

Evaluación de la temperatura superficial in situ en el puente vehicular de la NQS (Autopista Sur) con Av. Carrera 50 y el puente vehicular ubicado en la Calle 38 A sur (Mata Tigres) (Bogotá).

Jeidy Alexandra Lemus Rodríguez & Sandra Cristina Duque Gómez

Universidad Antonio Nariño

Ingeniería Civil

Bogotá D.C

2020

II

Evaluación de la temperatura superficial in situ en el puente vehicular de la NQS (Autopista Sur) con Av. Carrera 50 y el puente vehicular ubicado en la Calle 38 A sur (Mata Tigres) (Bogotá).

Jeidy Alexandra Lemus Rodríguez

&

Sandra Cristina Duque Gómez

Proyecto de investigación presentado como requisito para optar por el título de:

INGENIERO CIVIL

Director (es):

Edison Osorio Bustamante, Dr.

Universidad Antonio Nariño

Ingeniería Civil

Bogotá D.C

2020

I

Nota de aceptación

Firma jurado 1

Firma jurado 2

Firma jurado 3

Bogotá D.C, 17 de noviembre de 2020

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a Dios, a nuestros padres, hermanos, amigos y familiares, que anhelan desesperadamente los resultados de nuestros esfuerzos tanto como nosotras. Sus palabras de aliento y motivación, sus constantes sacrificios, su apoyo incondicional han sido fundamentales para conseguir este logro. A todos ellos gracias por creer siempre en nosotras y por darnos la mano hasta el final del camino.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	4
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS.....	11
RESUMEN	12
ABSTRACT.....	13
1. Introducción	14
1.1. Antecedentes	15
1.2. Estado de la infraestructura.....	15
2. Objetivos.....	16
2.1. Objetivo general.....	16
2.2. Objetivos específicos.....	16
3. Marco Teórico	17
3.1. Los puentes y sus cargas térmicas	17
3.2. Elementos de un puente.....	19
3.3. Cargas térmicas en los puentes.....	21
3.4. Normativa colombiana CCP- 2014.....	22
3.5. La Termodinámica y la transferencia de calor	23
3.6. Relación de temperatura y calor	24
3.7. Velocidad y transferencia de calor	25
4. Mecanismos de transferencia de calor	26
4.1. Conducción.....	26
4.1.1. Conductividad térmica	28
4.2. Radiación.....	28
4.3. Convección	30
4.3.1. Convección Forzada Externa	31
5. Estado del Conocimiento	33
5.1. Enfoque al estado del conocimiento.	39
5.1.1. Convección en puentes.....	39
5.1.2. Puentes de viga de cajón	40

5.1.3. Estudios realizados al interior y exterior de puentes compuestos	41
5.1.4. Simulaciones de cargas térmicas	41
6. Metodología	42
6.1. Primer Paso	42
6.2. Segundo Paso	47
6.3. Tercer paso	54
6.4. Cuarto paso	57
7. Análisis de resultados	63
7.1. Análisis de temperaturas recolectadas Puente General Santander	63
7.2. Informes Puente Matatigres	75
7.3. Análisis numérico	93
7.4. Análisis comparativo	100
7.5. Efectos térmicos en la estructura	102
Conclusiones	104
Recomendaciones	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los puentes según su material. Fuente: Elaboración propia	18
Figura 2. Clasificación de los puentes según su tipología. Fuente: elaboración propia. ...	19
Figura 3. Elementos de un puente parte I. Fuente: elaboración propia	20
Figura 4. Elementos de un puente parte II. Fuente: elaboración propia	21
Figura 5. Mapa conceptual de la definición de termodinámica.	24
Figura 6. Mecanismos de Transferencia de calor: conducción, radiación y convección. 26	
Figura 7. Transferencia de calor a través de la conducción.	28
Figura 8. Transferencia de calor por radiación.	30
Figura 9. Transferencia de calor por convección.	31
Figura 10. Zonas laminar y turbulenta en una placa plana durante el flujo en la capa limite	33
Figura 11. Cantidad de publicaciones realizadas en cinco años.	35
Figura 12. Documentos por año registrados en Scopus.	37
<i>Figura 13. Documentos por autor registrados en Scopus.</i>	<i>37</i>
Figura 14. Documentos por universidad o institución registradas en la base de Scopus. .38	
<i>Figura 15. Documentos por país registrados en Scopus.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 16. Documentos por Área temática registrados en Scopus.39</i>	
<i>Figura 17. Ubicación puente vehicular No. 1.</i>	<i>43</i>
Figura 18. Imágenes puente No. 1.	44
<i>Figura 19. Ubicación puente No.2.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 20. Algunos puntos de análisis.</i>	<i>46</i>
Figura 21. Cámara térmica, modelo FLIR ONE PRO.	47
Figura 22. Imagen de temperaturas registradas por la estructura del puente.	47
Figura 23. Fotografía No 1 con puntos para análisis.	48
Figura 24. Fotografía No 2 con puntos para análisis.	49
Figura 25. Fotografía No 3 con puntos para análisis.	49
<i>Figura 26. Fotografía No 4 con puntos para análisis.</i>	<i>50</i>
Figura 27. Fotografía No 1 con puntos para análisis.	51
<i>Figura 28. Fotografía No 2 con puntos para análisis.</i>	<i>52</i>

