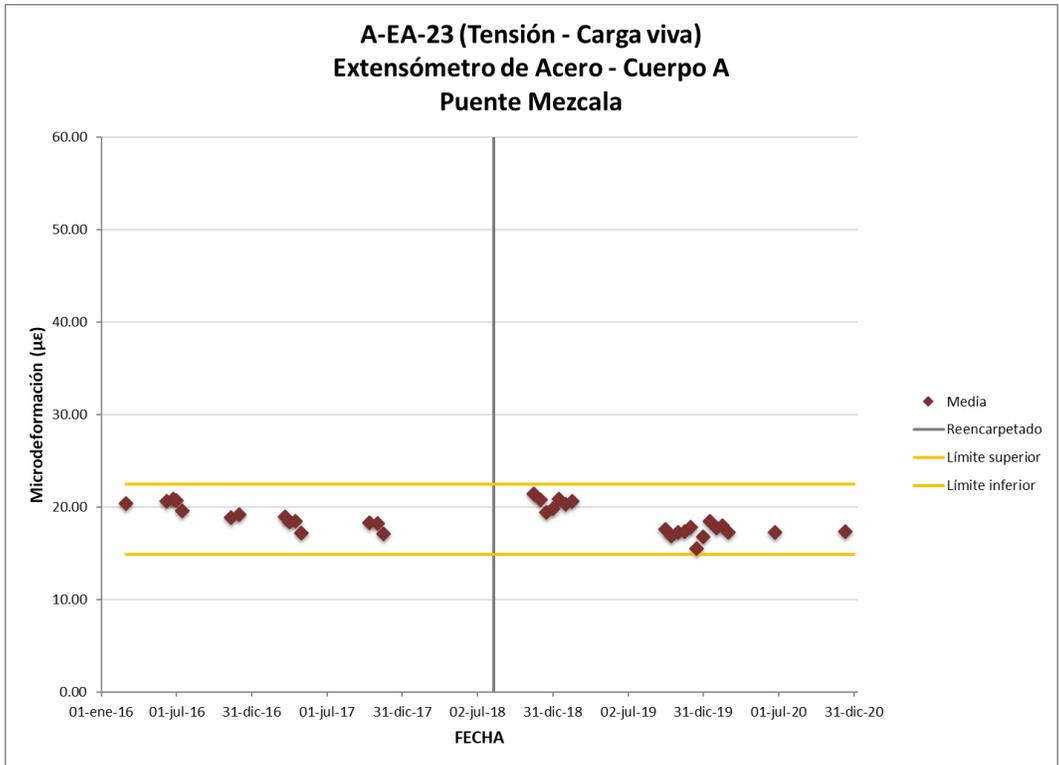


Figura 3.143 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-23

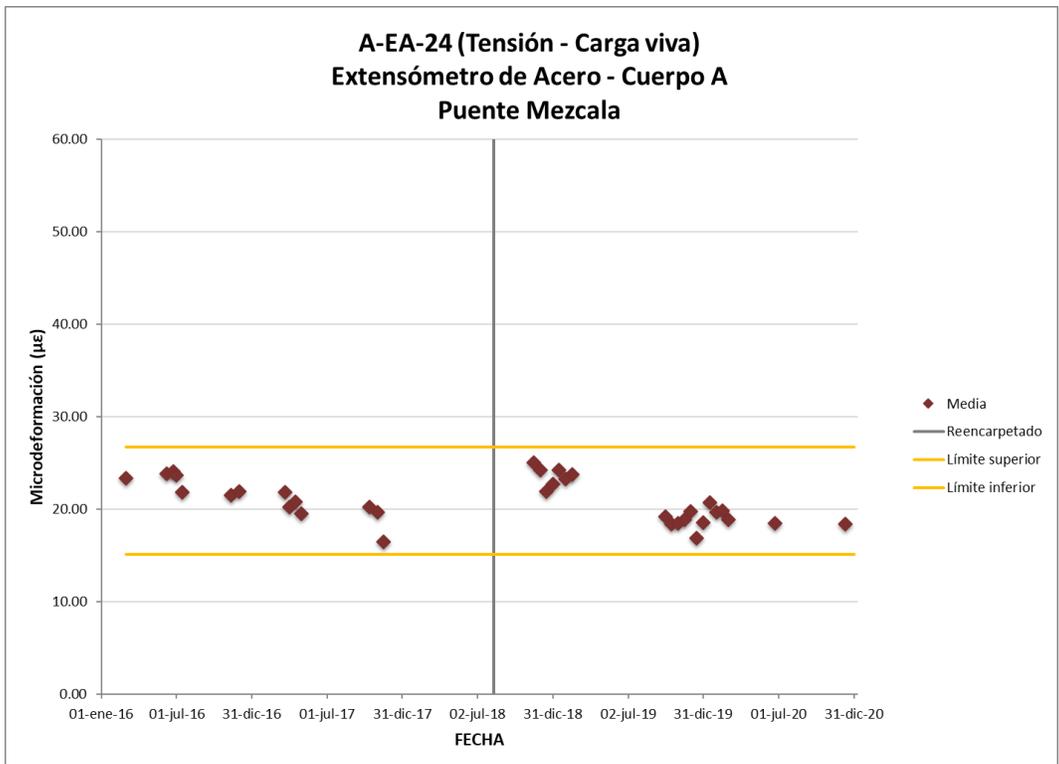


Figura 3.144 Media a tensión por cargas vivas sensor A-EA-24

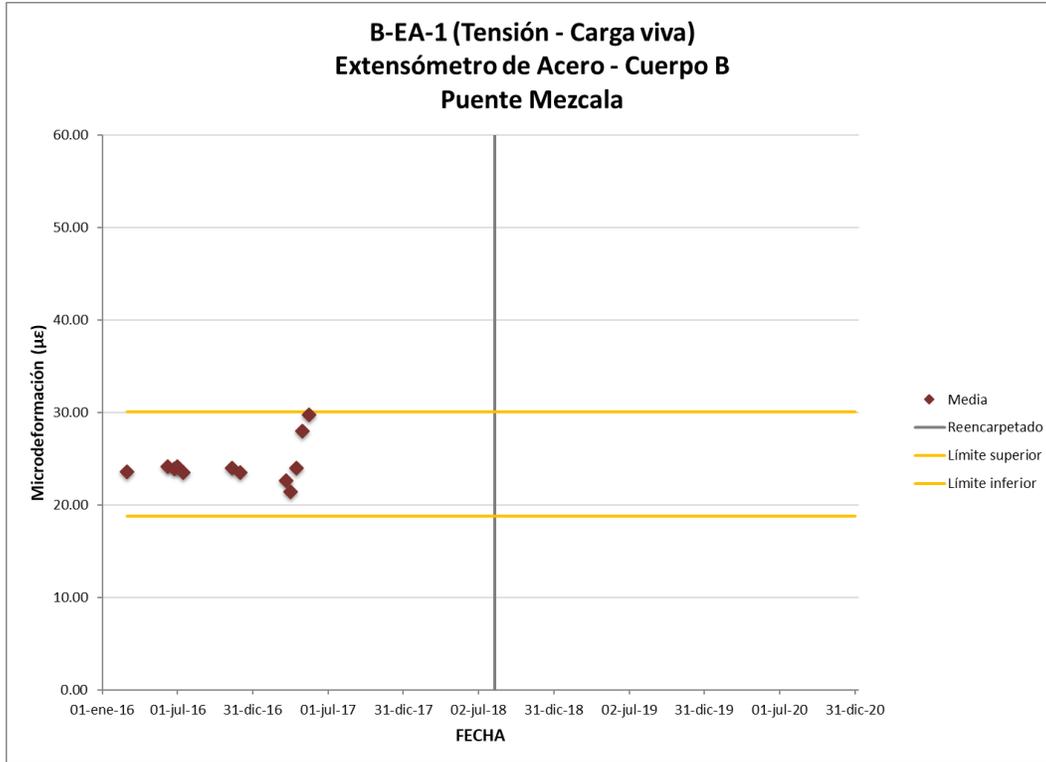


Figura 3.145 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-1

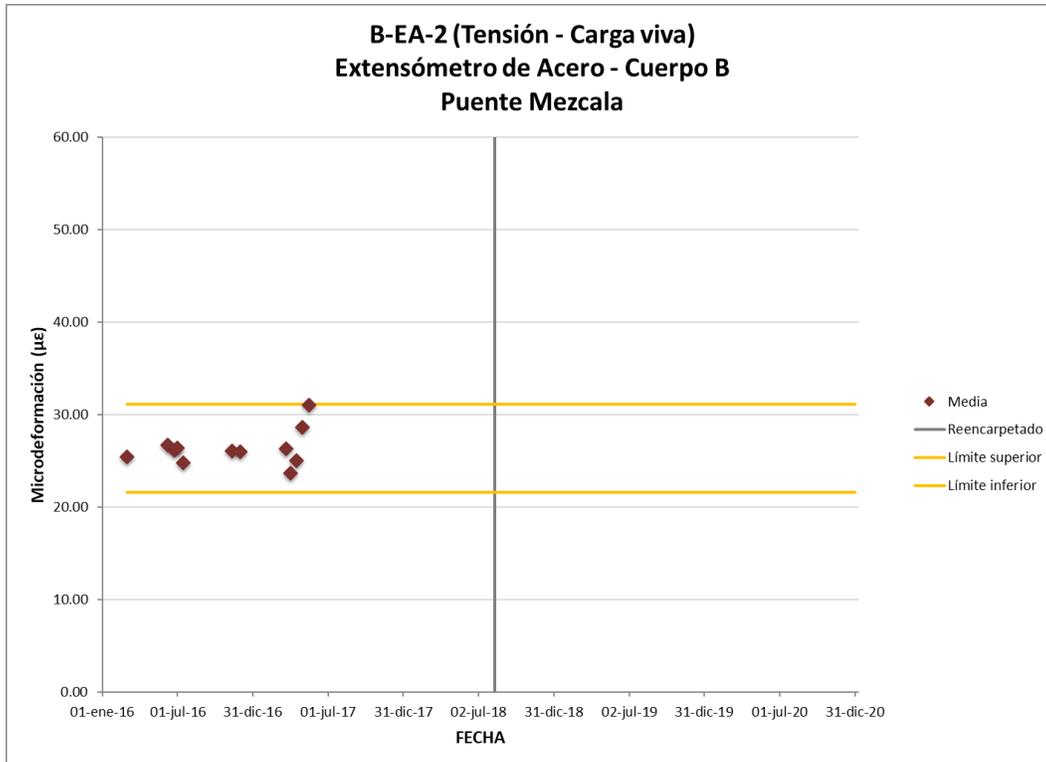


Figura 3.146 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-2

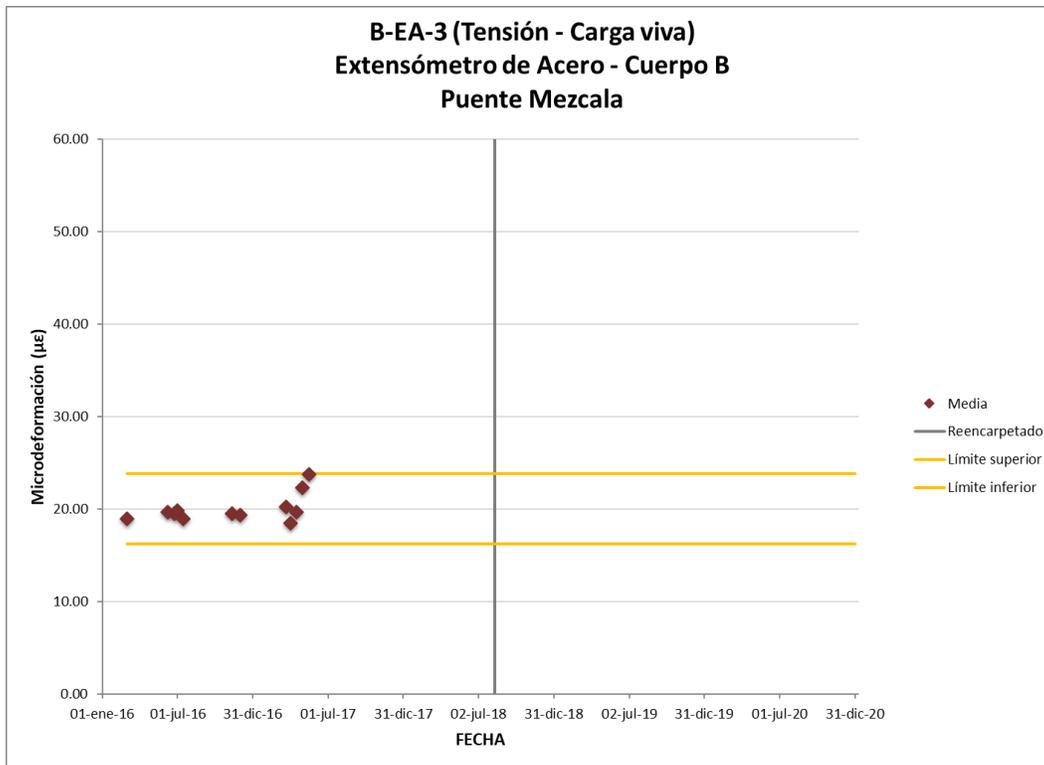


Figura 3.147 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-3

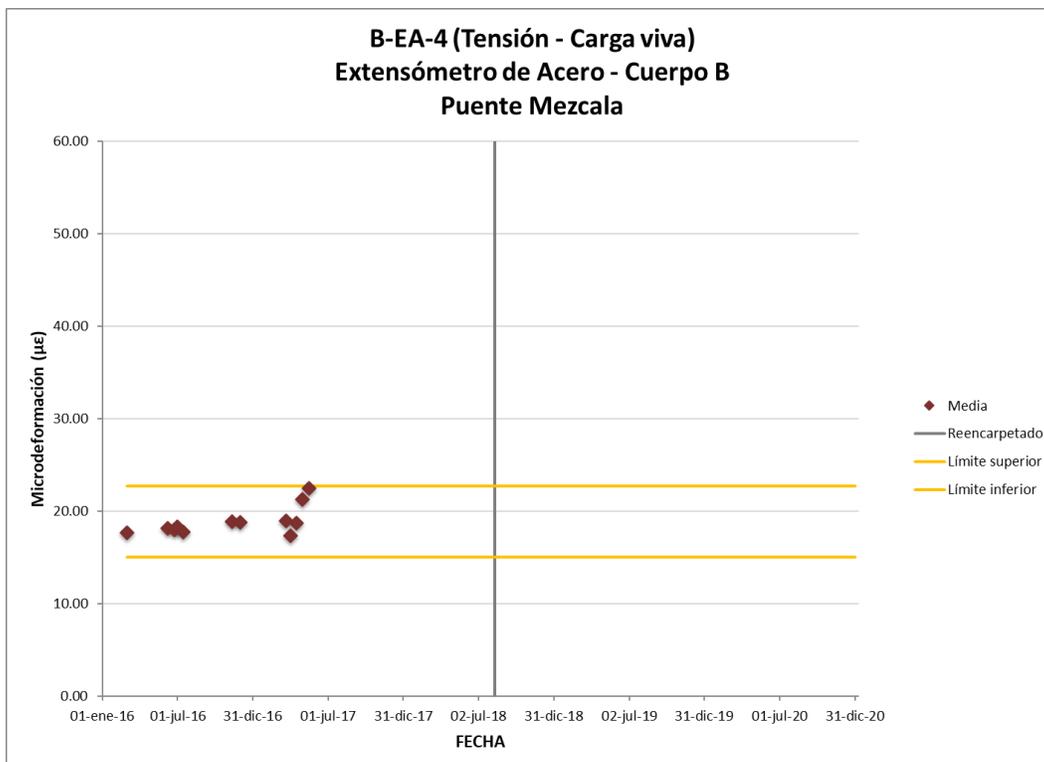


Figura 3.148 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-4

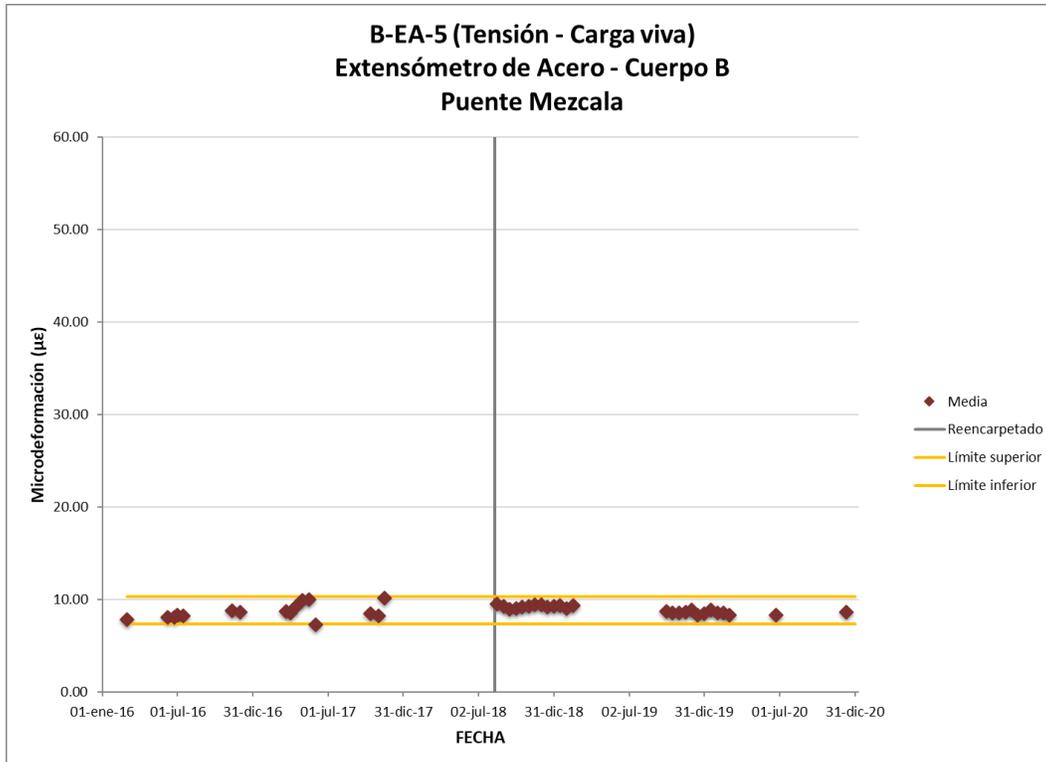


Figura 3.149 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-5

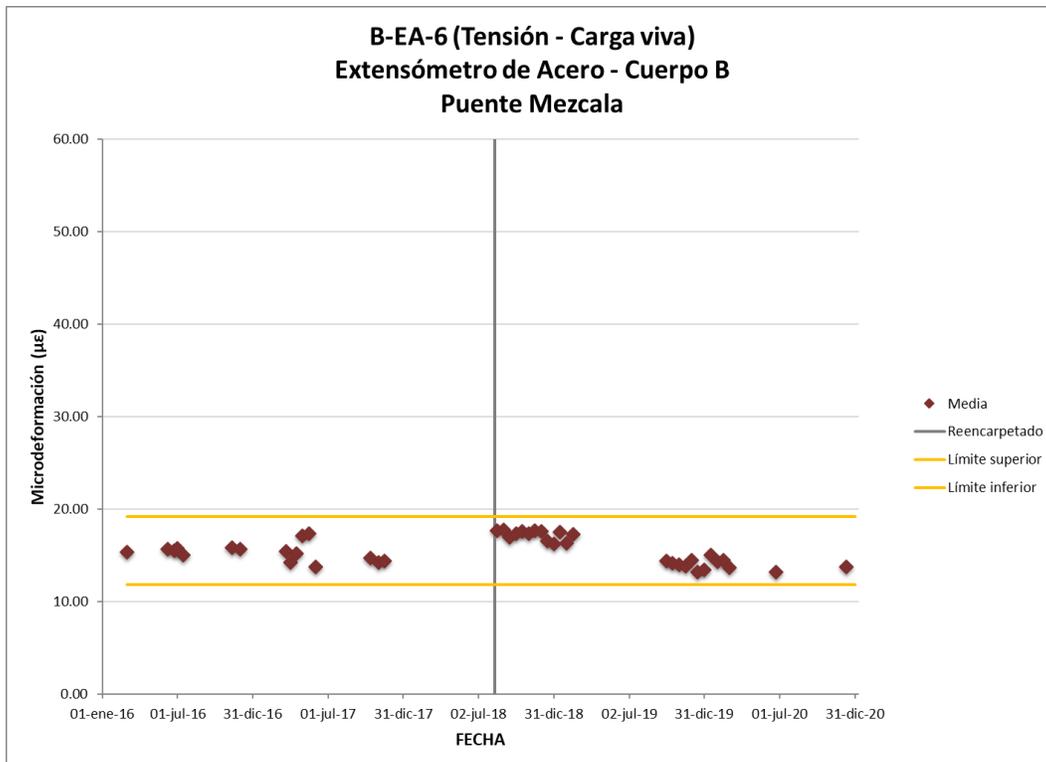


Figura 3.150 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-6

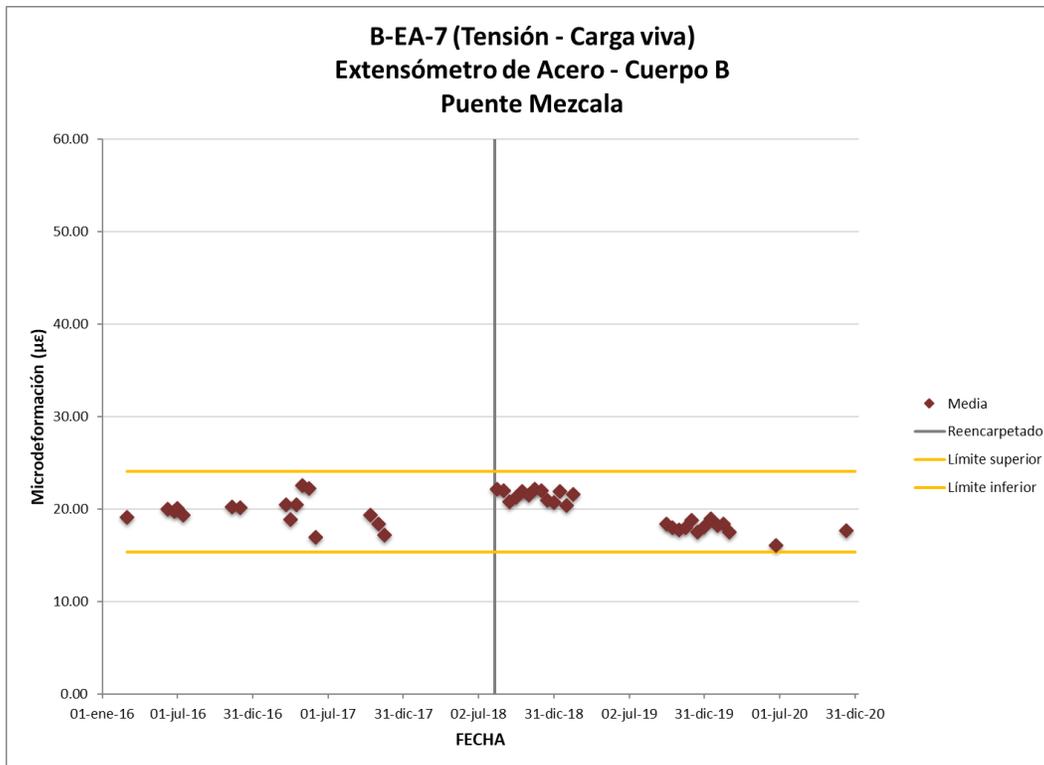


Figura 3.151 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-7

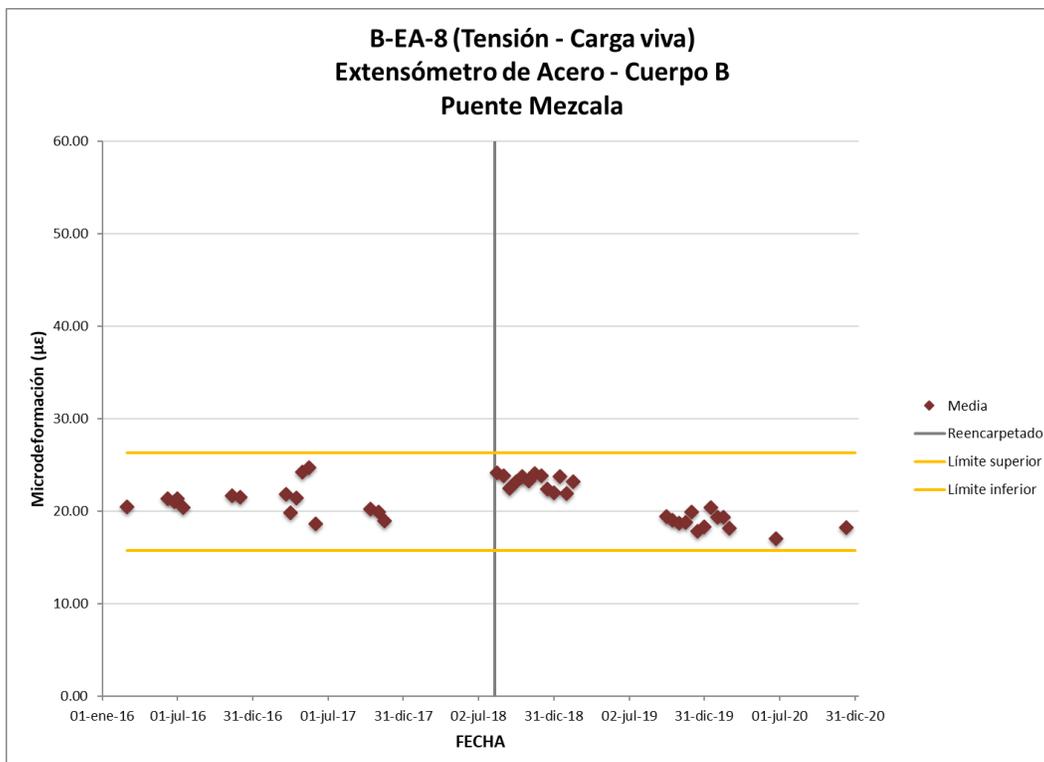


Figura 3.152 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-8

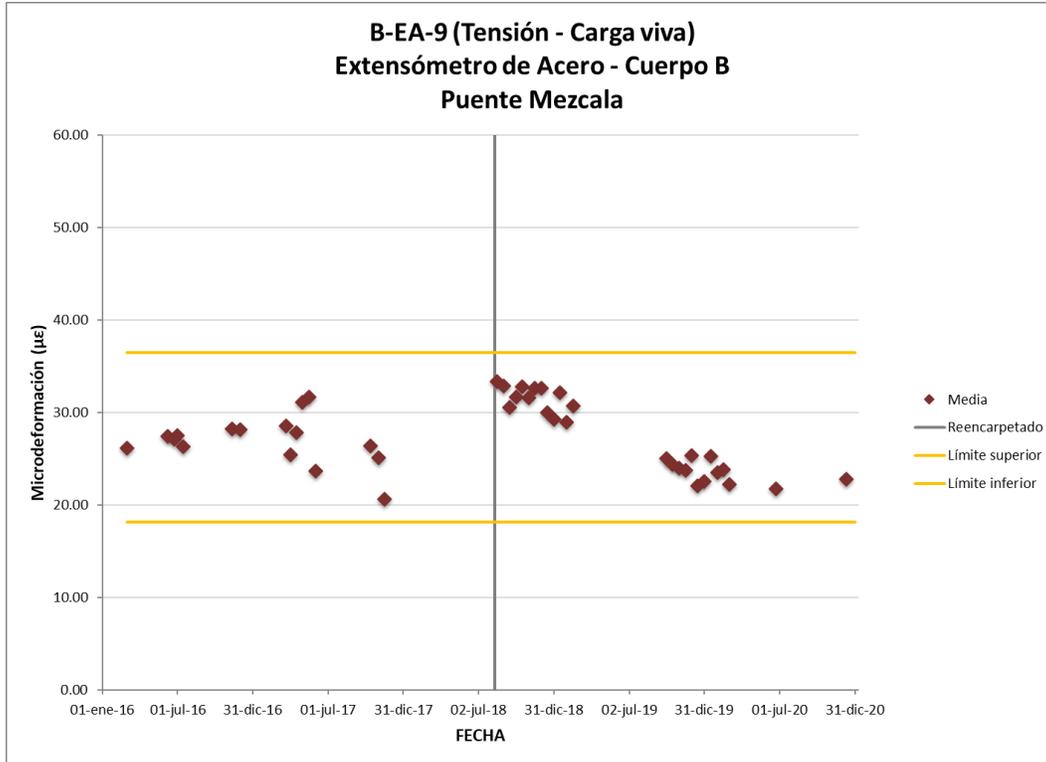


Figura 3.153 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-9

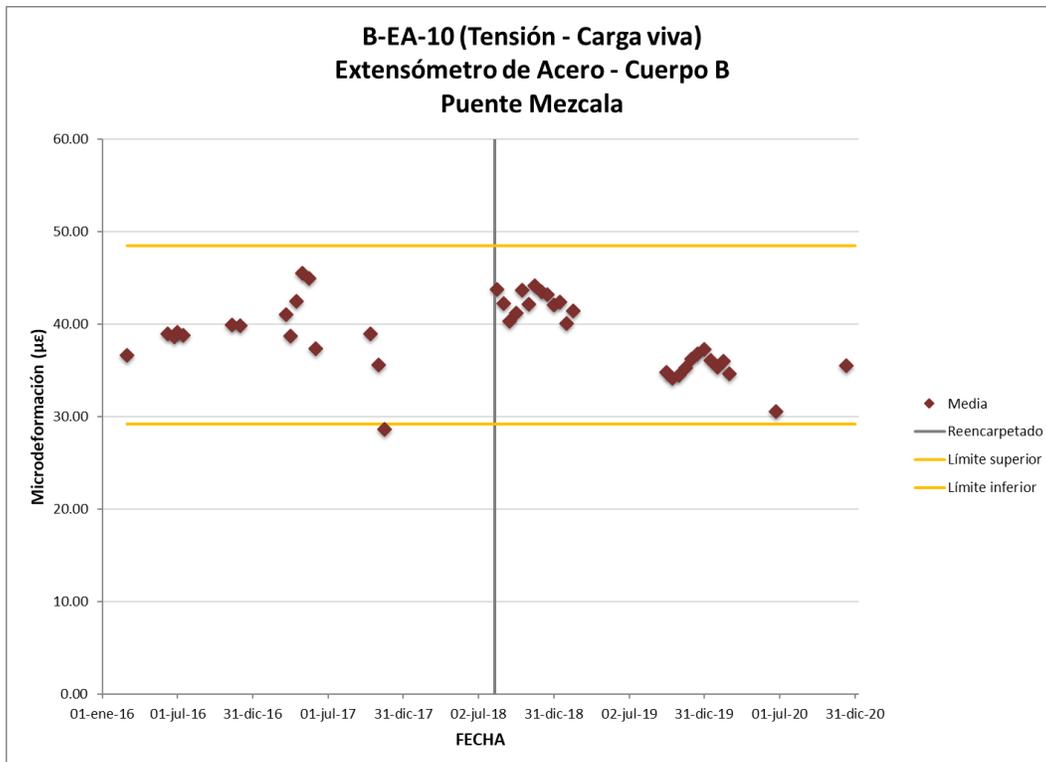


Figura 3.154 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-10

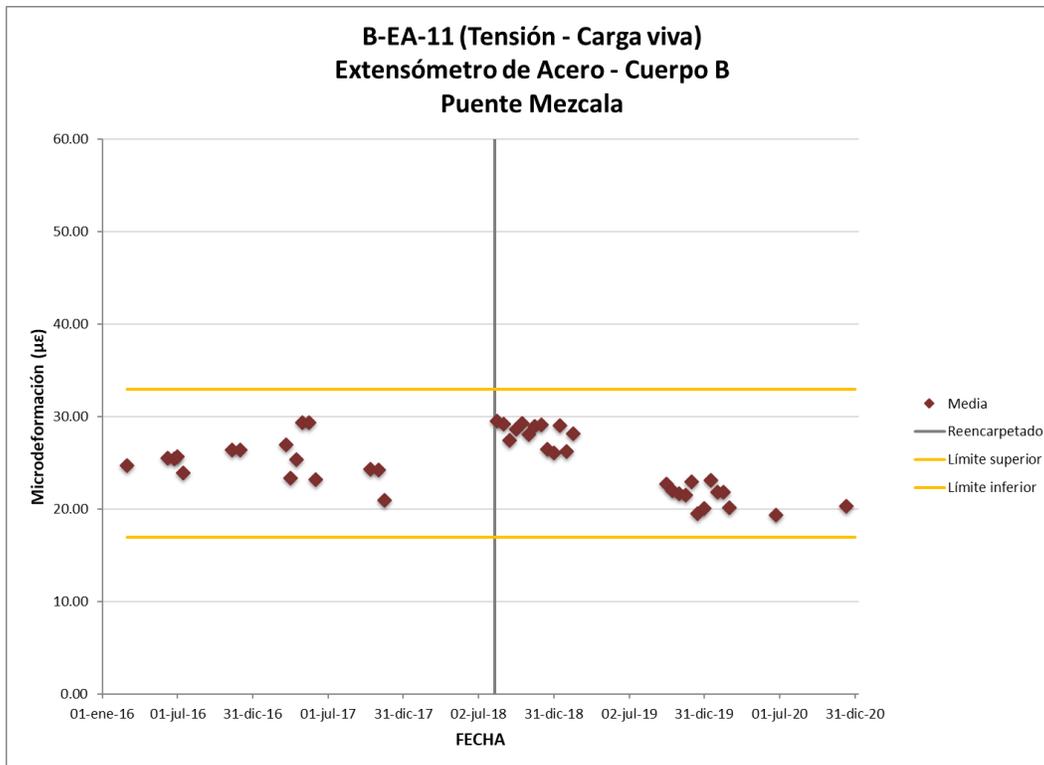


Figura 3.155 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-11

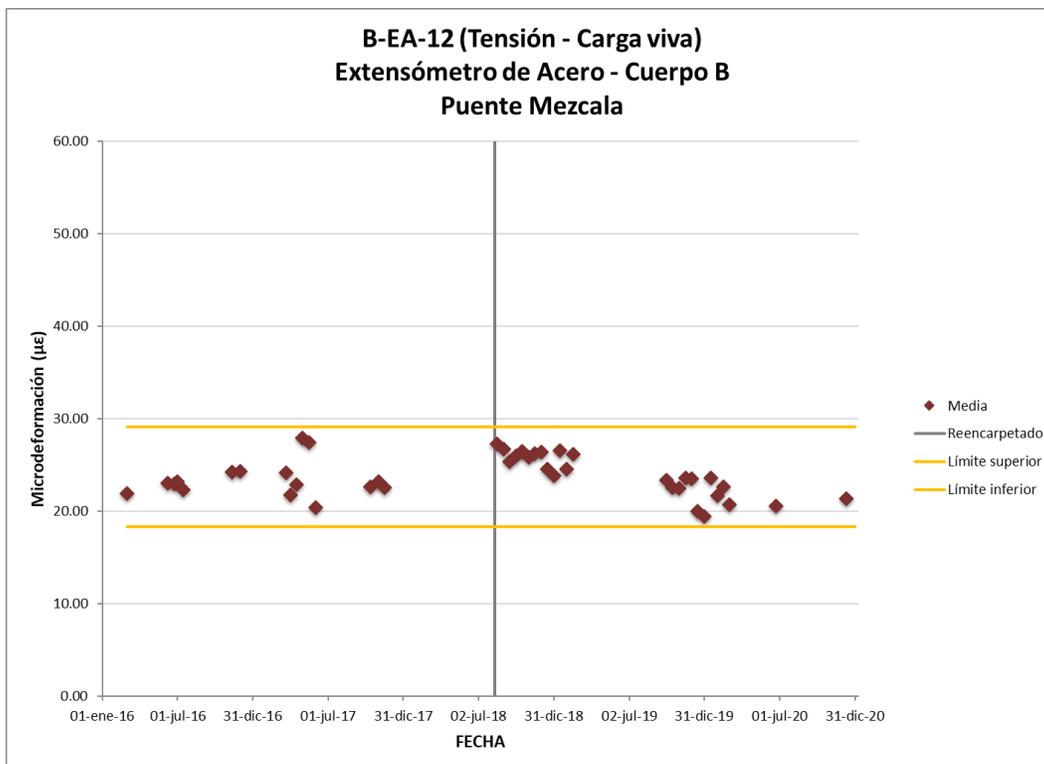


Figura 3.156 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-12

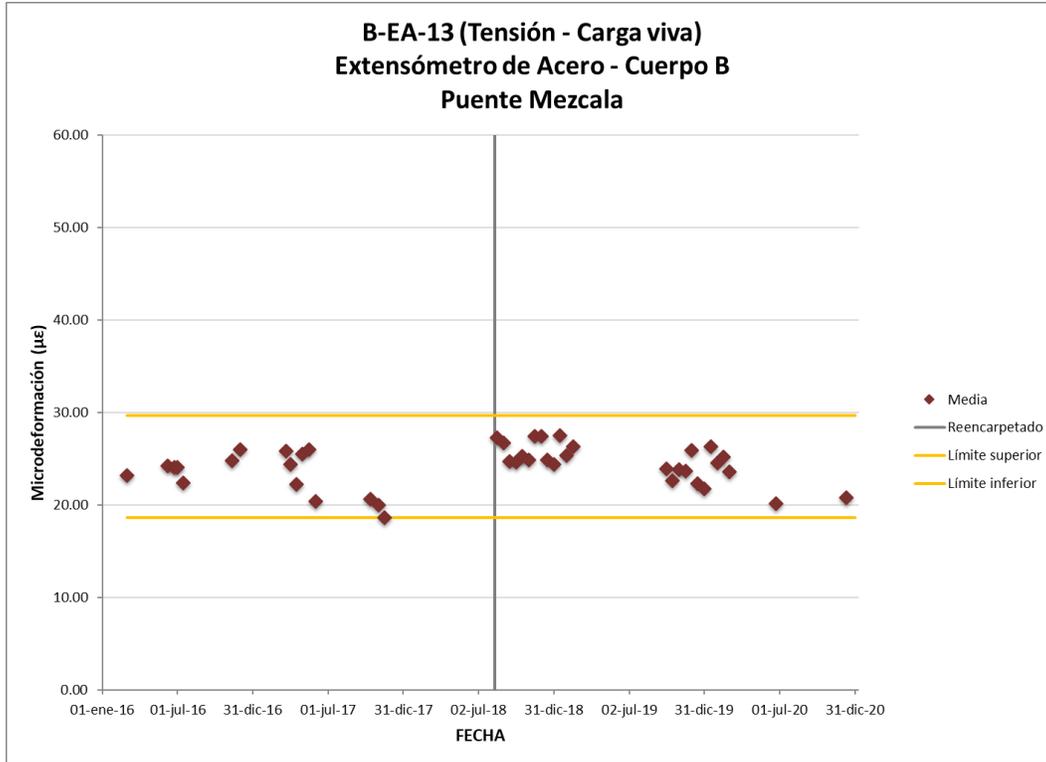


Figura 3.157 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-13

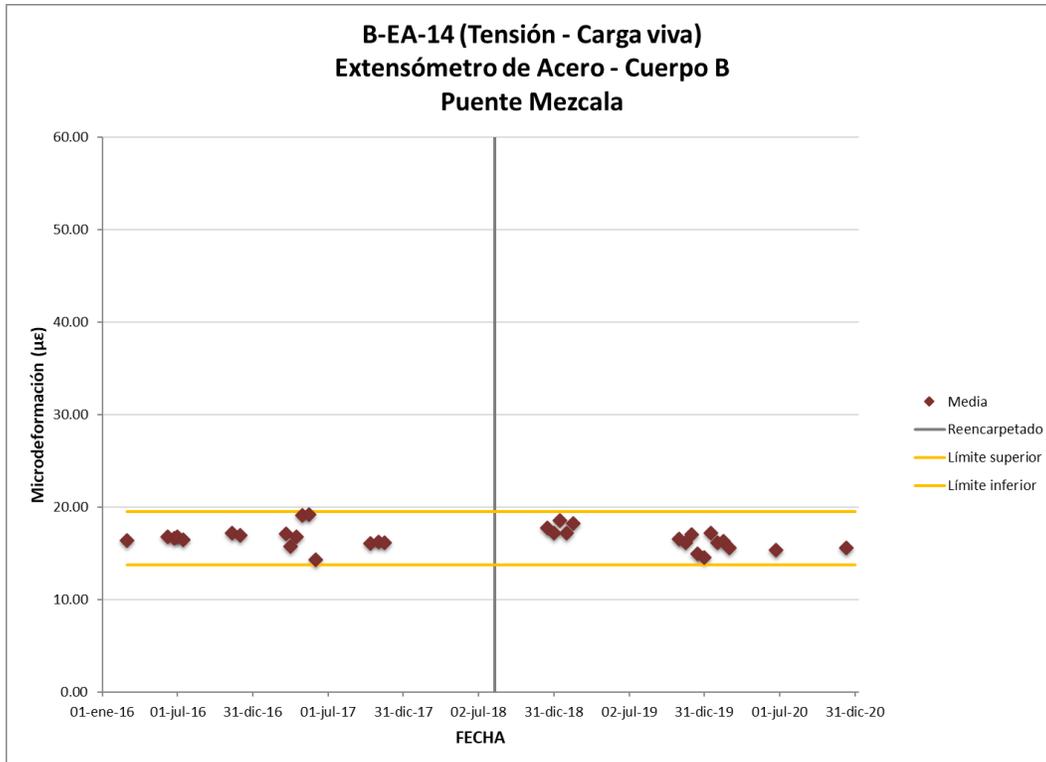


Figura 3.158 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-14

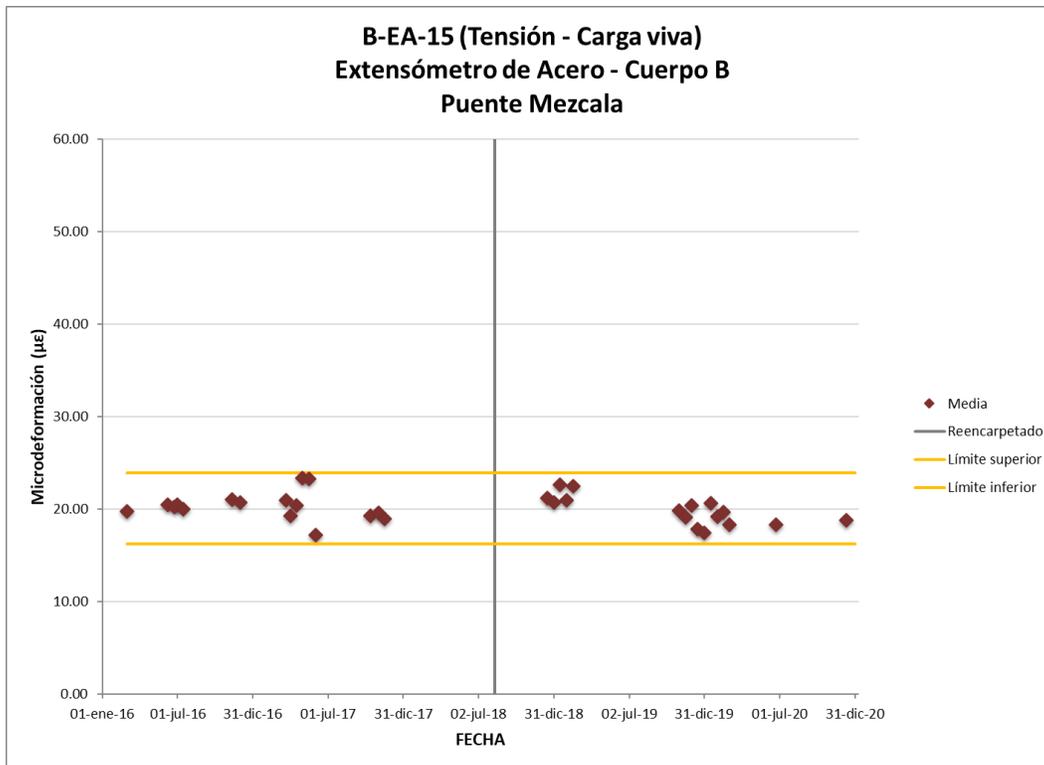


Figura 3.159 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-15

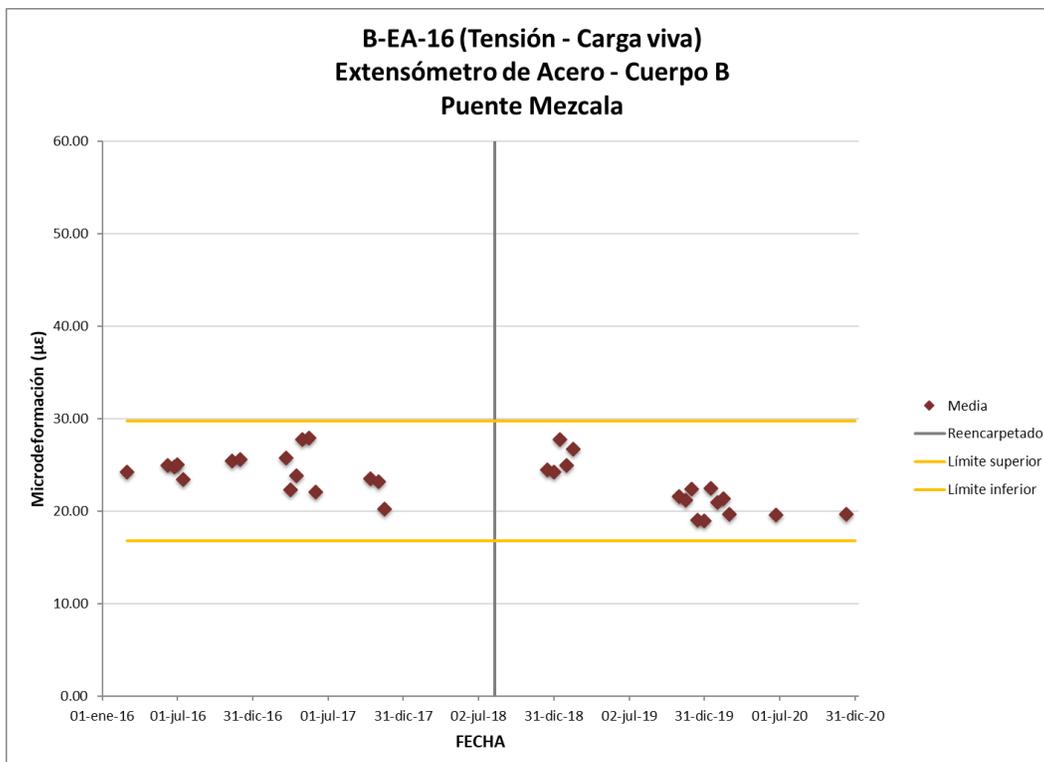


Figura 3.160 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-16

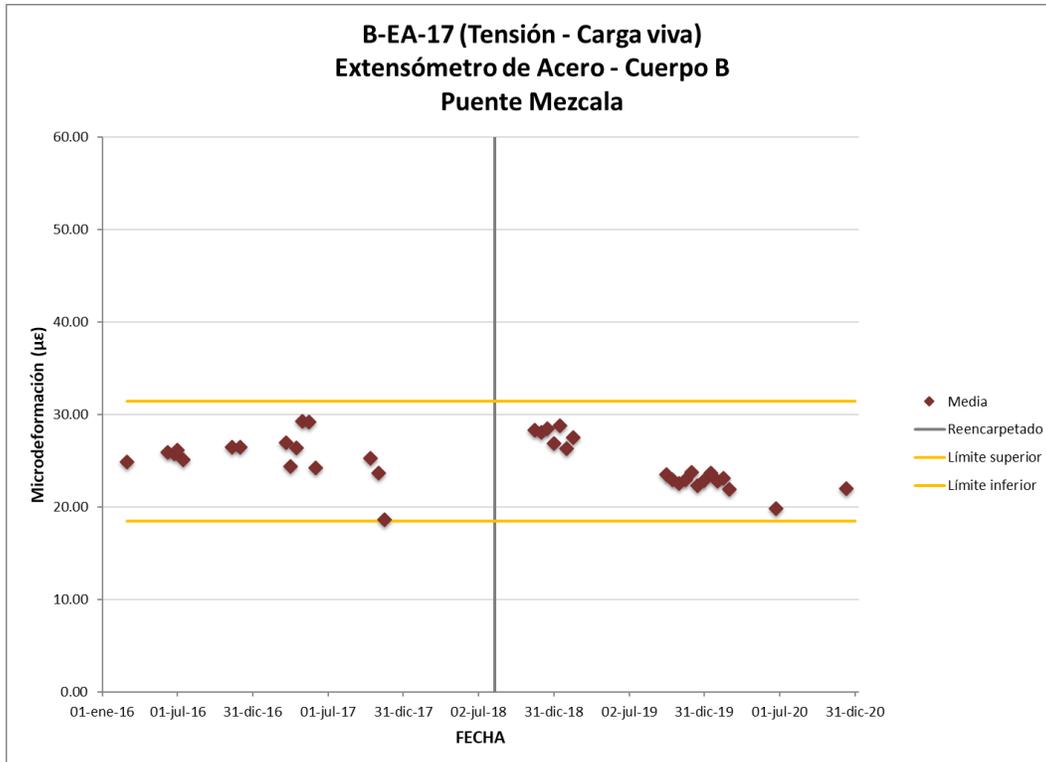


Figura 3.161 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-17

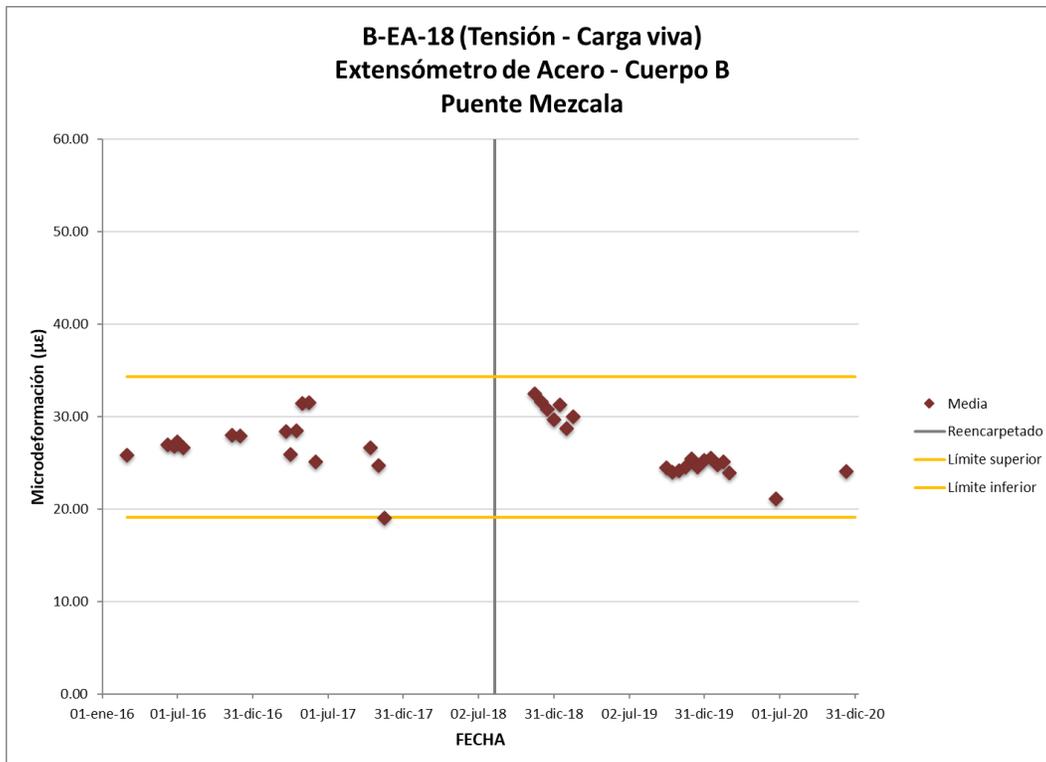


Figura 3.162 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-18

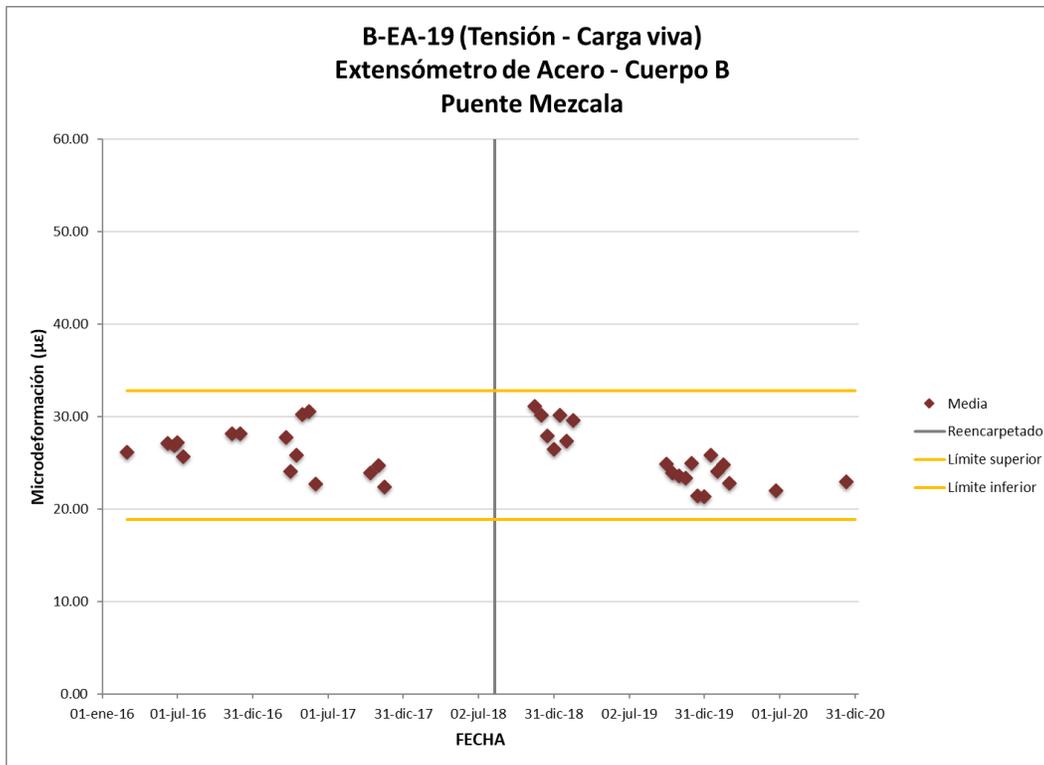


Figura 3.163 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-19

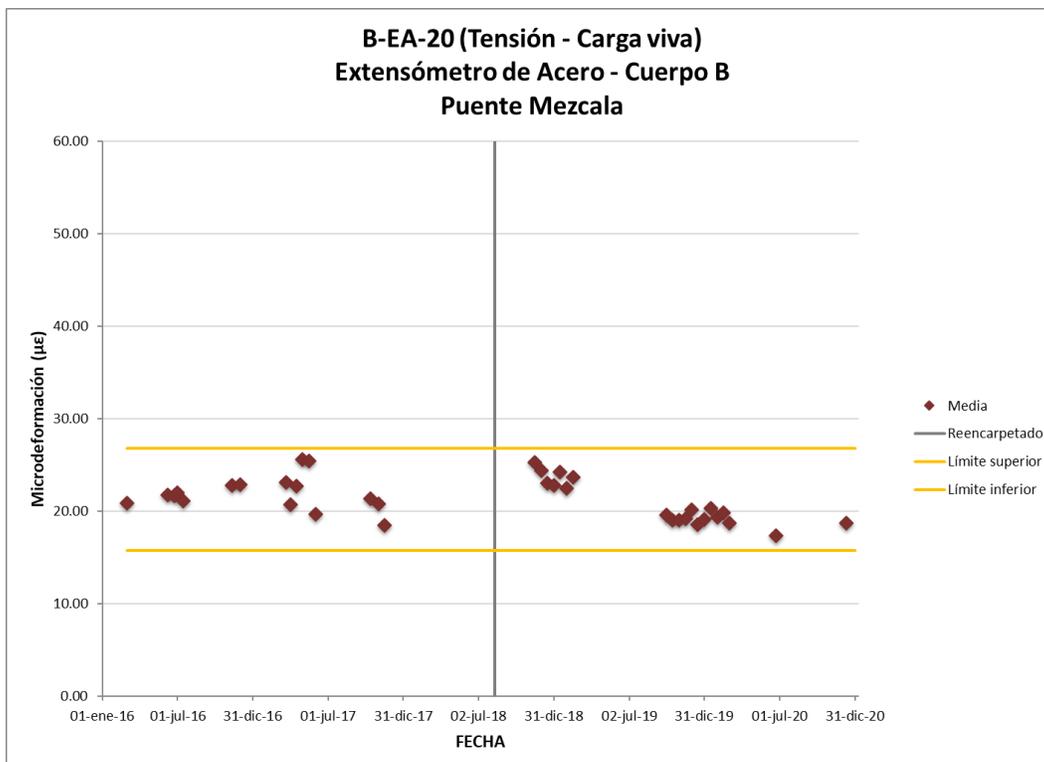


Figura 3.164 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-20

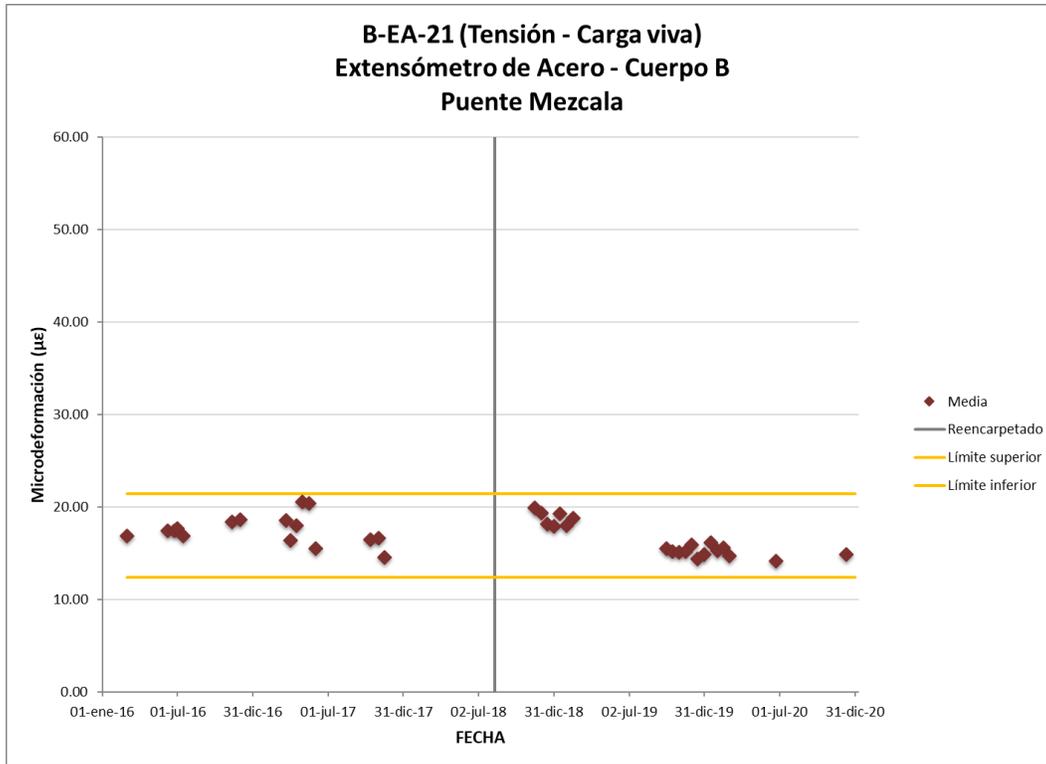


Figura 3.165 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-21

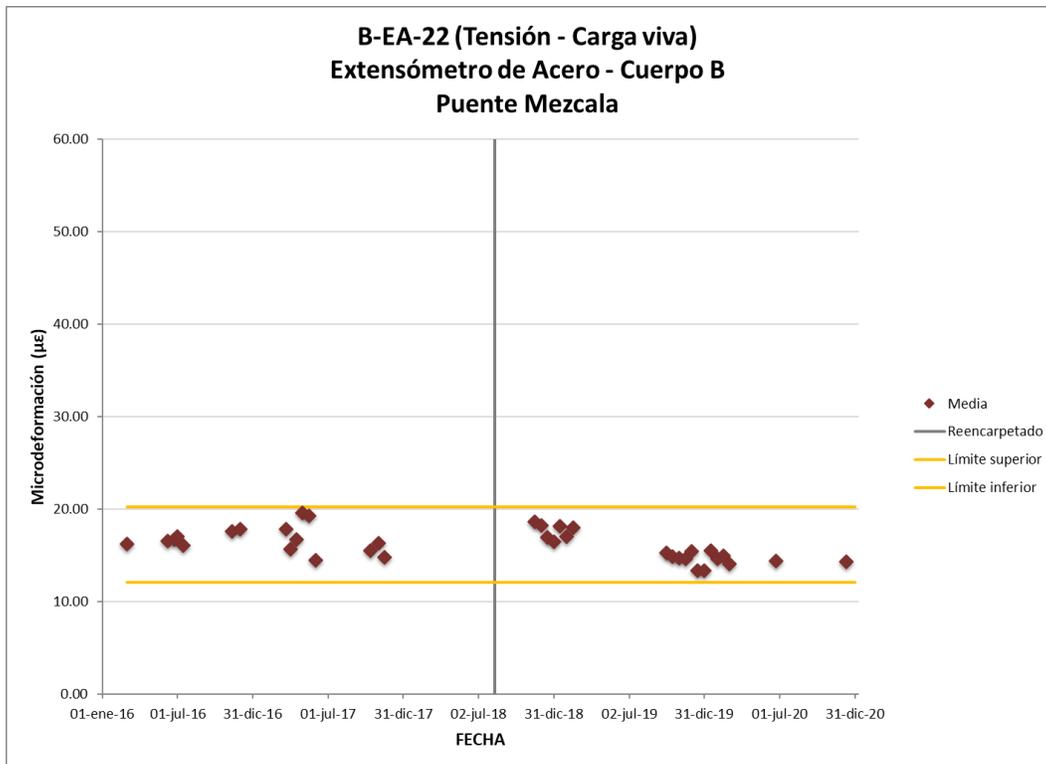


Figura 3.166 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-22

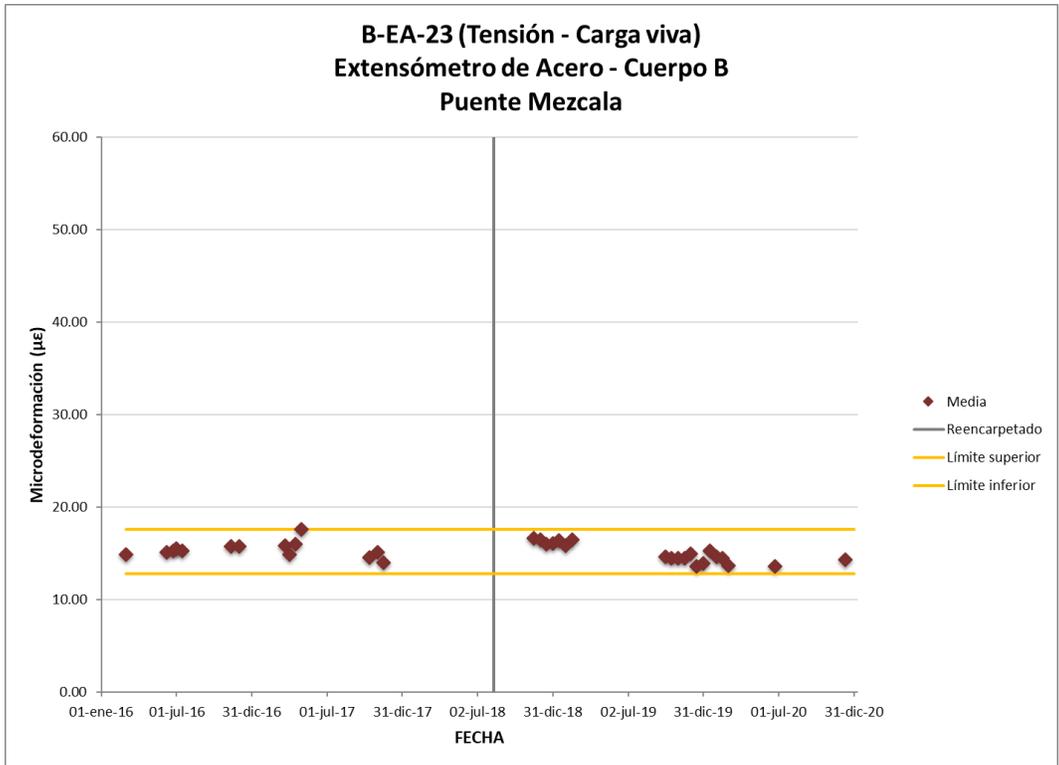