Figura 29. Fotografía No 3 con puntos para análisis.....	52
Figura 30. Fotografía No 4 con puntos para análisis.....	53
Figura 31. Fotografía No 5 con puntos para análisis.....	53
Figura 32. Fotografía No 6 con puntos para análisis.....	54
Figura 33. Creación de carpeta con fotografías para cada uno de los puentes	55
Figura 34. Interfaz de la aplicación FLIR Tools.	56
Figura 35. Identificación de puntos para el análisis con trazado de líneas y rectángulos.	56
Figura 36. Temperatura más alta registrada en el puente Matatigres.	57
Figura 37. Temperatura más alta registrada en el puente General Santander.....	58
Figura 38. Temperaturas más bajas registradas en el puente Matatigres.....	59
<i>Figura 39. Temperaturas más bajas registradas en el puente General Santander</i>	<i>60</i>
Figura 40. Grafica de datos meteorológicos para el mes de agosto en la ciudad de Bogotá.	61
Figura 41. Grafica de radiación presentada en el mes de agosto en la ciudad de Bogotá.	62
Figura 42. Informe generado para fotografía No 1 - Perfil entrada al puente.....	65
Figura 43. Temperaturas registradas en el horario de la mañana y de la tarde para el tablero.	66
Figura 44. Temperaturas registradas en punto de interés en ambos horarios (mañana y tarde) en bordillo.....	66
Figura 45. Fotografía No 2 Tablero, apoyos parte inferior del puente.....	67
Figura 46. Temperaturas registradas en ambos horarios (mañana y tarde) para el tablero..	68
Figura 47. Temperaturas registradas en ambos horarios (mañana y tarde) en la viga.	69
Figura 48. Fotografía No 3 perfil puente, tablero y viga..	70
Figura 49. Temperaturas registradas en punto de análisis de ambos horarios (mañana y tarde) para el tablero.	71
Figura 50. Temperaturas registradas en punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) en la viga.	71
Figura 51. Fotografía No 4 parte superior del puente.....	72
Figura 52. Temperaturas registradas en punto de análisis para ambos horarios (mañana y tarde) para el tablero.	73

Figura 53. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para el tablero.	73
Figura 54. Comparación de temperaturas registradas en parte superior vs parte inferior del puente.....	74
Figura 55. Fotografía No 1 tablero parte superior.....	76
Figura 56. Temperaturas registradas para tablero en horarios de mañana y tarde para el tablero.....	77
Figura 57. Temperaturas registradas para bordillo en horarios de mañana y tarde en bordillo	78
Figura 58. Fotografía No 2 con puntos para análisis.....	79
Figura 59. Temperaturas registradas para horario de mañana y tarde para el tablero.....	80
Figura 60. Temperaturas registradas en punto de análisis en ambos horarios en el voladizo.	80
Figura 61. Temperaturas registradas en la mañana y en la tarde en la columna.....	81
Figura 62. Temperaturas registradas en la mañana y en la tarde en viga.	81
Figura 63. Fotografía No 3 con puntos para análisis.....	82
Figura 64. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para el tablero..	83
Figura 65. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) en voladizo.	83
Figura 66. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) en viga.	84
Figura 67. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) en la columna.....	84
Figura 68. Fotografía No 4 con puntos para análisis en la Y.....	85
Figura 69. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para tablero.	86
Figura 70. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para unión.	86
Figura 71. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) en la viga	87