Figura 3.167 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-23

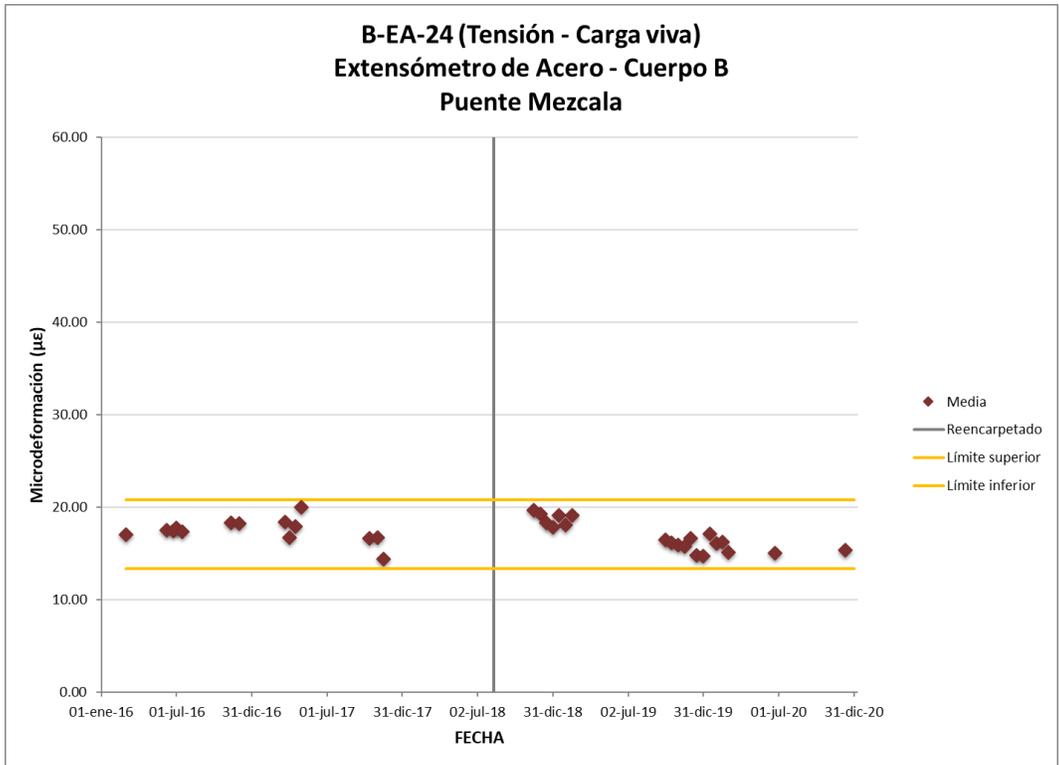


Figura 3.168 Media a tensión por cargas vivas sensor B-EA-24

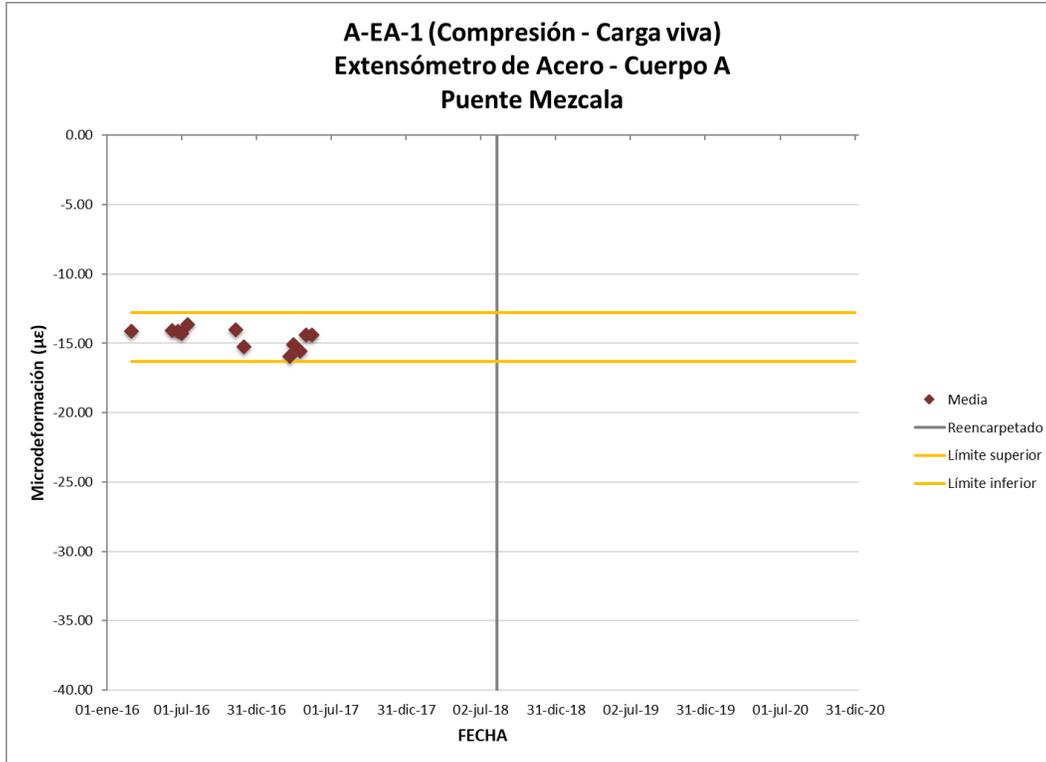


Figura 3.169 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-1

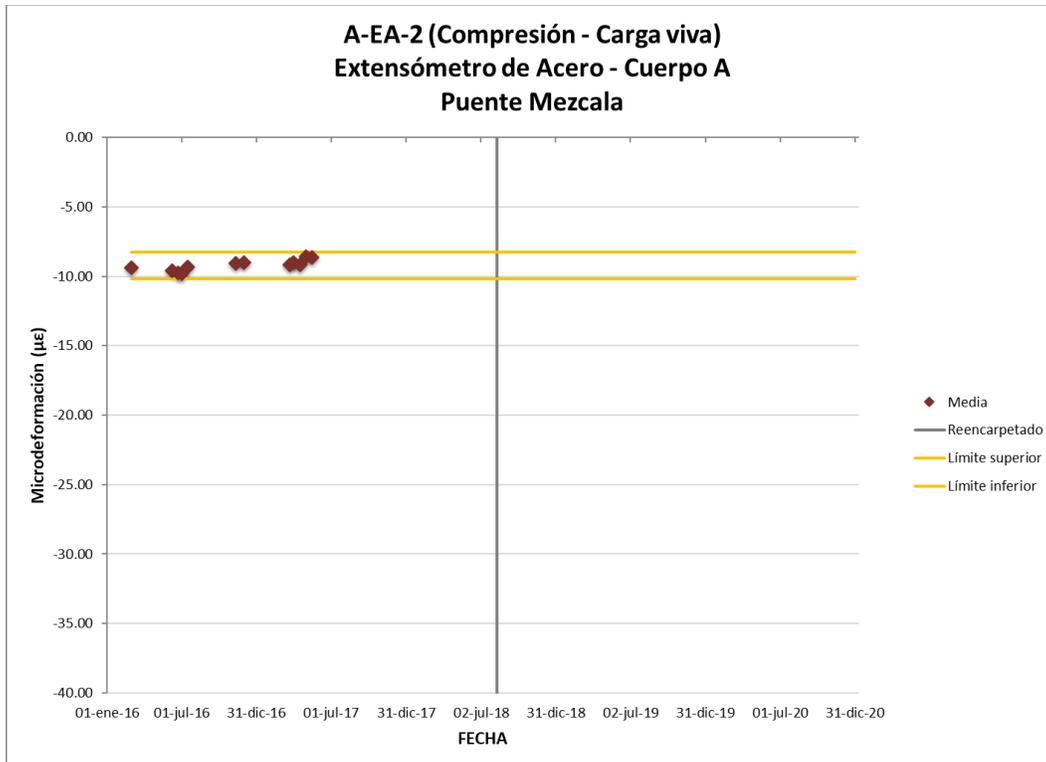


Figura 3.170 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-2

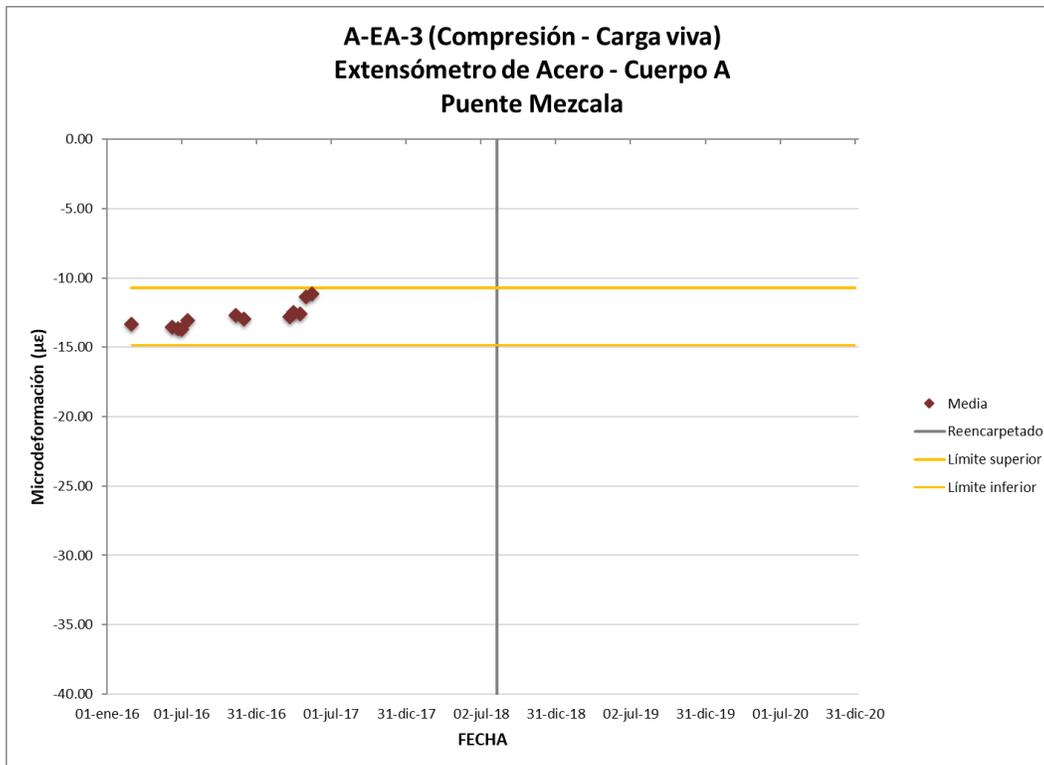


Figura 3.171 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-3

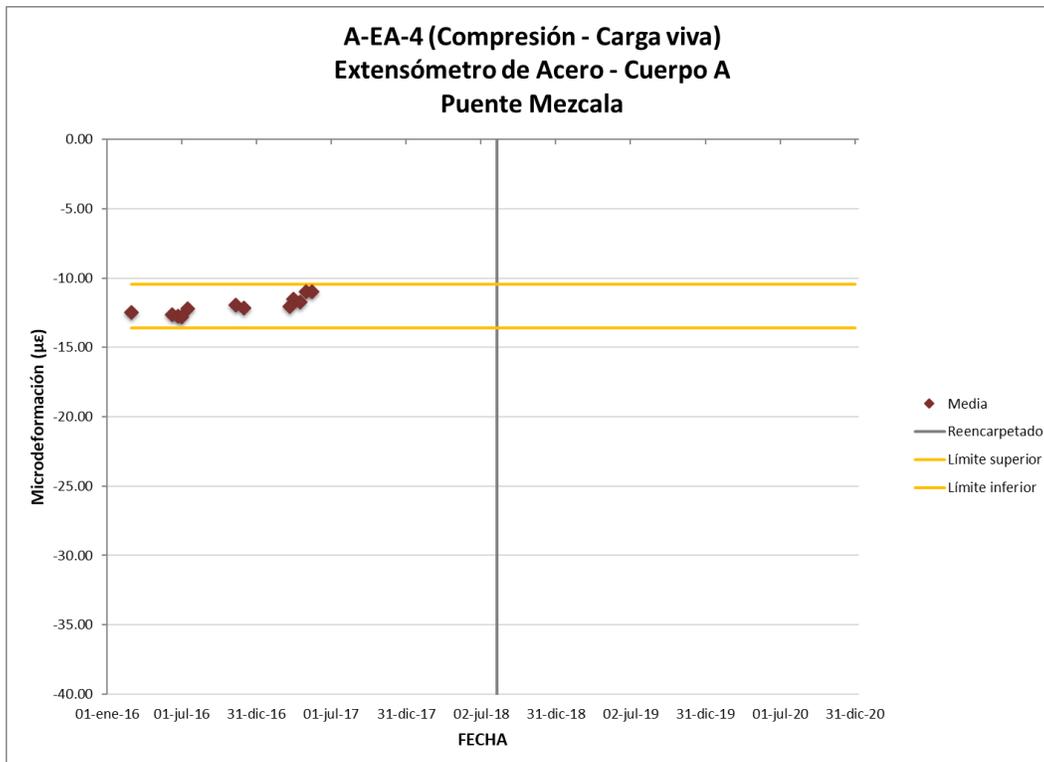


Figura 3.172 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-4

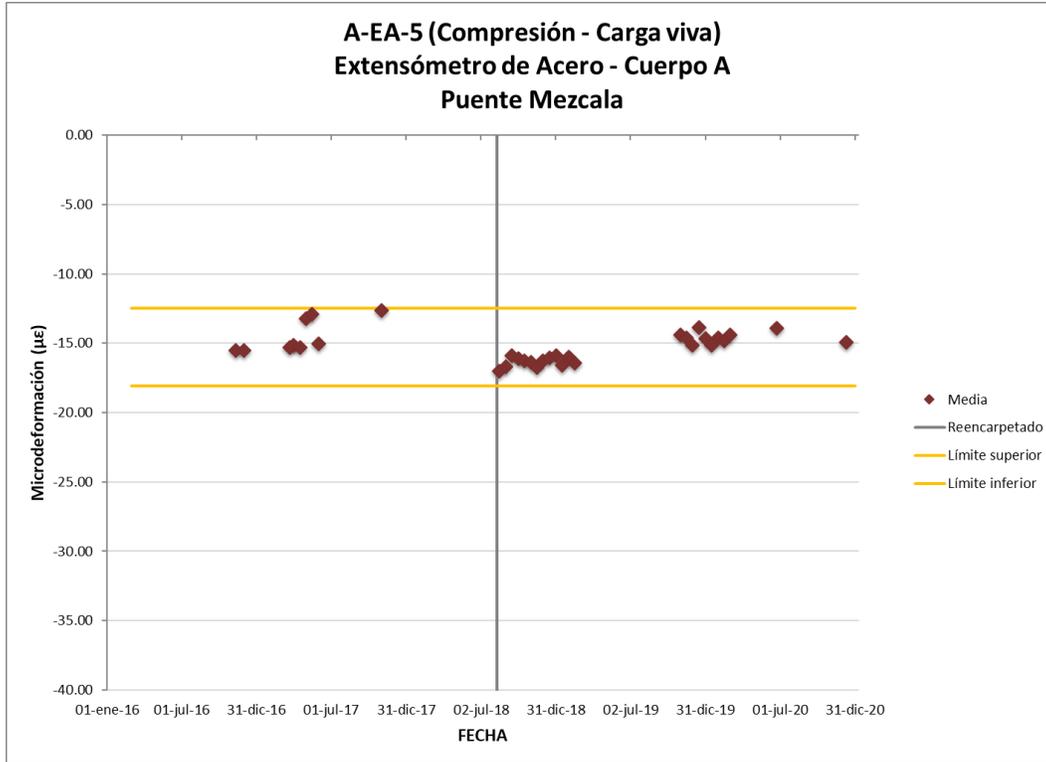


Figura 3.173 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-5

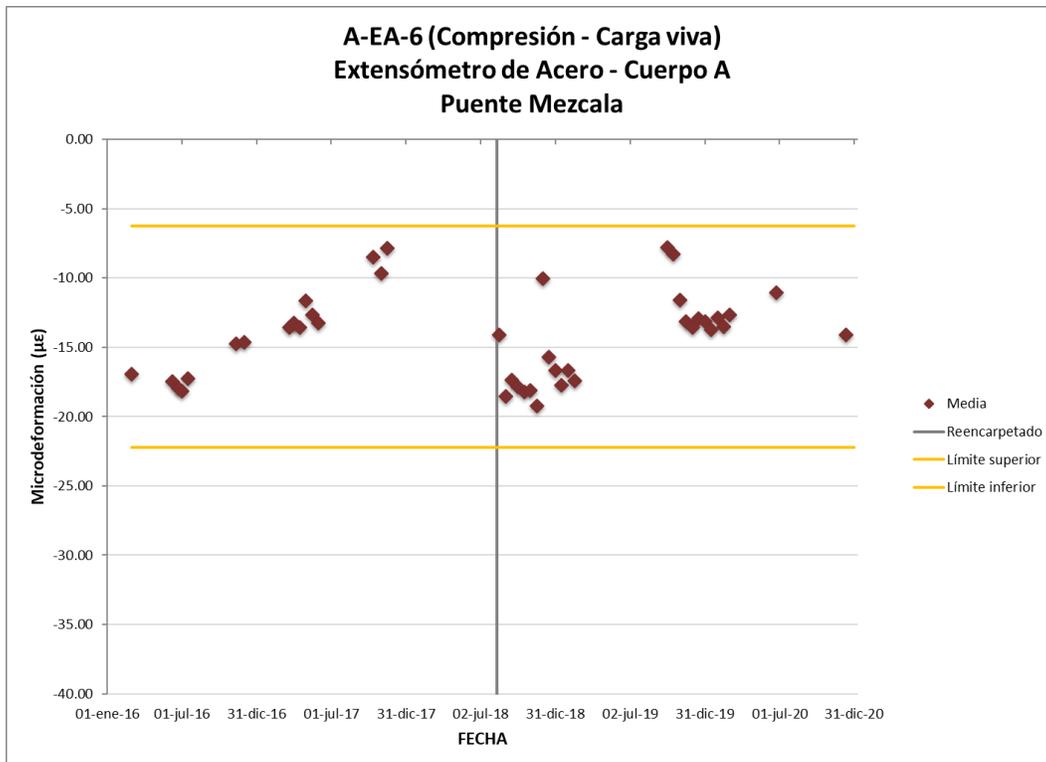


Figura 3.174 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-6

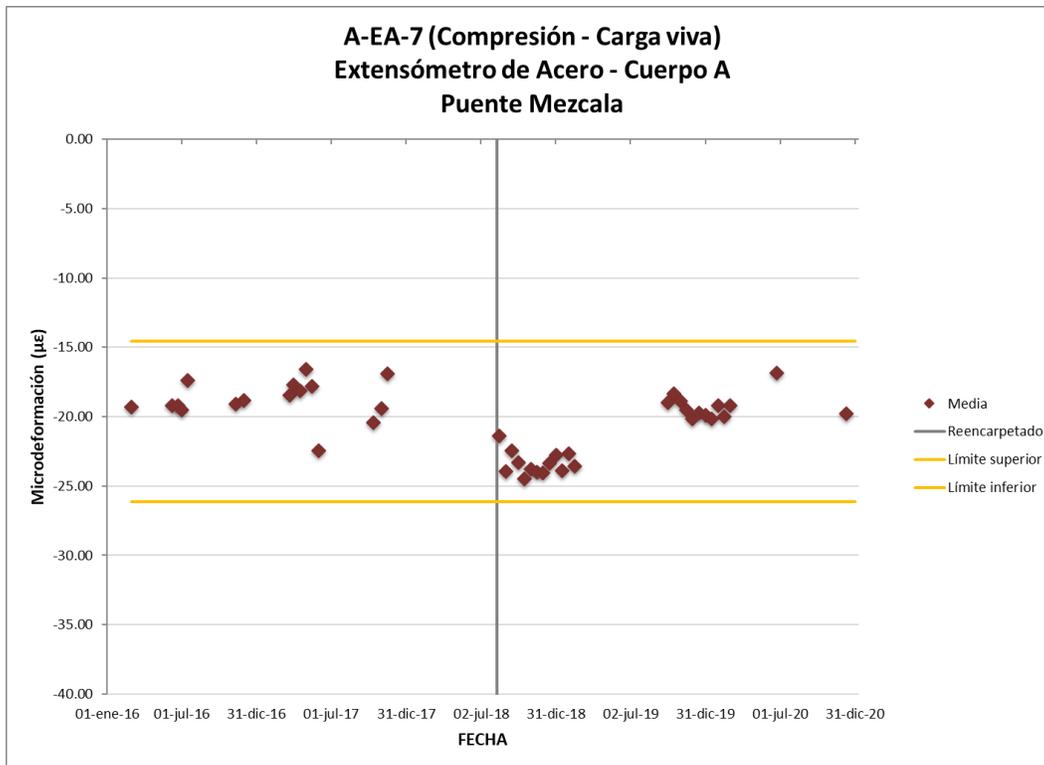


Figura 3.175 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-7

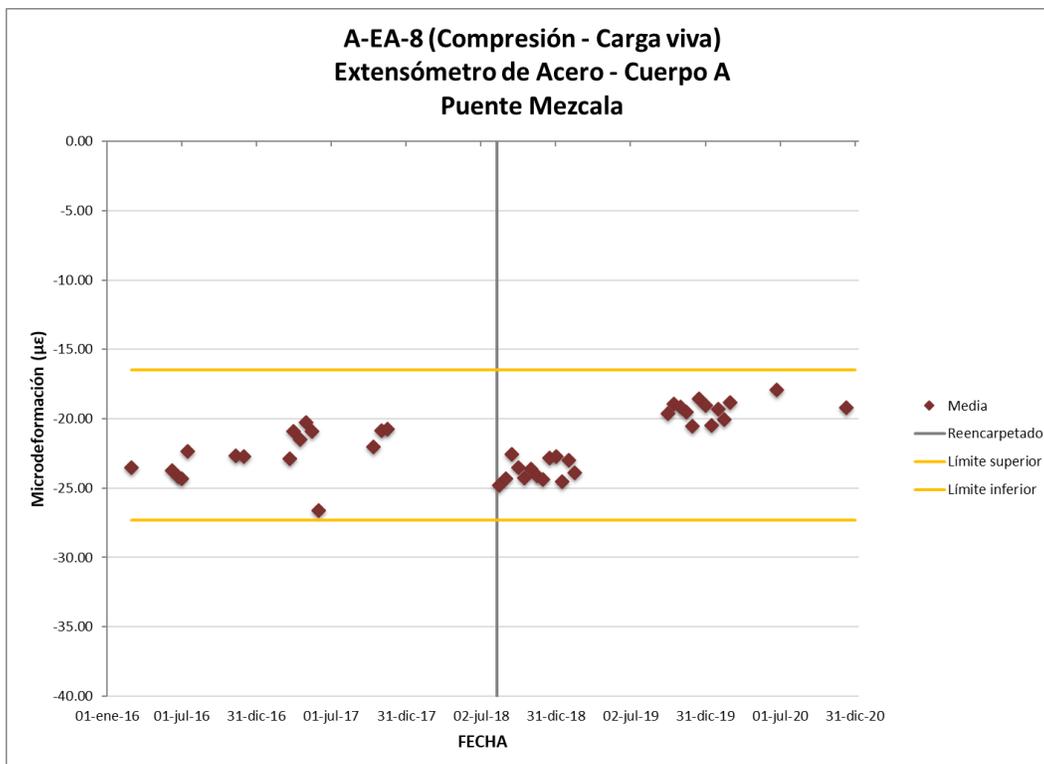


Figura 3.176 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-8

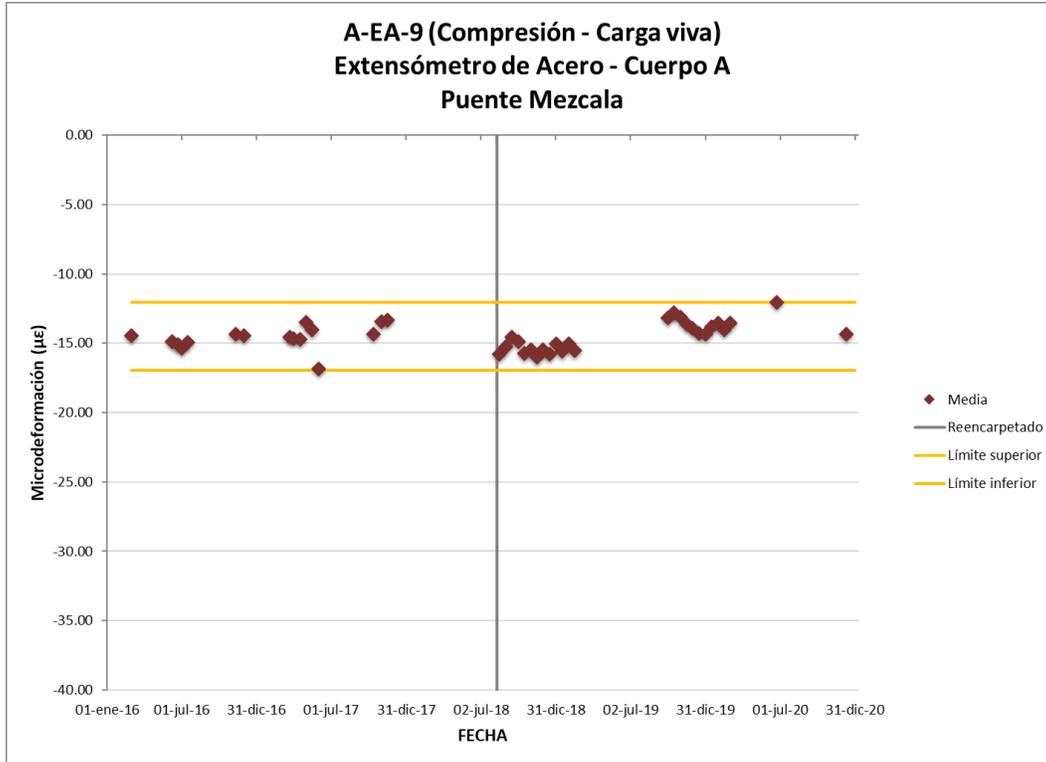


Figura 3.177 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-9

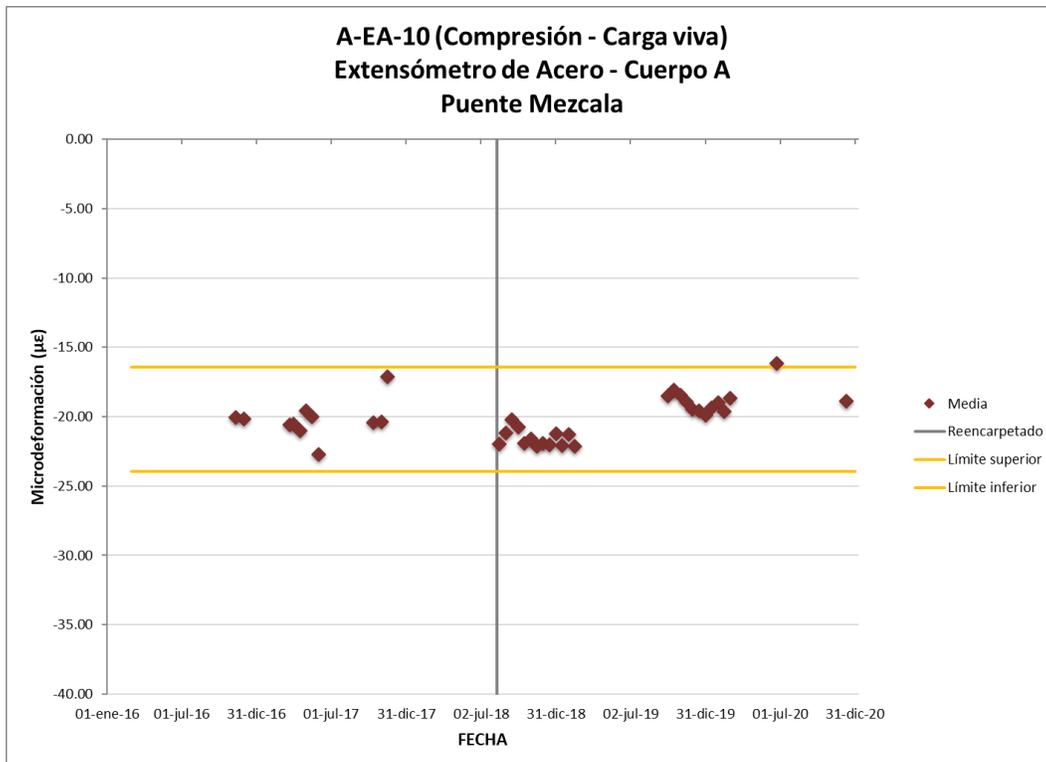


Figura 3.178 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-10

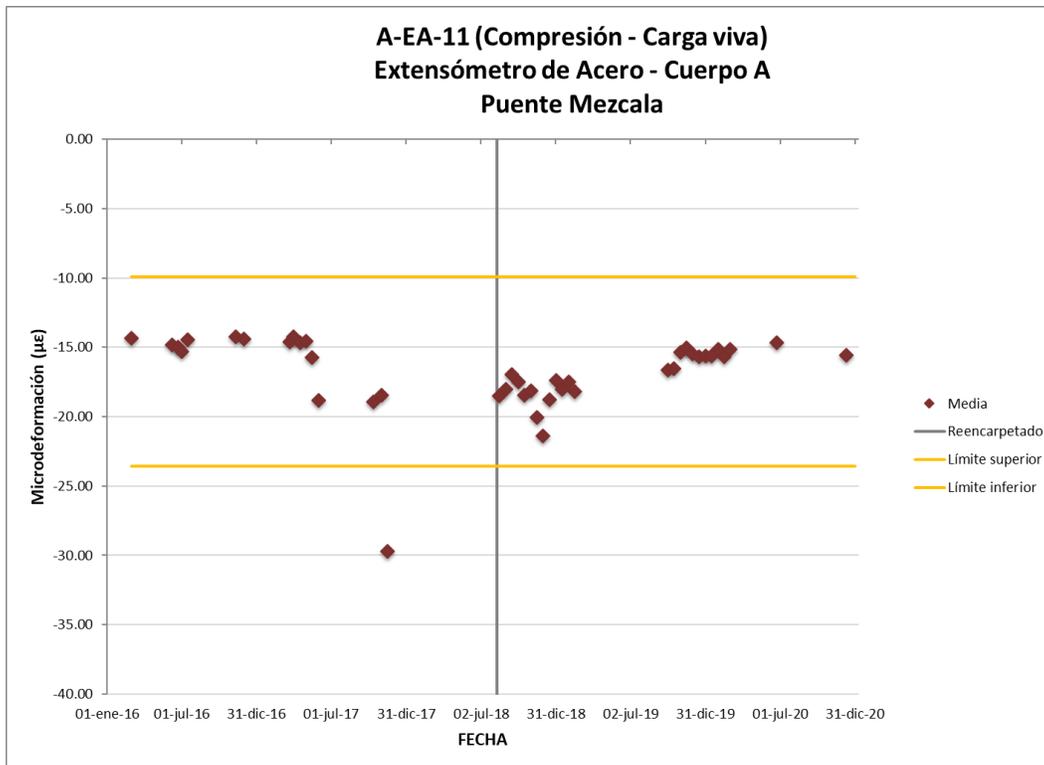


Figura 3.179 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-11

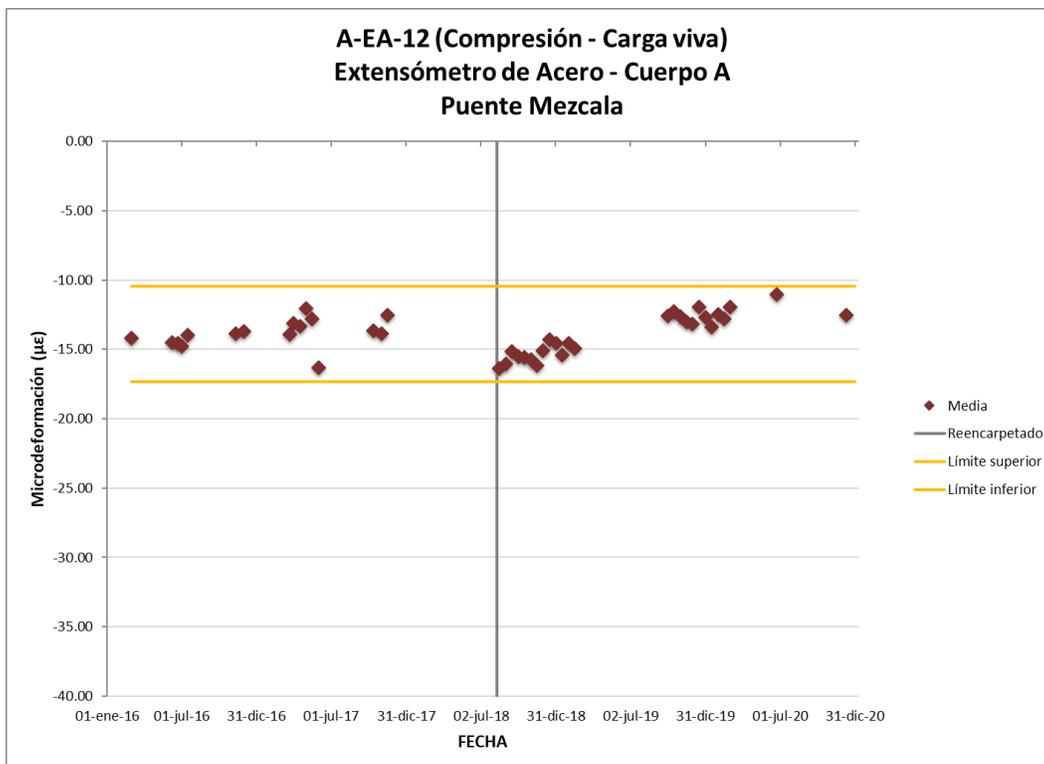


Figura 3.180 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-12

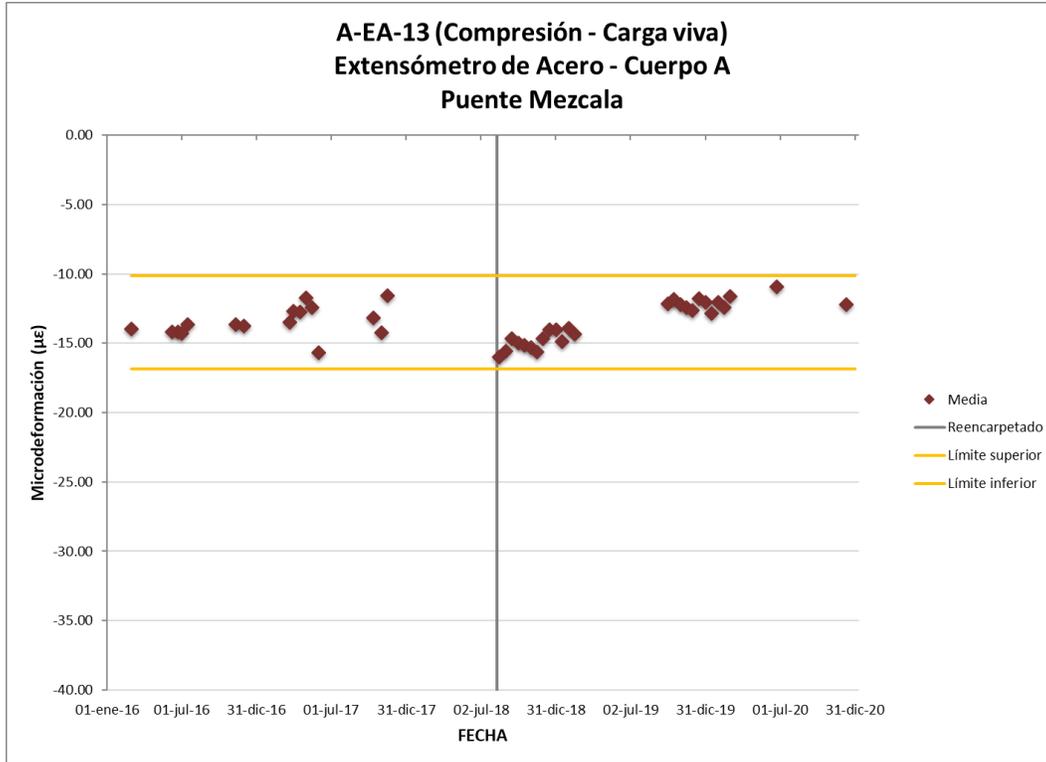


Figura 3.181 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-13

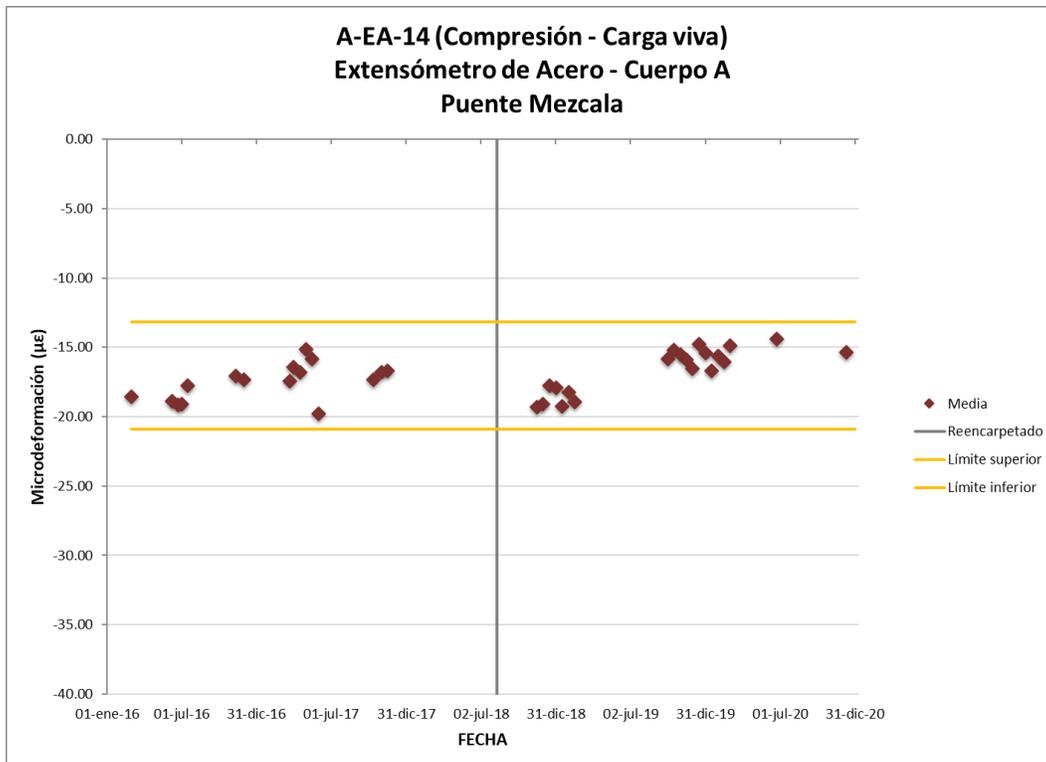


Figura 3.182 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-14

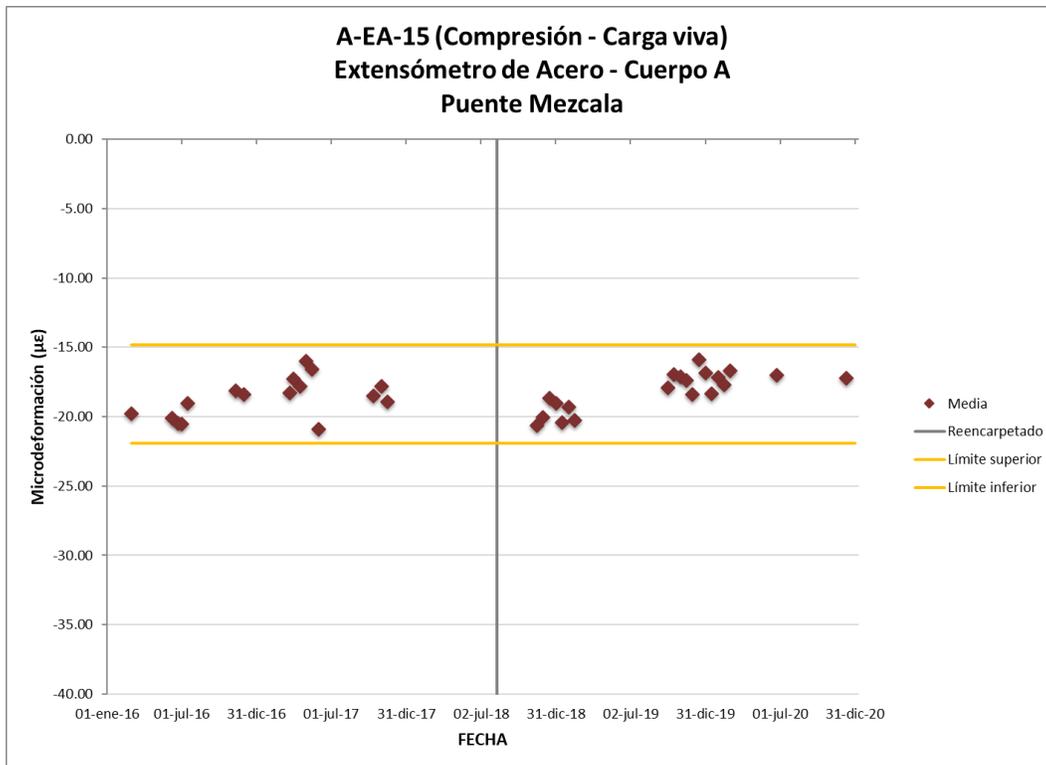


Figura 3.183 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-15

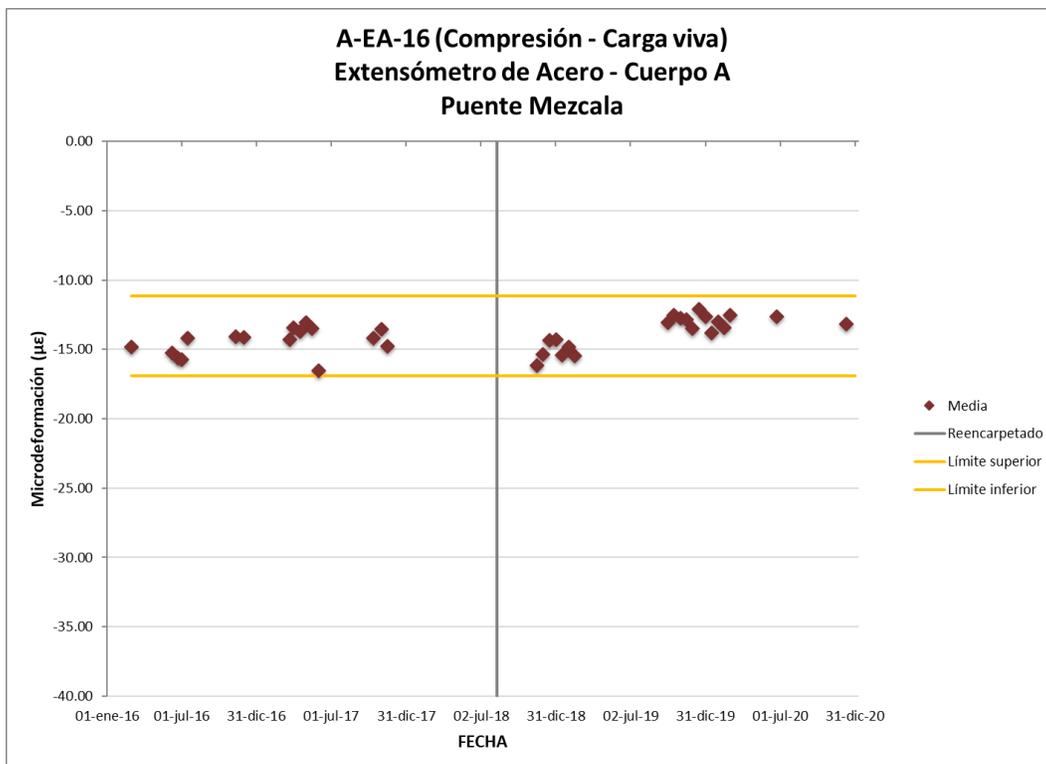


Figura 3.184 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-16

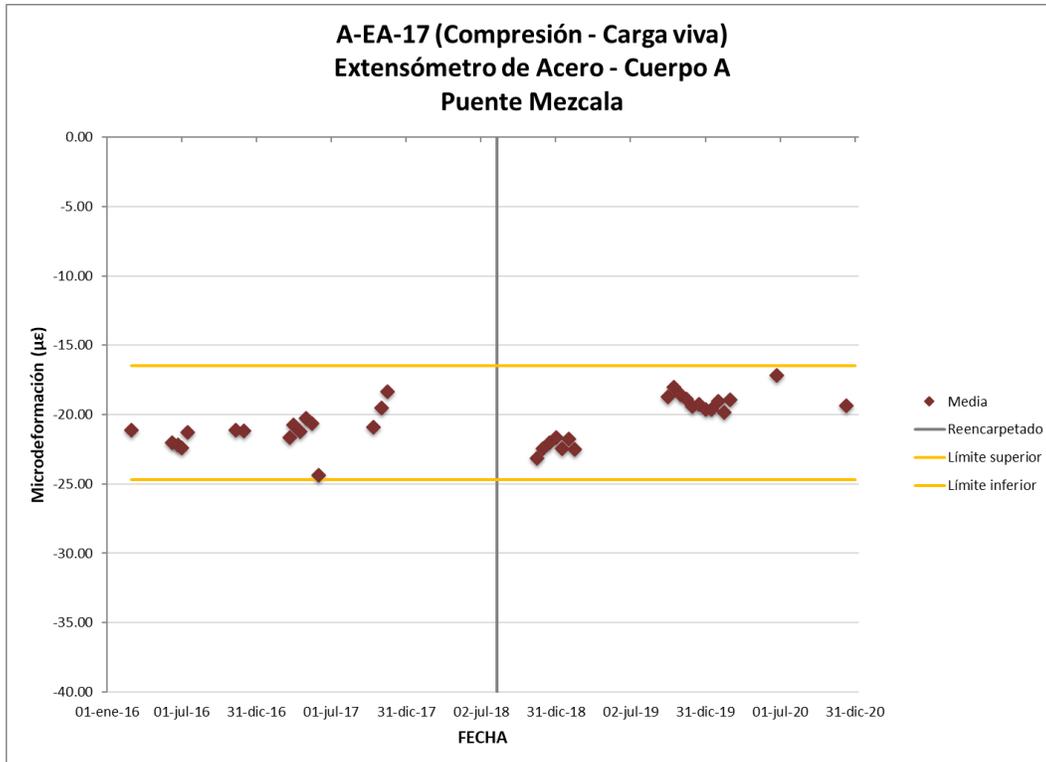


Figura 3.185 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-17

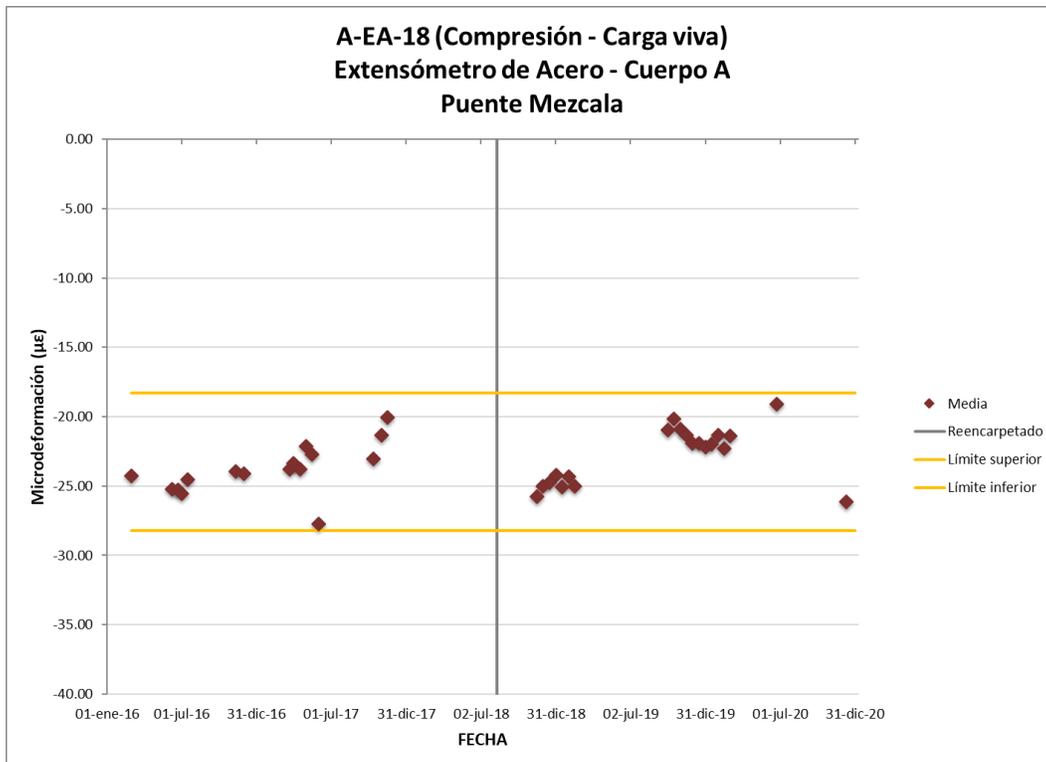


Figura 3.186 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-18

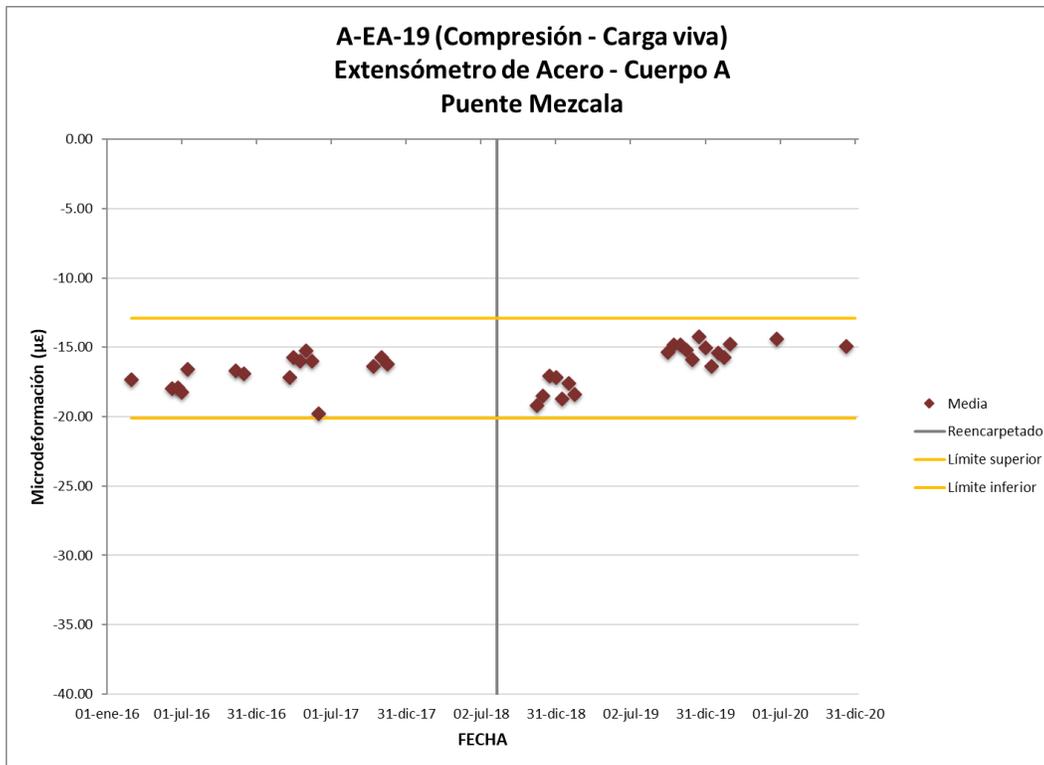


Figura 3.187 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-19

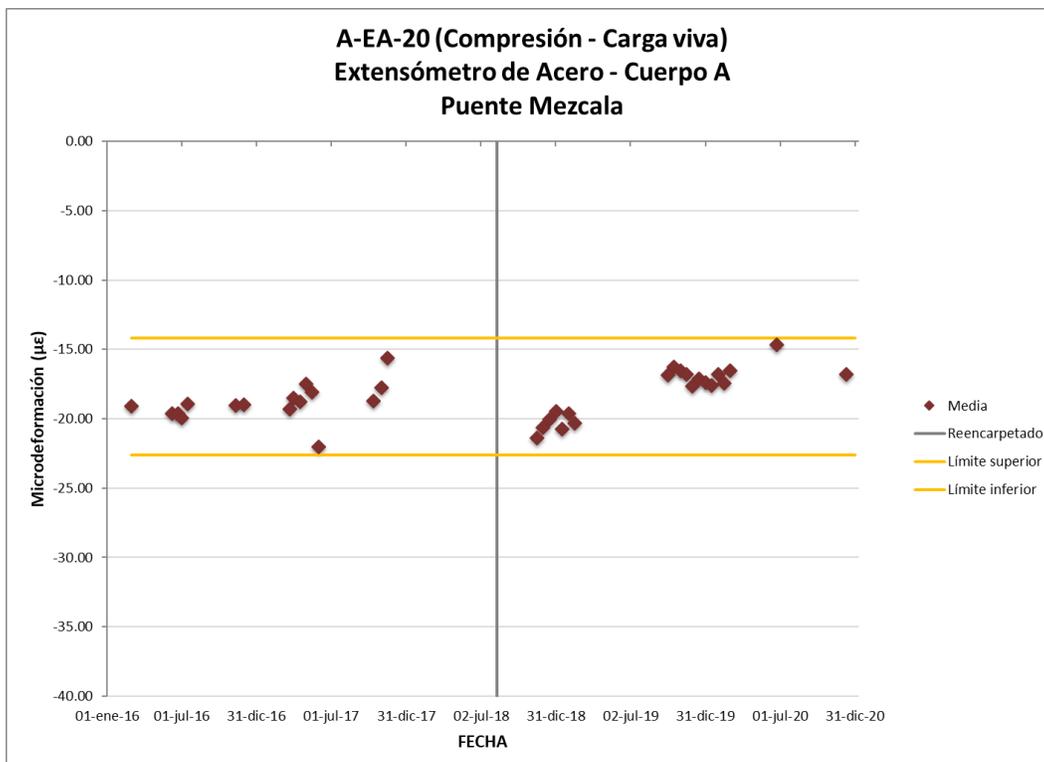


Figura 3.188 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-20

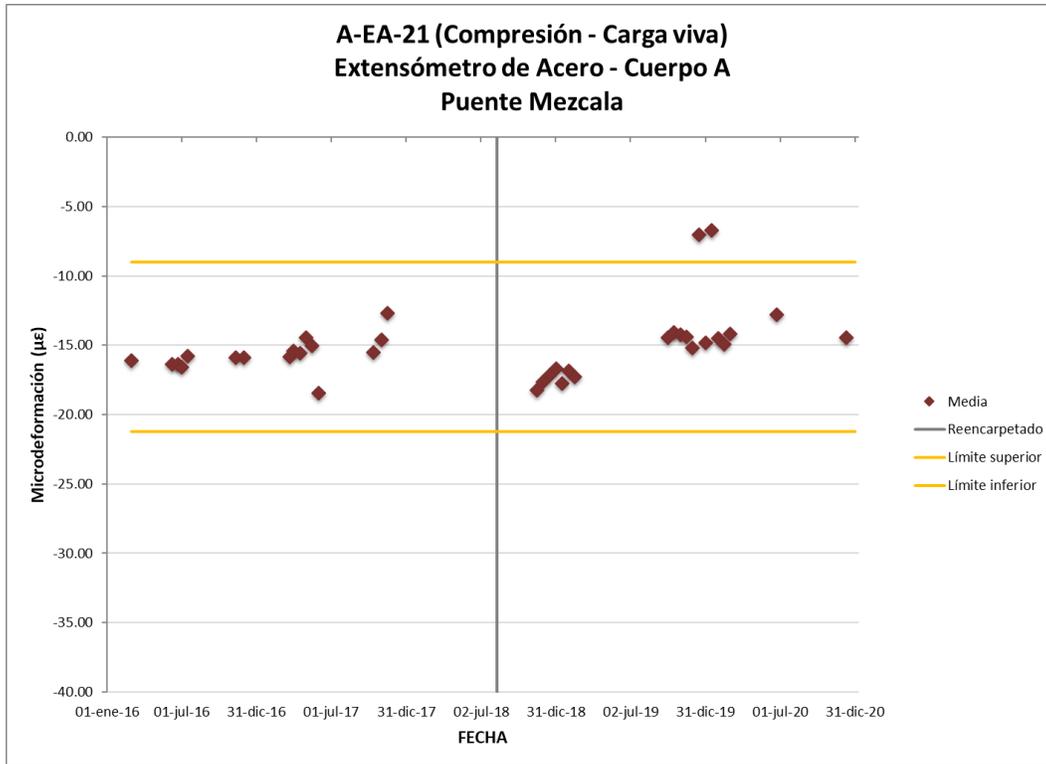


Figura 3.189 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-21

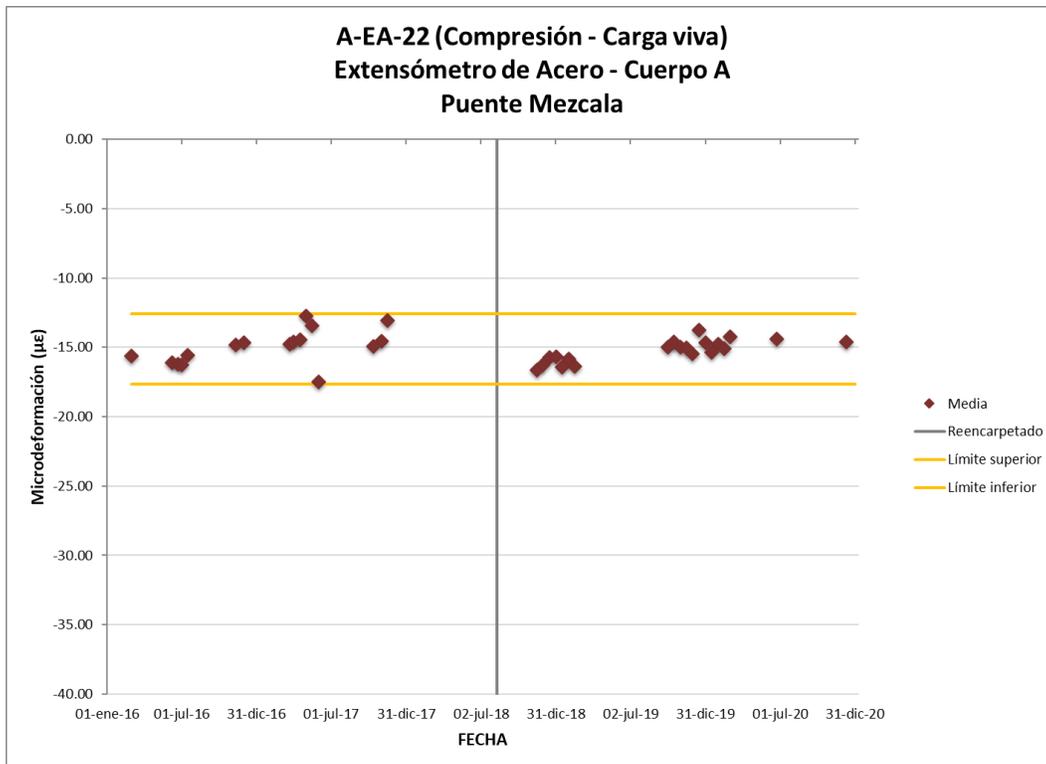


Figura 3.190 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-22

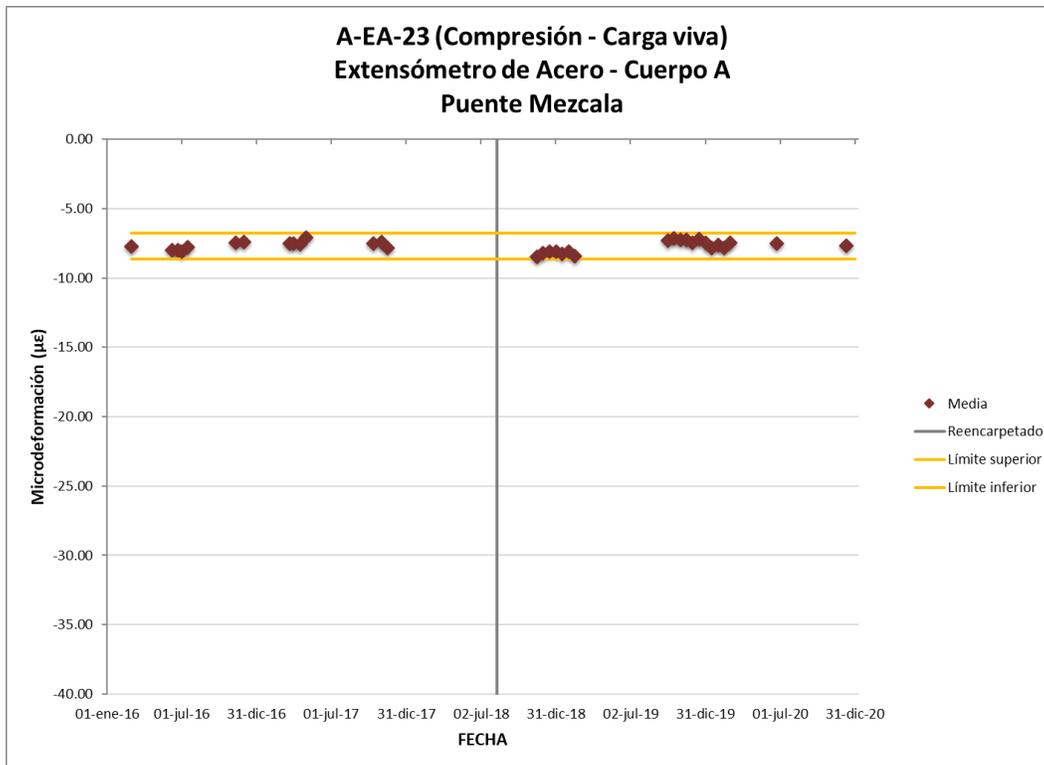


Figura 3.191 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-23