Figura 72. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) en el voladizo.....	87
Figura 73. Fotografía No 5 con puntos para análisis.....	88
Figura 74. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para tablero.	89
Figura 75. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para voladizo.	89
Figura 76. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para la viga.	90
Figura 77. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) en la columna.....	90
Figura 78. Fotografía No 6 con puntos para análisis.....	91
Figura 79. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para el tablero.	92
Figura 80. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para bordillo.....	92
Figura 81. Equilibrio térmico en el puente.	94
Figura 82. Temperatura superficial del tablero en la mañana en el tablero.....	97
Figura 83. Temperaturas superficiales en el tablero en el horario de la tarde.	98
Figura 84. Temperaturas superficiales del tablero en la mañana.....	99
Figura 85. Temperaturas superficiales en el tablero para el horario de la tarde.	99
Figura 86. Comparación de temperaturas registradas in situ y las registradas por la estación meteorológica del aeropuerto internacional El Dorado..	101
Figura 87. Comparación Norma CCP 14 Vs balance numérico.	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Procedimiento A. -----	22
Tabla 2. Bases para gradientes de temperatura. -----	23
Tabla 3. Cantidad de artículos por año según la base de datos Scopus. -----	34
Tabla 4. Artículos elegidos. -----	36
Tabla 5. Propiedades de los materiales -----	93

RESUMEN

El (Código Colombiano de Diseño de Puentes((CCP-14), 2014) es la base fundamental para el diseño de puentes, este especifica cada uno de los componentes a tener en cuenta a la hora de calcular y diseñar este tipo de estructuras. Sin embargo, los daños o cambios causados por factores ambientales como el clima en los puentes; están regionalizados en este código para el territorio colombiano.

Es muy importante evaluar estos cambios de temperatura, ya que causan deformaciones, desgastes y otras condiciones en la estructura que pueden conducir a la falla. El calor es transferido a un puente por medio de los mecanismos de radiación y convección (especialmente la convección forzada que se da por acciones del viento). En el presente trabajo se pretende evidenciar estos cambios de temperatura superficial presentados en el puente vehicular de Matatigres ubicado en la Calle 38 a sur y el puente vehicular General Santander ubicado en la NQS con Av. carrera 50 de la ciudad de Bogotá, mediante el monitoreo in situ durante el periodo del mes de agosto del 2020 en dos horarios (mañana y tarde). Una vez obtenidos los datos a través de la cámara térmica FLIR ONE PRO, se realiza un análisis de las temperaturas registradas mediante un modelo numérico el cual permitirá determinar cuál es el comportamiento de estas estructuras ante la transferencia de calor que experimentan.

PALABRAS CLAVE: puente, transferencia de calor, temperatura, convección forzada.

ABSTRACT

The (CCP-14, 2014) (Colombian bridge design code) is the fundamental basis for the design of bridges, it specifies each one of the components to take into account when calculating and designing this type of structure. However, damage or changes caused by environmental factors such as weather on bridges; They are regionalized in this code for the Colombian territory.

It is very important to evaluate these changes in temperature, as they cause deformation, wear and other conditions in the structure that can lead to failure. Heat is transferred to a bridge through the mechanisms of radiation and convection (especially forced convection caused by the actions of the wind). The present work aims to demonstrate these surface temperature changes presented in the Matatigres vehicular bridge located on Calle 38 south and the General Santander vehicular bridge located on the NQS with Ak. 50 of the city of Bogotá, through on-site monitoring during the period of August 2020 in two hours (morning and afternoon). Once the data have been obtained through the FLIR ONE PRO thermal camera, an analysis of the temperatures recorded is carried out using a numerical model, which will allow us to determine the behavior of these structures in the face of the heat transfer they experience.

KEY WORDS: bridge, heat transfer, temperature, forced convection.

1. Introducción

En Colombia han sido varios los casos de colapsos de puentes vehiculares por diferentes causas. La más frecuente quizás, es el diseño equivoco o falla humana en el cálculo de la estructura que terminan en destrucción parcial o total de la estructura, y aún más grave en pérdidas humanas. Hoy en día, es un tema bastante alarmante por lo que se ha llegado a reflexionar e implementar soluciones desde la raíz del problema, como por ejemplo revisar los códigos de diseños. Es de conocimiento general que el CCP-14 (código colombiano para el diseño de puentes) está basado principalmente en el Código AASTHO LRFD (factores de diseño de carga y resistencia), la cual es una norma extranjera que considera muchos factores propios del territorio americano. Es de resaltar que en el diseño estructural de un puente vehicular se deben tener en cuenta numerosas variables que afectaran directamente la estructura; como los son las cargas (propias, vivas, de viento) o factores ajenos como los impactos ambientales. Pues bien, el CCP-14 asume los factores térmicos del territorio americano y como tal no existen datos fundamentados de los comportamientos de estas estructuras frente a las temperaturas y cambios ambientales que se dan en el territorio colombiano, para ser más precisos en la ciudad de Bogotá. Conocida por su clima cambiante y cambios bruscos de temperatura.