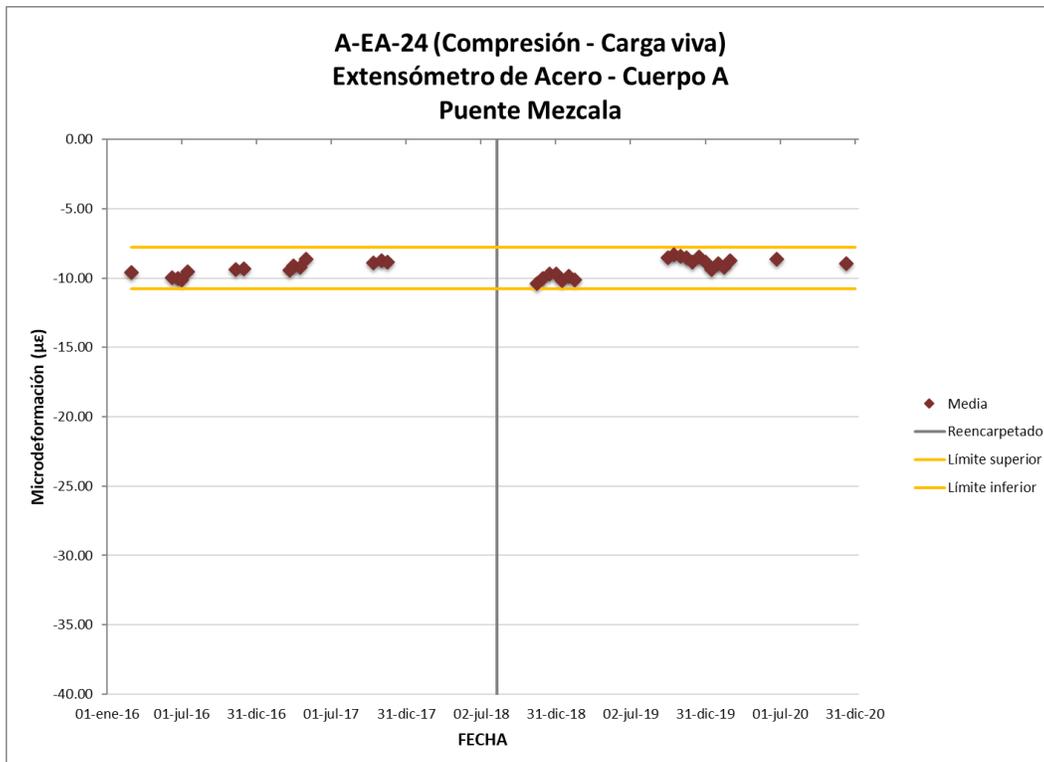


Figura 3.192 Media a compresión por cargas vivas sensor A-EA-24

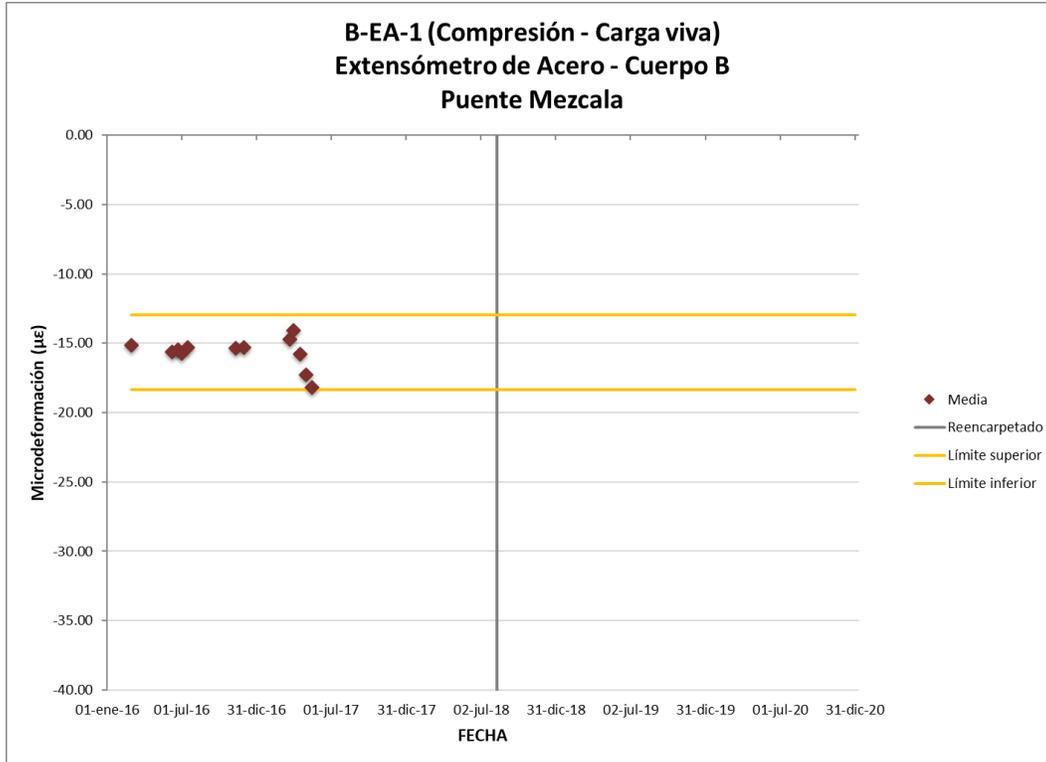


Figura 3.193 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-1

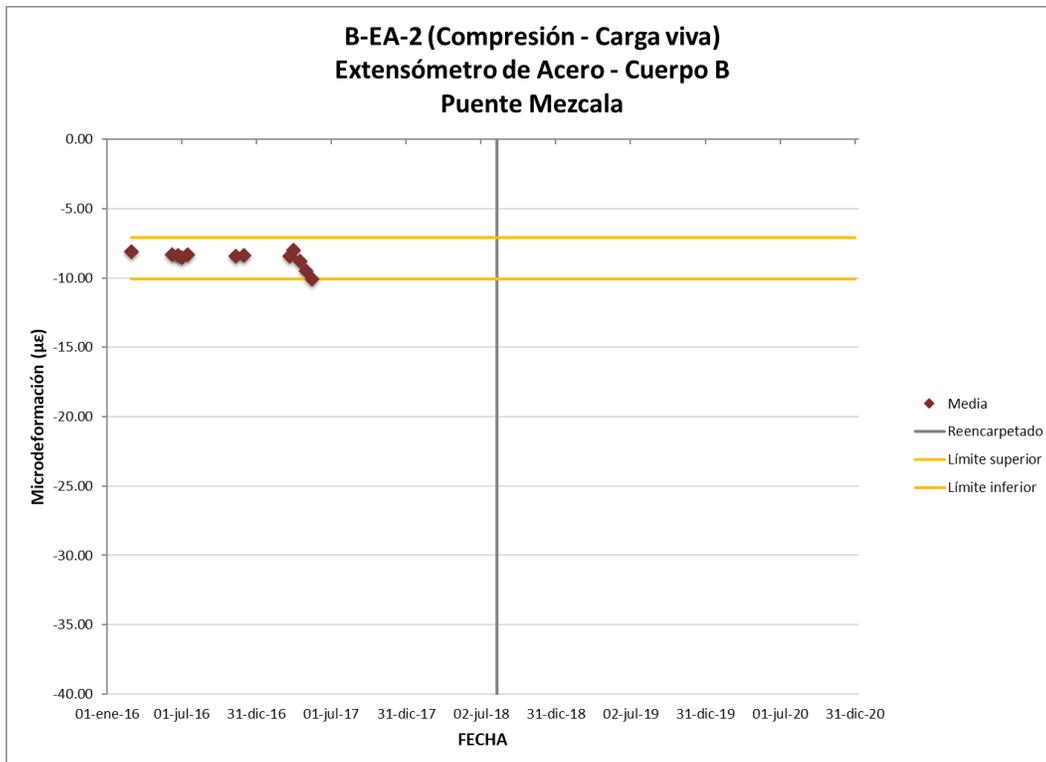


Figura 3.194 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-2

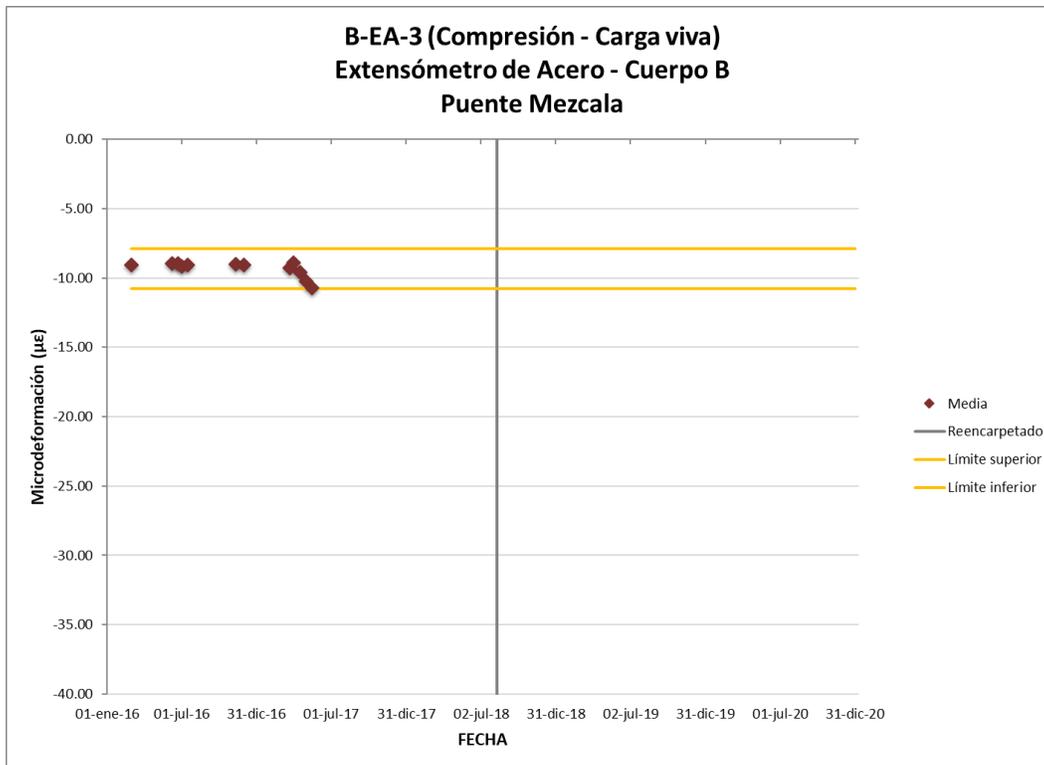


Figura 3.195 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-3

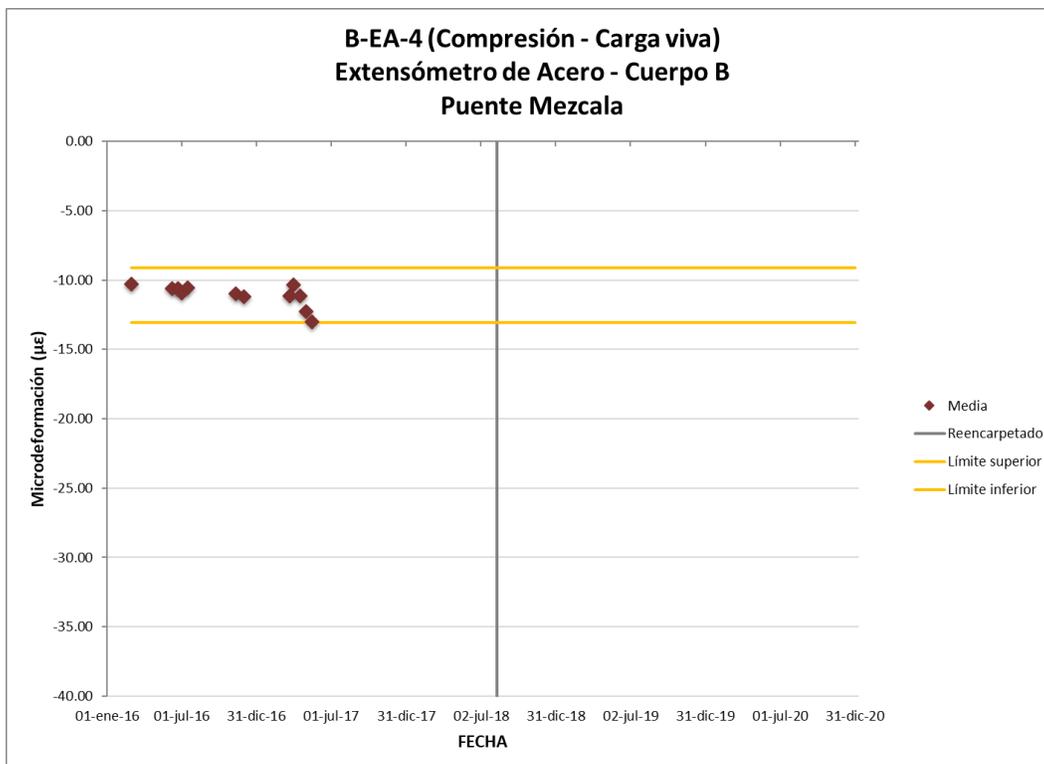


Figura 3.196 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-4

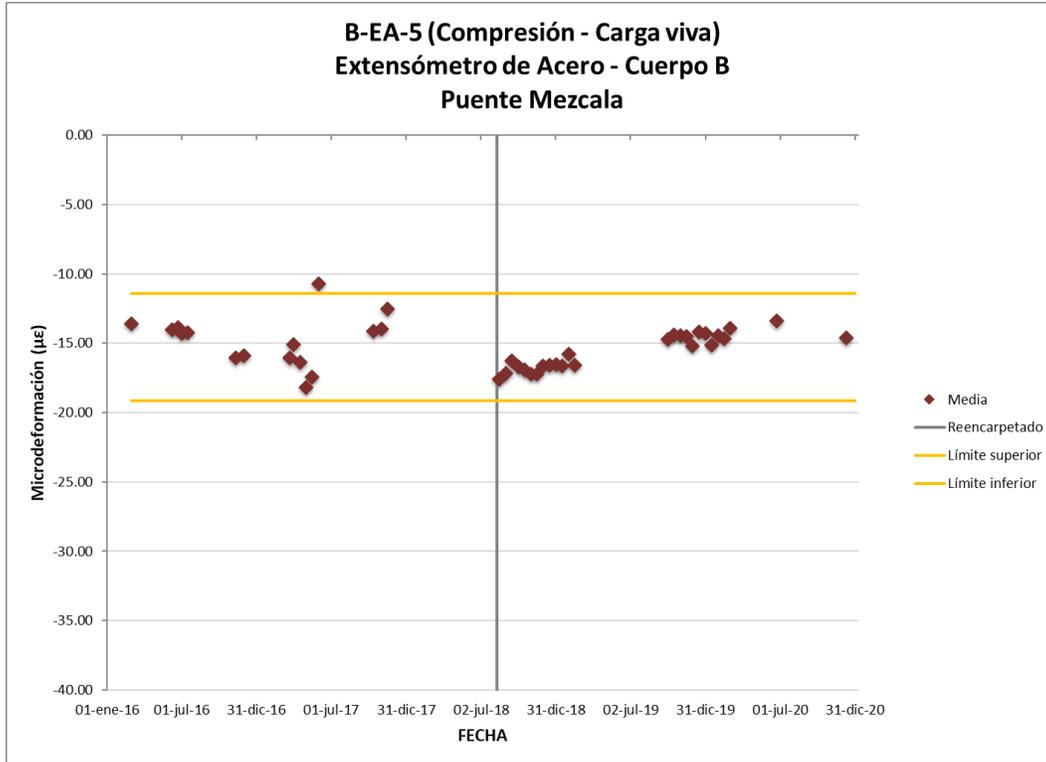


Figura 3.197 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-5

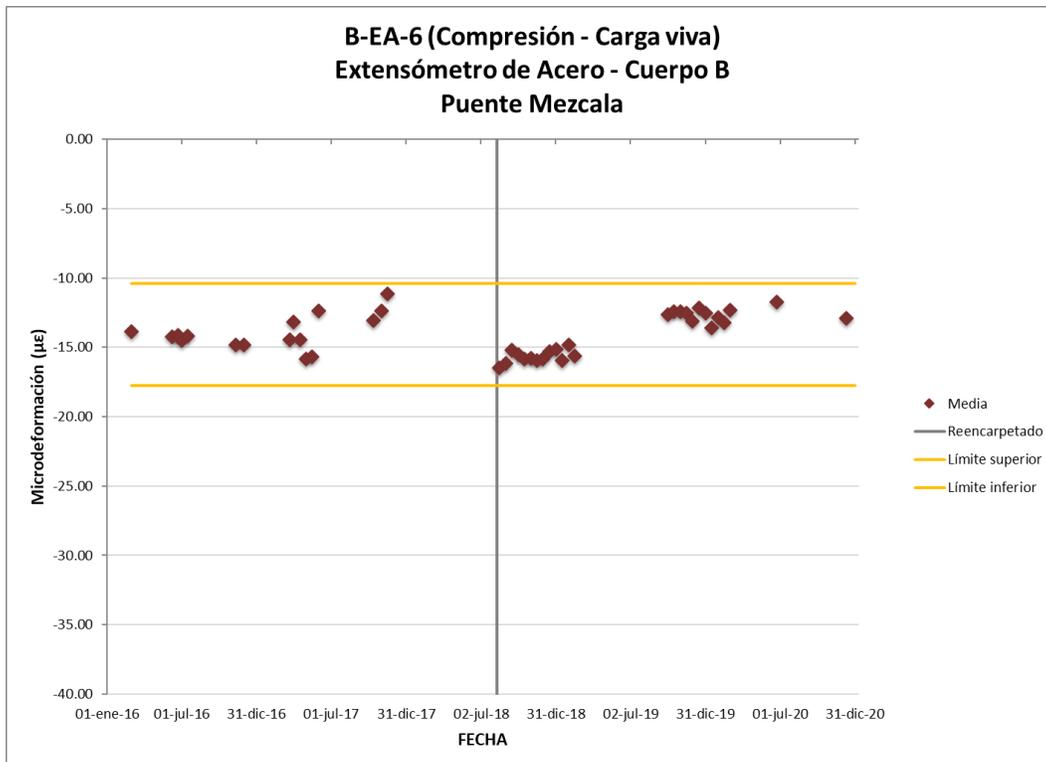


Figura 3.198 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-6

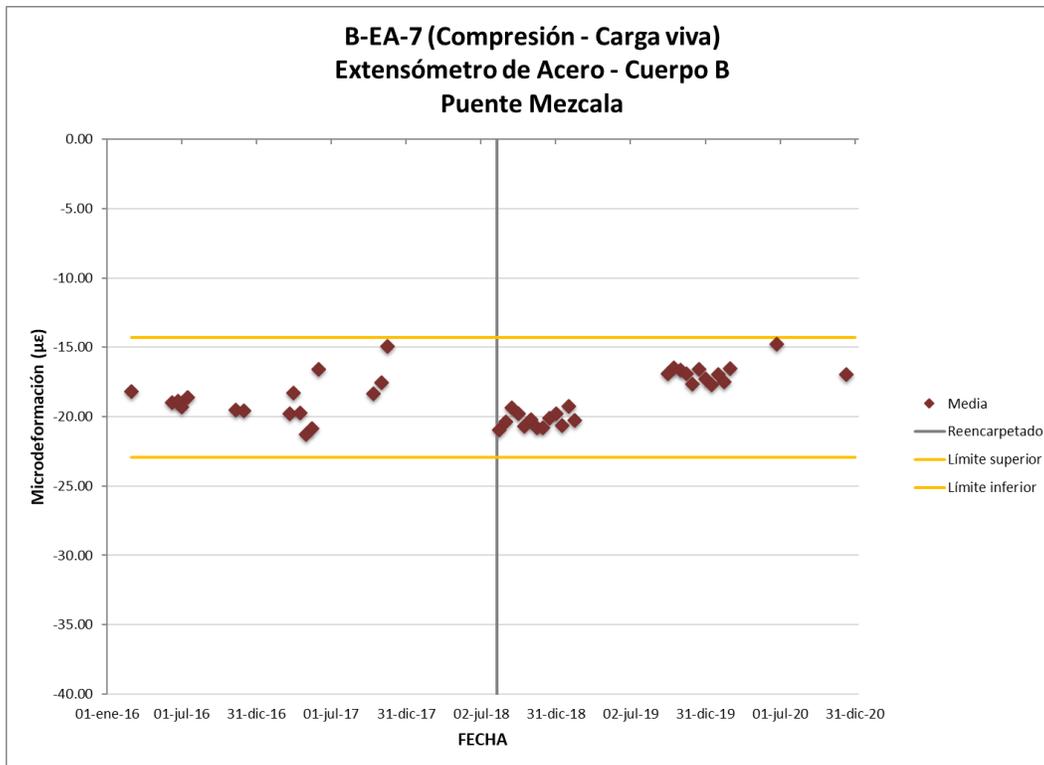


Figura 3.199 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-7

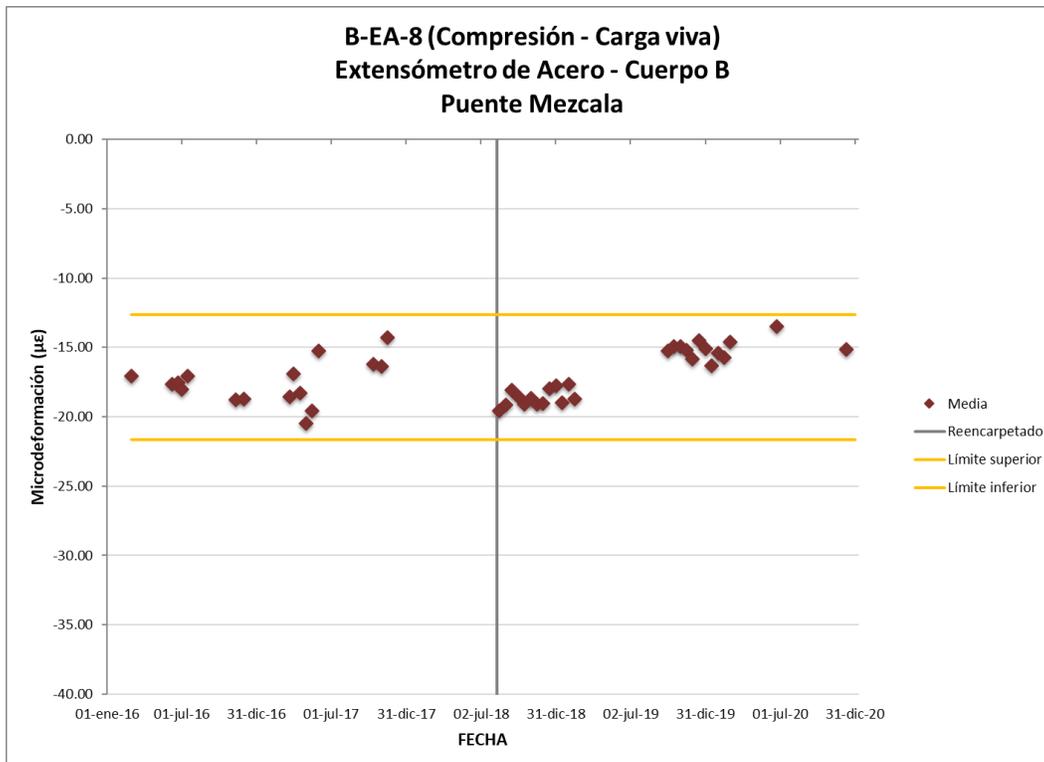


Figura 3.200 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-8

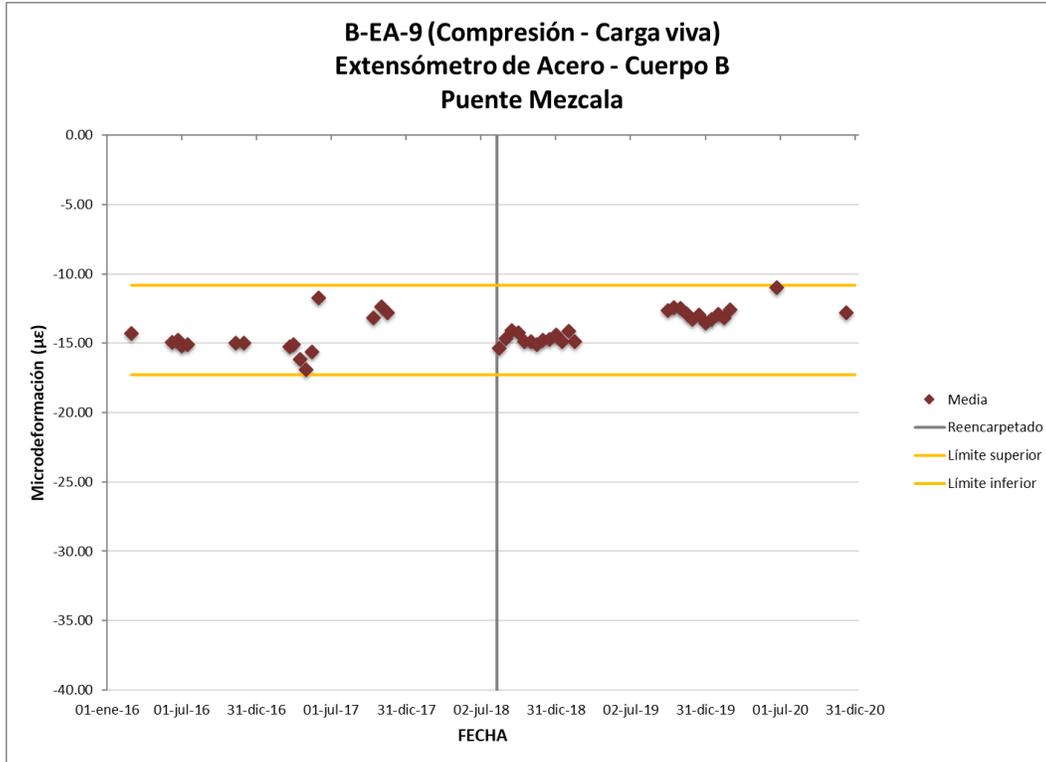


Figura 3.201 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-9

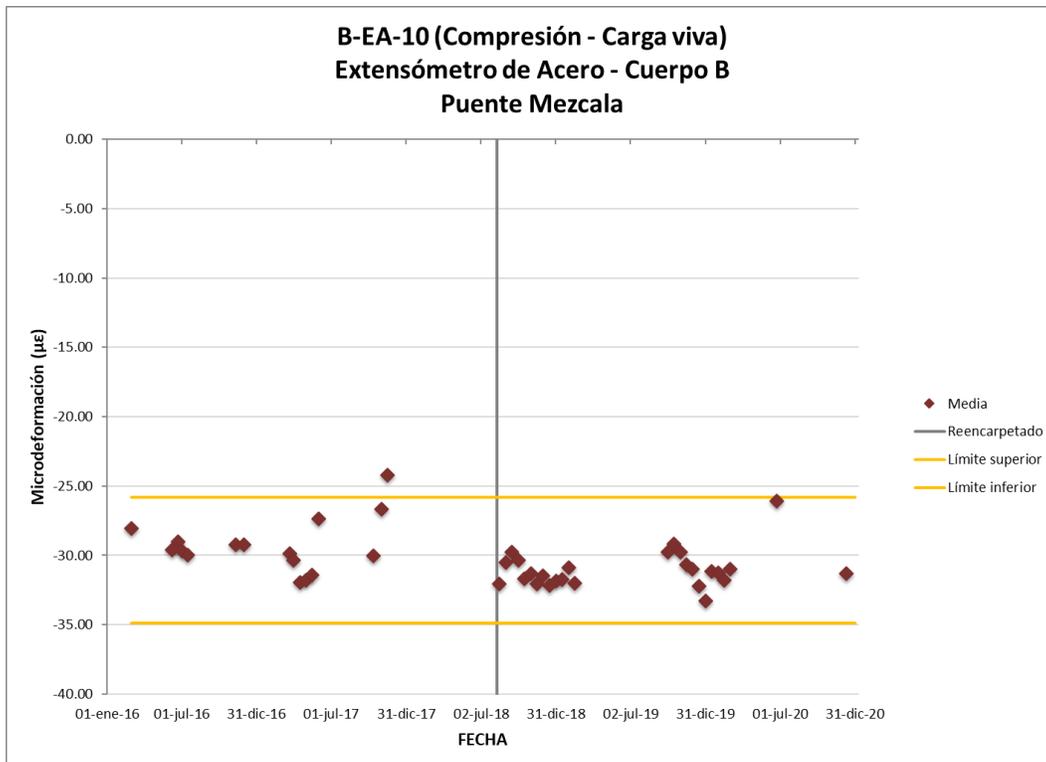


Figura 3.202 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-10

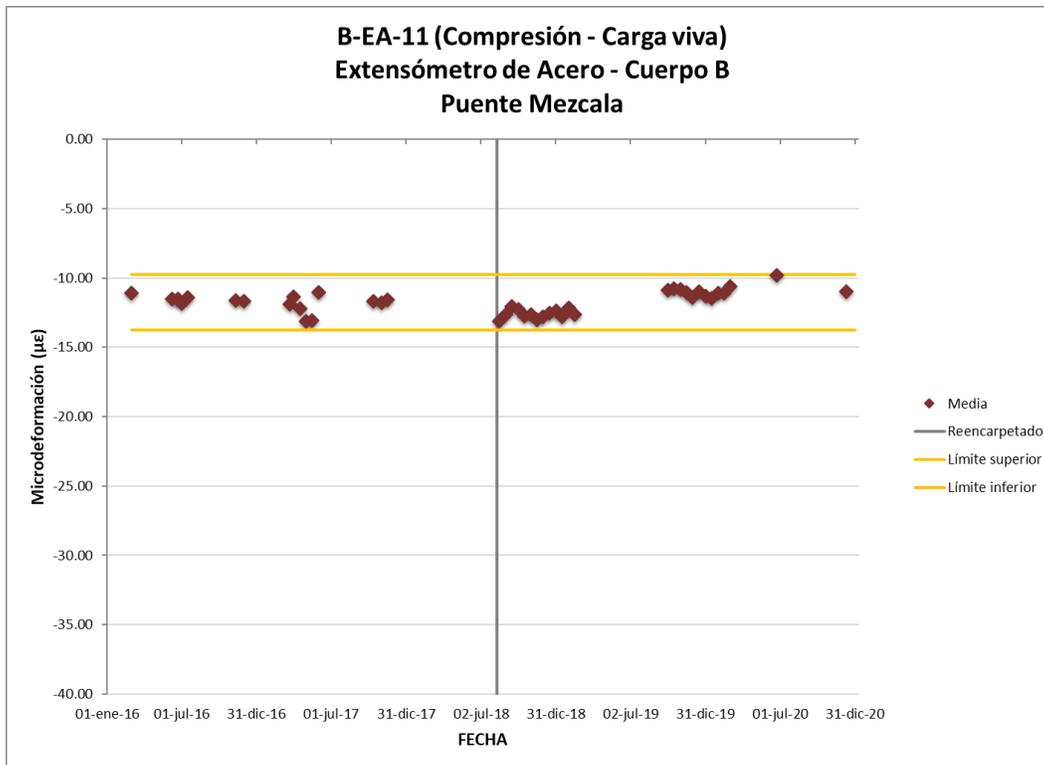


Figura 3.203 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-11

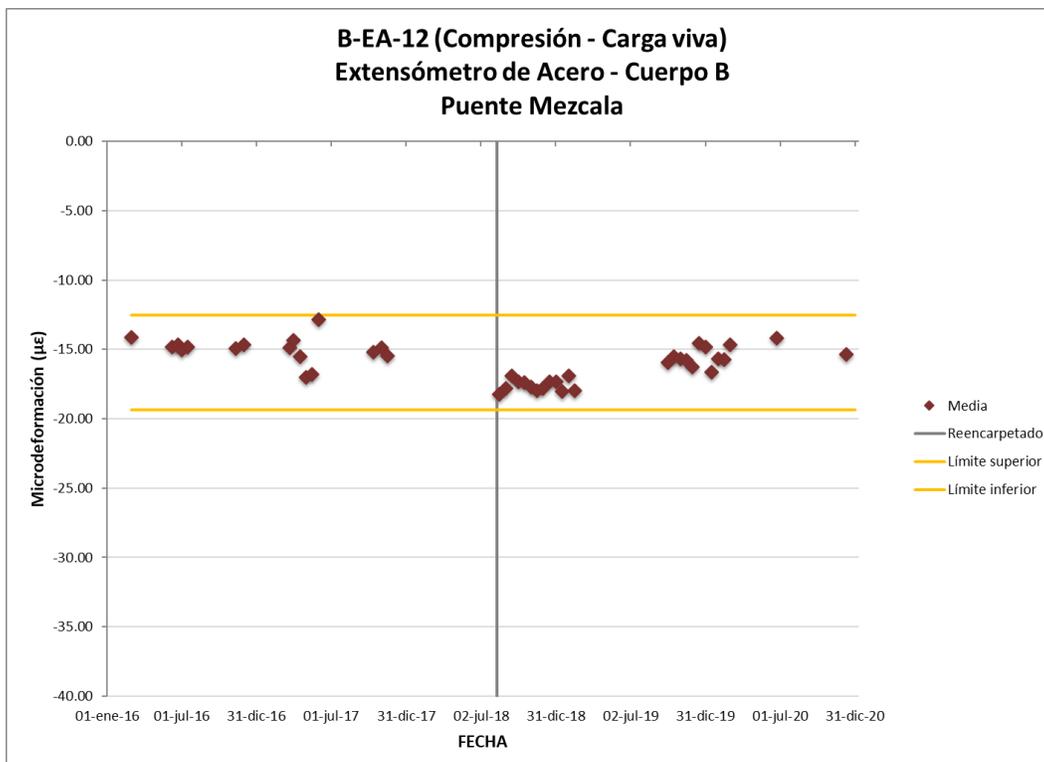


Figura 3.204 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-12

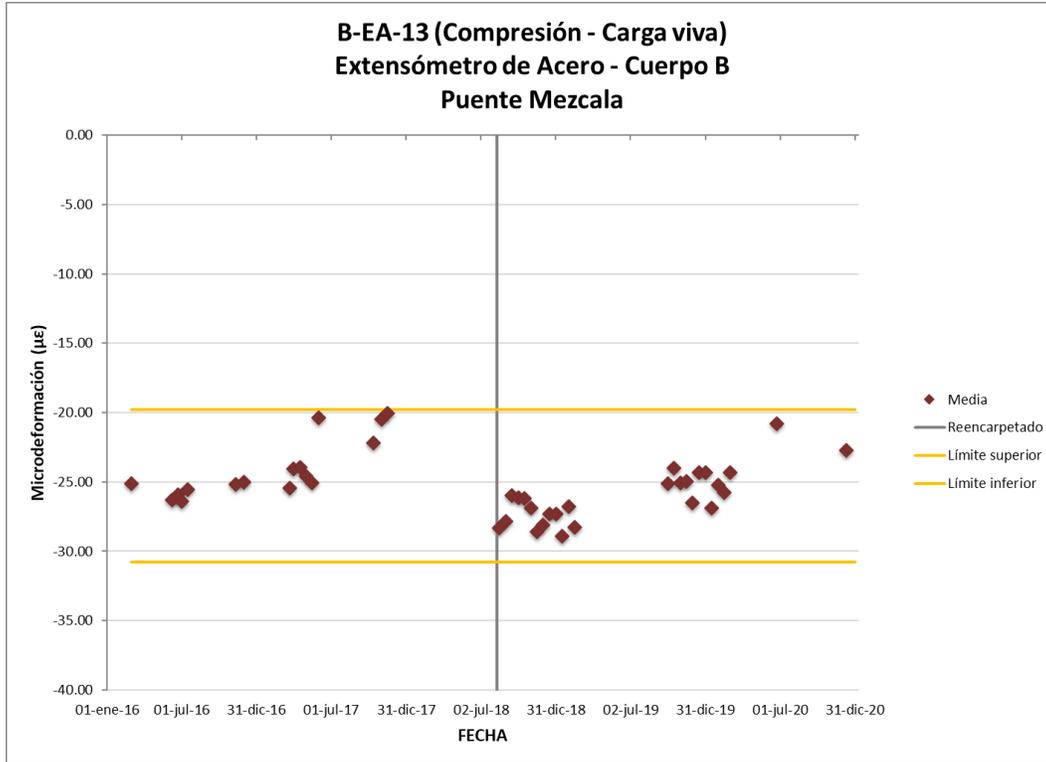


Figura 3.205 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-13

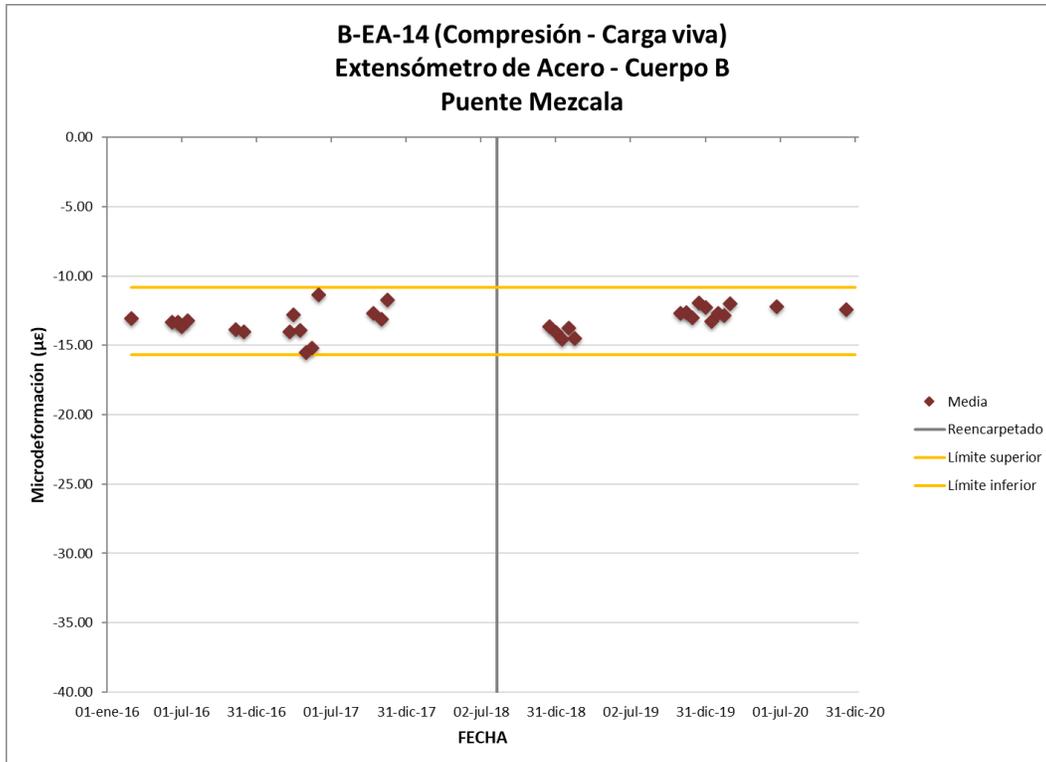


Figura 3.206 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-14

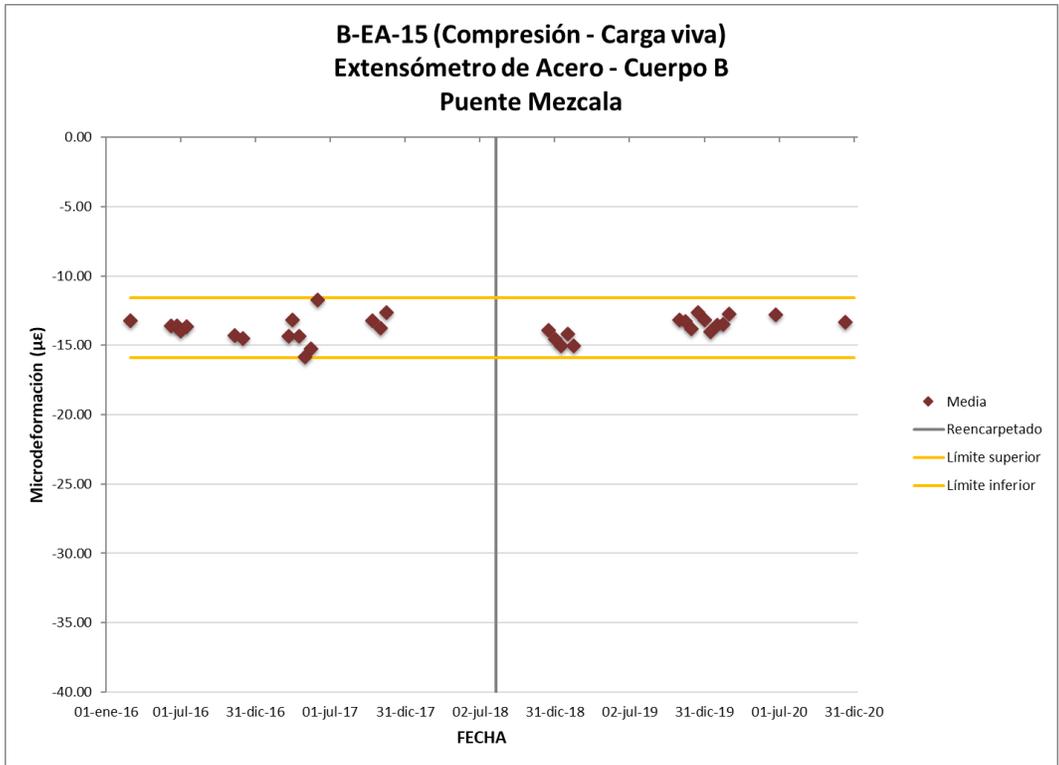


Figura 3.207 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-15

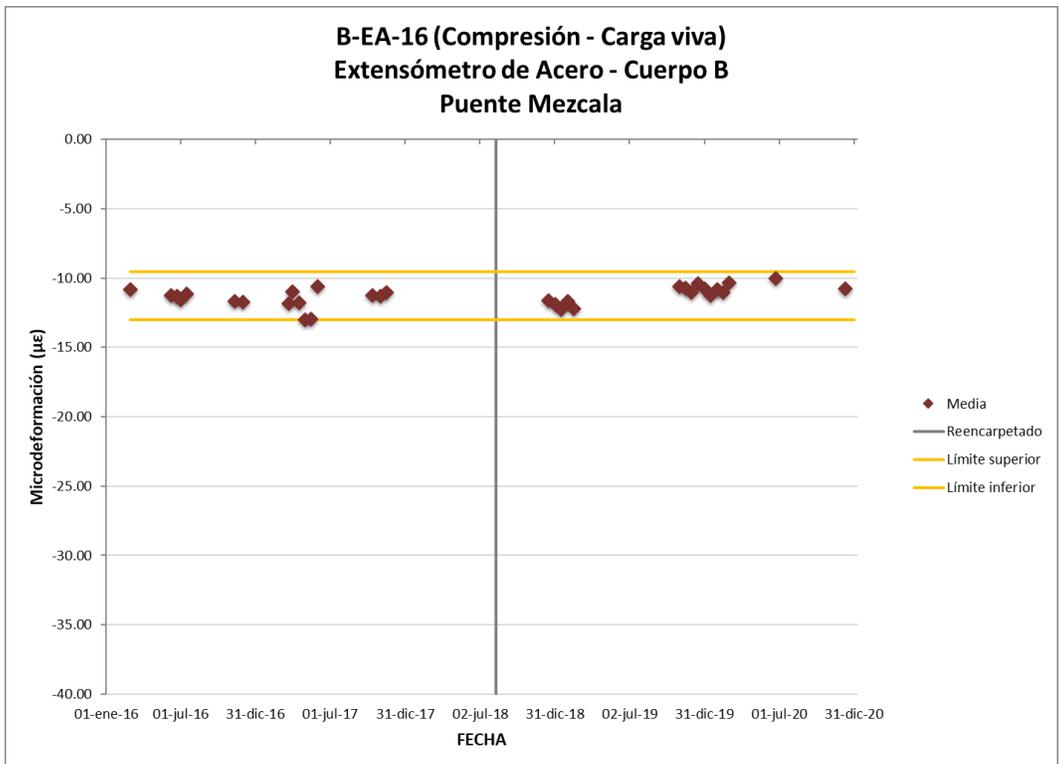


Figura 3.208 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-16

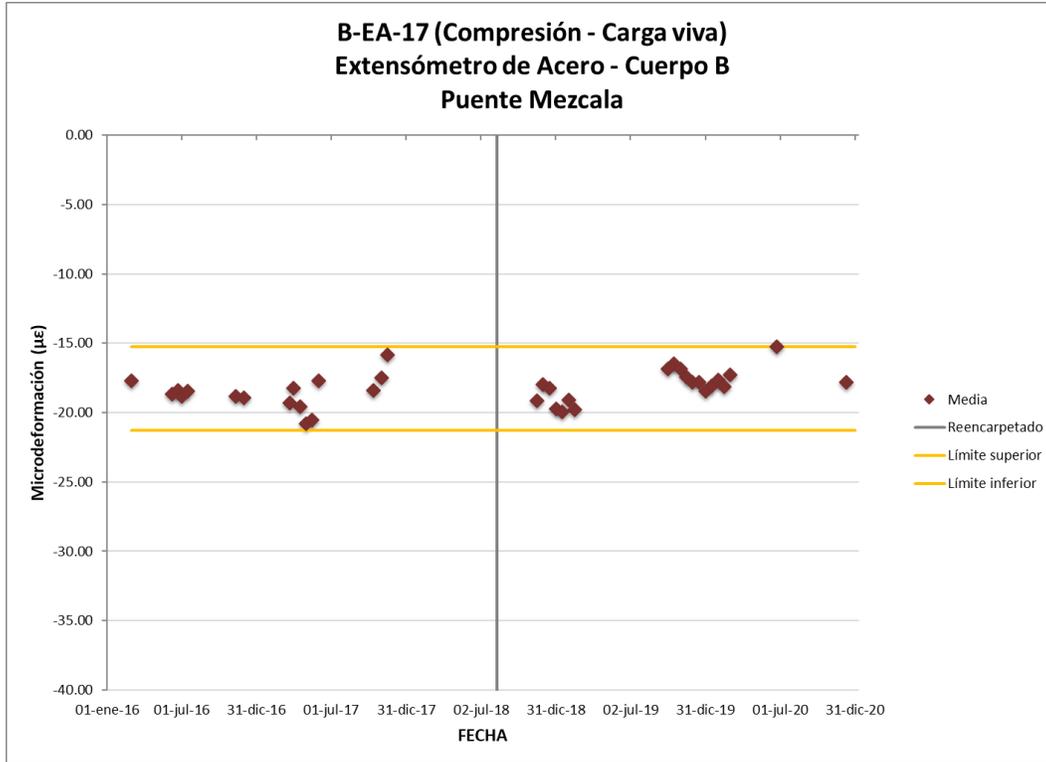


Figura 3.209 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-17

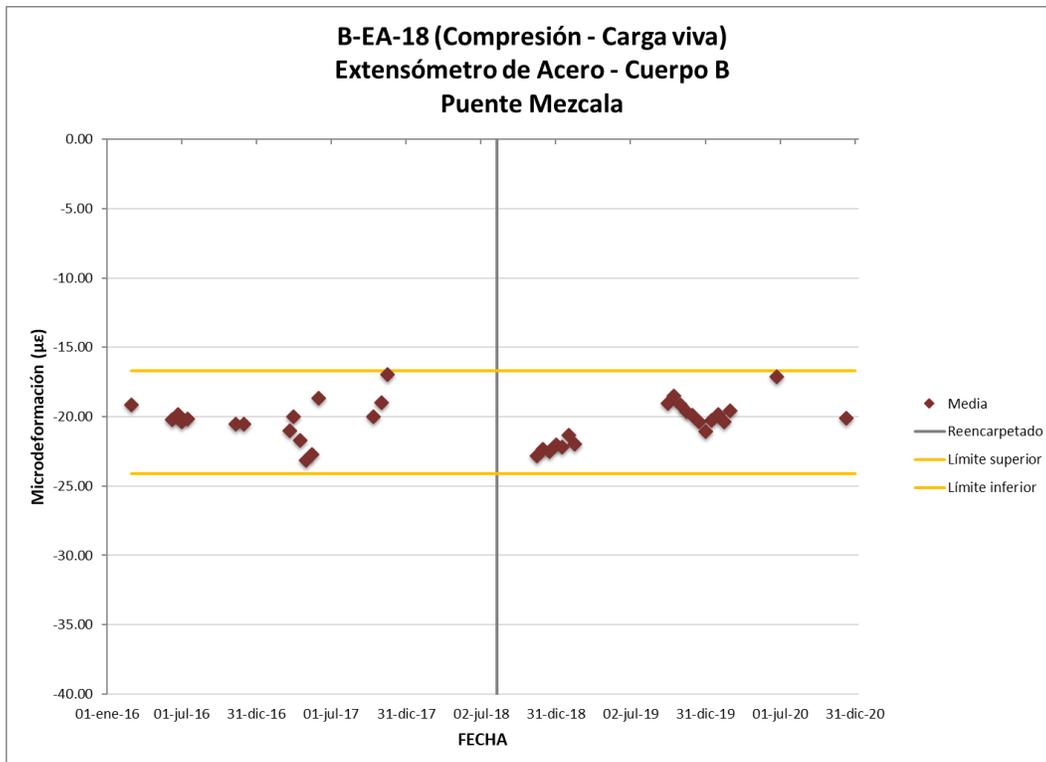


Figura 3.210 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-18

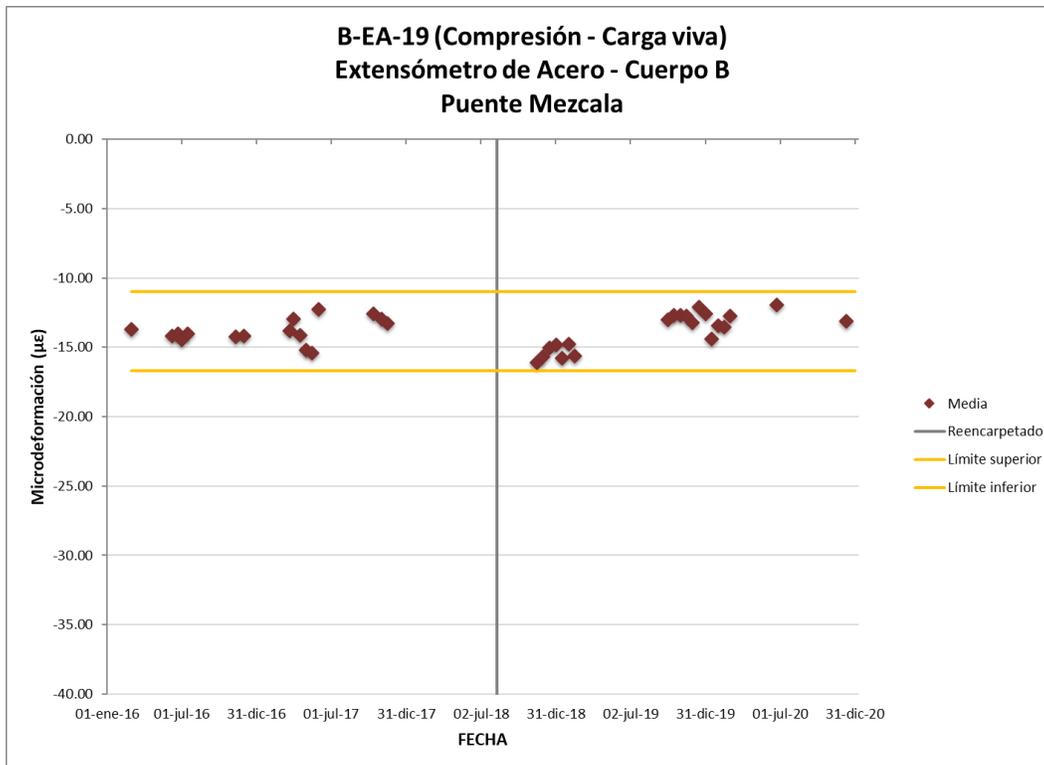


Figura 3.211 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-19

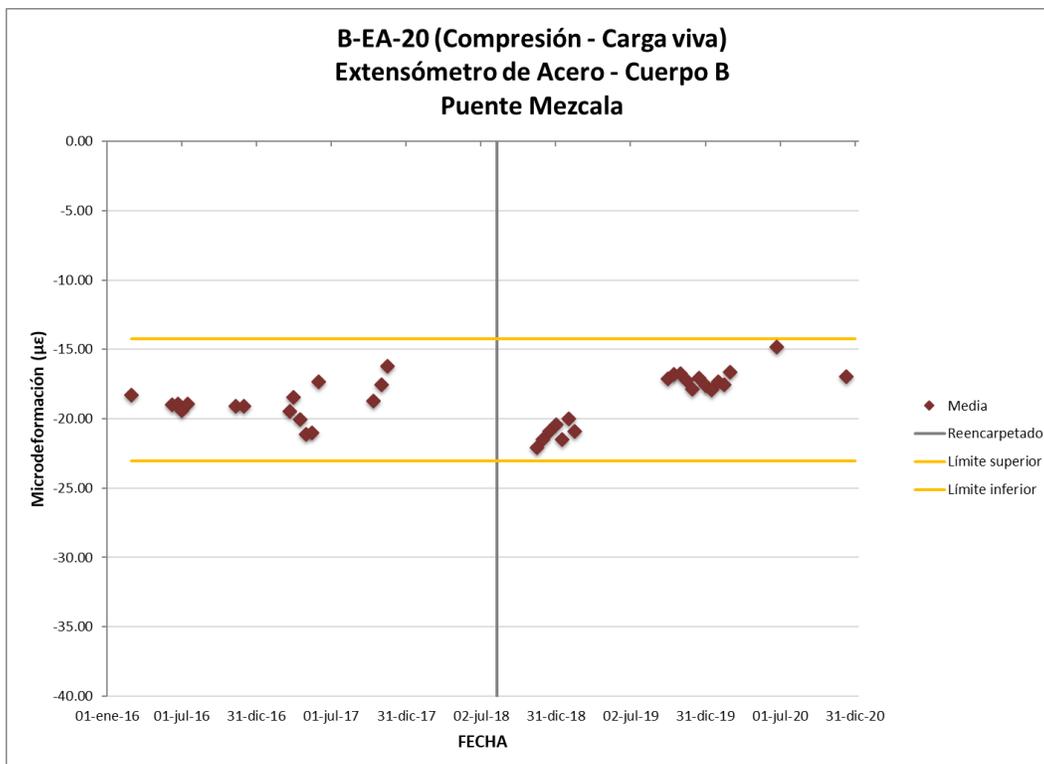


Figura 3.212 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-20

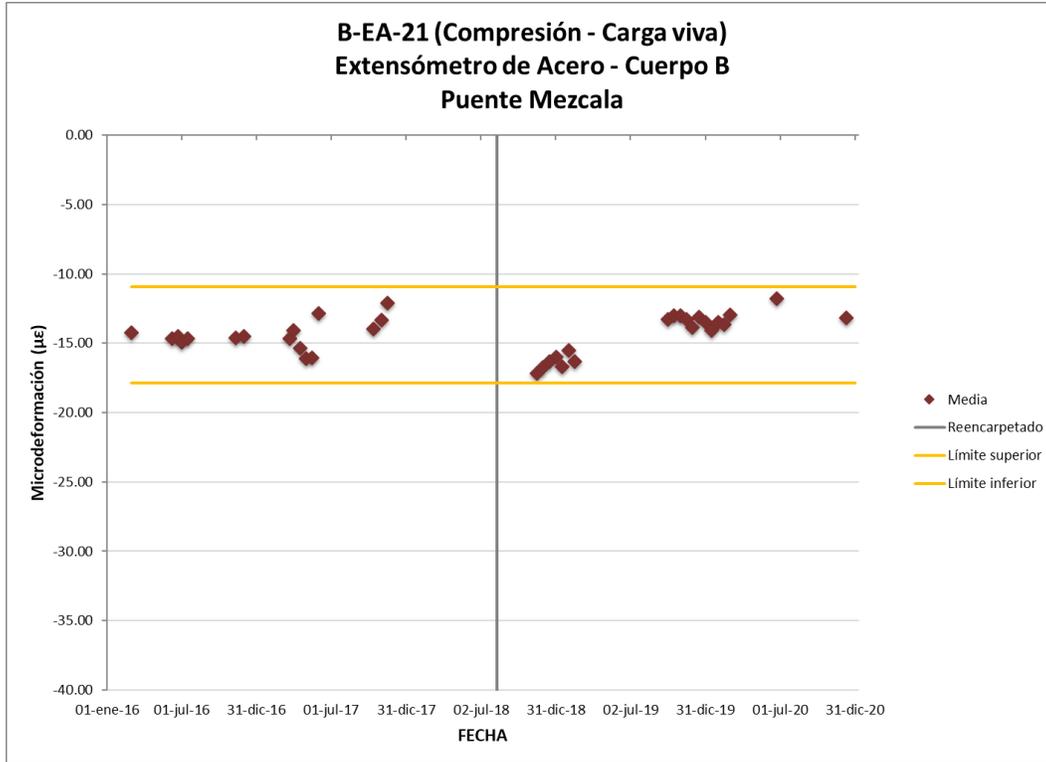


Figura 3.213 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-21

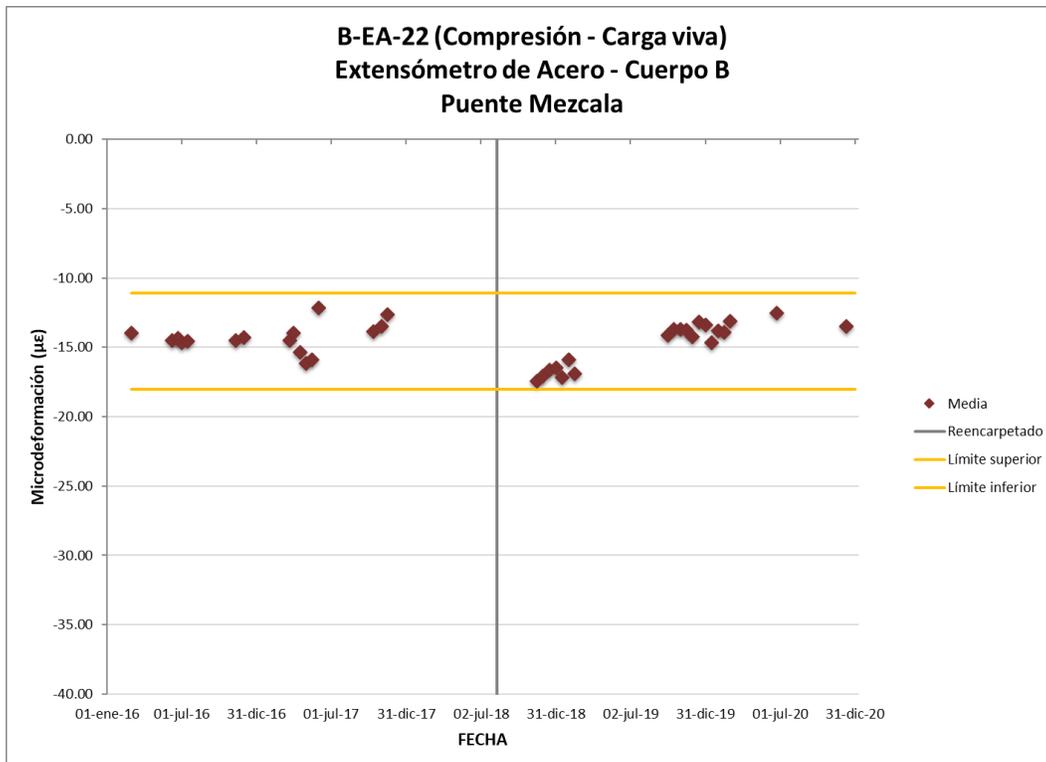


Figura 3.214 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-22

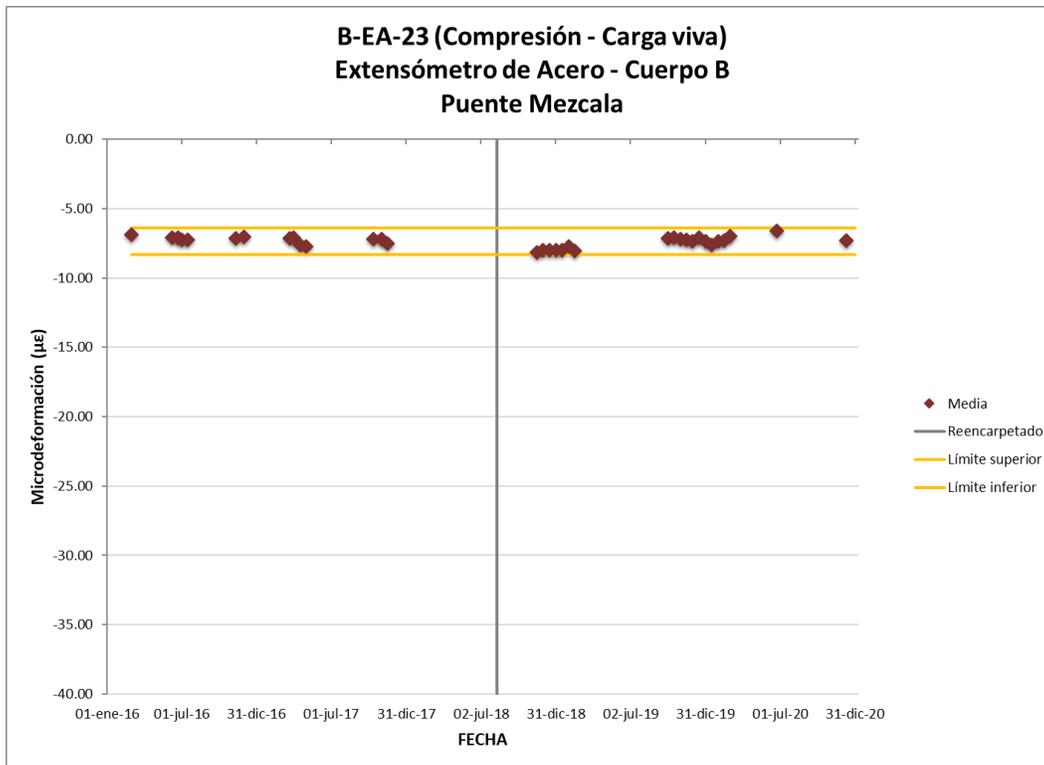


Figura 3.215 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-23

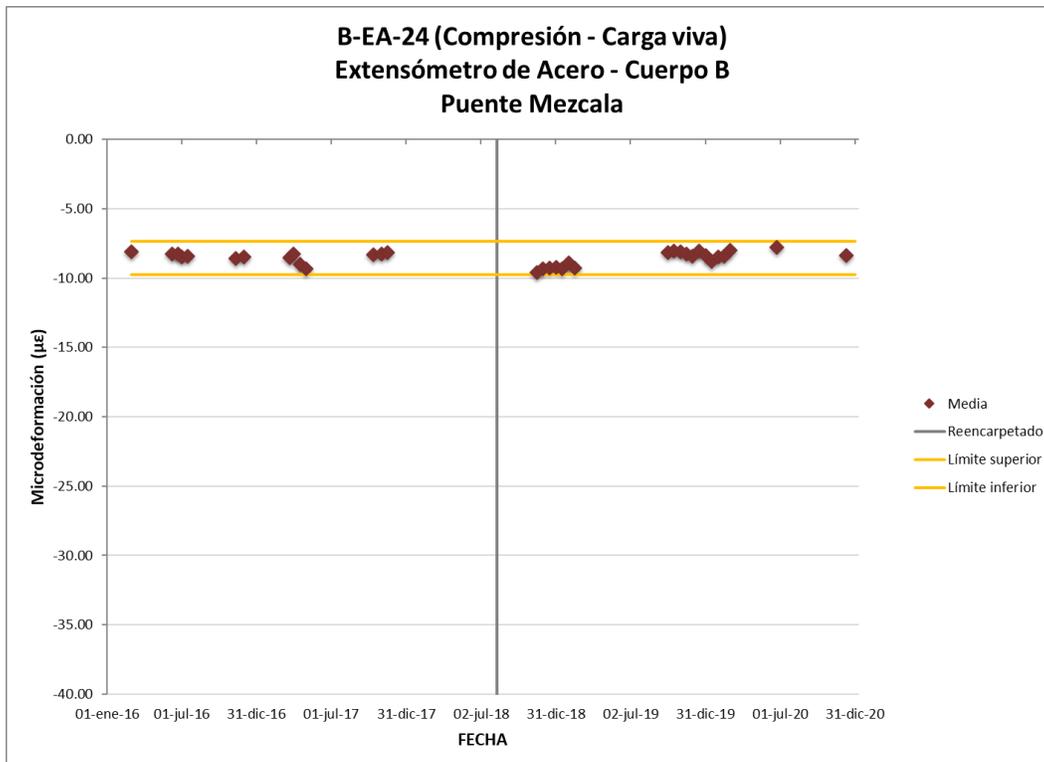


Figura 3.216 Media a compresión por cargas vivas sensor B-EA-24





## Conclusiones

---

Del análisis y seguimiento realizado durante el año 2020, se concluye que no existen variaciones significativas en los valores de las frecuencias naturales, ni tampoco en las formas modales de los 8 primeros modos naturales de vibración del puente Mezcala. No obstante, se han presentado considerables variaciones en los valores de la razón de amortiguamiento, por lo que se propone realizar un análisis de sensibilidad para determinar la fuente de las variaciones.

Se calcularon los valores promedio y los límites de operación de algunas variables monitoreadas como las deformaciones producto de las cargas vivas vehiculares y tensiones de tirantes de sujeción, los cuales no presentaron variaciones significativas en su comportamiento. Con los valores monitoreados se propone, para futuras investigaciones, realizar una evaluación estructural de la capacidad de carga del puente, así como el establecimiento de alarmas en función de las condiciones máximas permitidas de servicio y de diseño para los elementos estructurales instrumentados del puente.



## Bibliografía

---

Anaya M, Quintana J A, Carrión F J, Trujano L Á, Hernández J A, Gasca H M, Valenzuela J I, Montes M y Hernández A (2018) Calibración y ajuste de los parámetros estructurales del modelo matemático del puente Mezcala para evaluación estructural. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 530.

Anaya M, Quintana J A, Carrión F J, Trujano L Á, Hernández J A, Gasca H M, Guzmán G M y Hernández A (2020) Monitoreo y evaluación de los parámetros estructurales del puente Mezcala. Instituto Mexicano del Transporte, Publicación Técnica No. 597.

Brincker R, Ventura C E, and Andersen P (2001) Damping estimation by frequency domain decomposition. Proceedings of the 19th International Modal Analysis Conference: (IMAC), Vol 1: 698-703.

Brincker R, Ventura C E (2015) Introduction to operational modal analysis. John Wiley & Sons, Ltd.

Doyle J F (1991) Static and dynamic analysis of structures. Kluwer Academic Publishers.

Friswell M I and Mottershead, J E (1995) Finite element model updating in structural dynamics. Springer Science..

Marwala T (2010) Finite element model updating using computational intelligence techniques, applications to structural dynamics. Springer.





# COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



**Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado Galindo"**  
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,  
Querétaro, México. C.P. 76703  
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610  
Fax: +52 (442) 216 9671

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

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