Entonces en este trabajo se busca analizar los efectos térmicos por causas meteorológicas en dos puentes del sur de la ciudad de Bogotá; el primero es el puente de Matatigres ubicado en la calle 38 a sur y el segundo es el puente General Santander ubicado en la NQS con Av. carrera 50. El primero es un puente cuyo objetivo de construcción fue descongestionar esta parte de la ciudad brindando salidas a avenidas principales como el Quiroga. El segundo puente fue construido como parte de la fase de Transmilenio por la NQS.

1.1. Antecedentes

Bogotá Distrito Capital, es la capital de la Republica de Colombia . Situada en la Sabana de Bogotá en la meseta Cundi-boyacense en la Cordillera Oriental de los Andes, a unos 2.630 metros sobre el nivel del mar. El área total es de 1776 kilómetros cuadrados y el área urbana es de 307 kilómetros cuadrados.

Bogotá es el principal centro económico e industrial de Colombia. La mayoría de las capitales de las otras ciudades convergen aquí, por lo que es el foco de comercio del país a raíz de su numerosa población (Castro C., 1989).

Es evidente el crecimiento poblacional y con ello la necesidad de ser una ciudad moderna, que brinde calidad de vida a sus habitantes. Es la razón por la que la ciudad necesita proyectos de infraestructura vial que les permitan optimizar tiempos de desplazamiento dentro de esta.

1.2. Estado de la infraestructura

En Bogotá existen 959 puentes de los cuales 554 son vehiculares y 405 son de uso peatonal (IDU, 2019). Esta cifra fue determinada por la entidad a través de visitas de campo, con las cuales se pudo constatar la cifra de puentes y su distribución en las distintas localidades de la capital. Esta entidad también pudo verificar que en cuanto material de construcción se refiere se recalca el concreto, seguidos están los puentes metálicos y por último están los puentes mixtos o de algún otro material. Igualmente resaltan que Bogotá en su malla vial arterial cuenta con un total de 309 puentes vehiculares.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar la temperatura superficial presente en la estructura del puente vehicular de la NQS (Autopista Sur) con Av. Carrera 50 y el puente vehicular ubicado en la Calle 38 A sur (Mata Tigres) (Bogotá), a través de una cámara térmica en el periodo de agosto del 2020.

2.2. Objetivos específicos

Realizar el monitoreo en campo para ambos puentes, a través de fotografías térmicas con la cámara FLIR ONE PRO. En horarios de mañana y tarde, durante 20 días consecutivos.

Identificar las variaciones de temperatura en el tablero del puente, analizando las diferencias presentadas de la parte superior e inferior de este durante el periodo de estudio.

Analizar los datos obtenidos mediante la aplicación FLIR TOOL y posteriormente realizar una comparación con los datos registrados en la estación de monitoreo de aeropuerto el dorado.

3. Marco Teórico

El hombre a partir de la iniciación de su existencia, requiere trasladarse de un lugar a otro por diversos motivos: Por subsistencia, necesidad de intercambio con sus semejantes, algunas más por la guerra. Encontró obstáculos para realizar sus desplazamientos, tales como: La presencia de ríos, hondonadas y otros accidentes, algunas veces insalvables, aún con los medios disponibles a su alcance. No obstante, buscó la manera de lograr vencerlos, inicialmente, de forma rudimentaria y con el transcurso del tiempo, más perfeccionada. Entre las soluciones halladas para vencer las dificultades de desplazamiento, encontró los puentes.

En términos generales el (IDU, 2014) expresa; un puente es una estructura importante para cualquier desarrollo comunitario. Porque permiten el desplazamiento a los usuarios de la infraestructura vial y les aportan mayor agilidad. Por lo tanto, están contruidos para permitir la comunicación entre dos puntos. Separado por obstáculos naturales o artificiales, como ríos, arroyos, depresiones Terrenos, canales, carreteras, infraestructura urbana, etc.

3.1. Los puentes y sus cargas térmicas

Dar una definición simple sobre el significado del concepto de puentes, no resulta nada fácil. (Somenson, 2015) nos dice entonces, que un puente es una construcción que permite generar una plataforma de apoyo elevada con respecto al suelo, sobre la cual pueden circular uno o más tipos de flujo. Esto dentro del ámbito de la ingeniería civil.

Entonces podemos encontrar que los puentes tienen diversas clasificaciones según sus materiales, unos usos y también deben cumplir con ciertos requerimientos.

A continuación, encontraremos un mapa conceptual (Figura 1) con la clasificación de los puentes según el material donde se resaltan sus principales características.

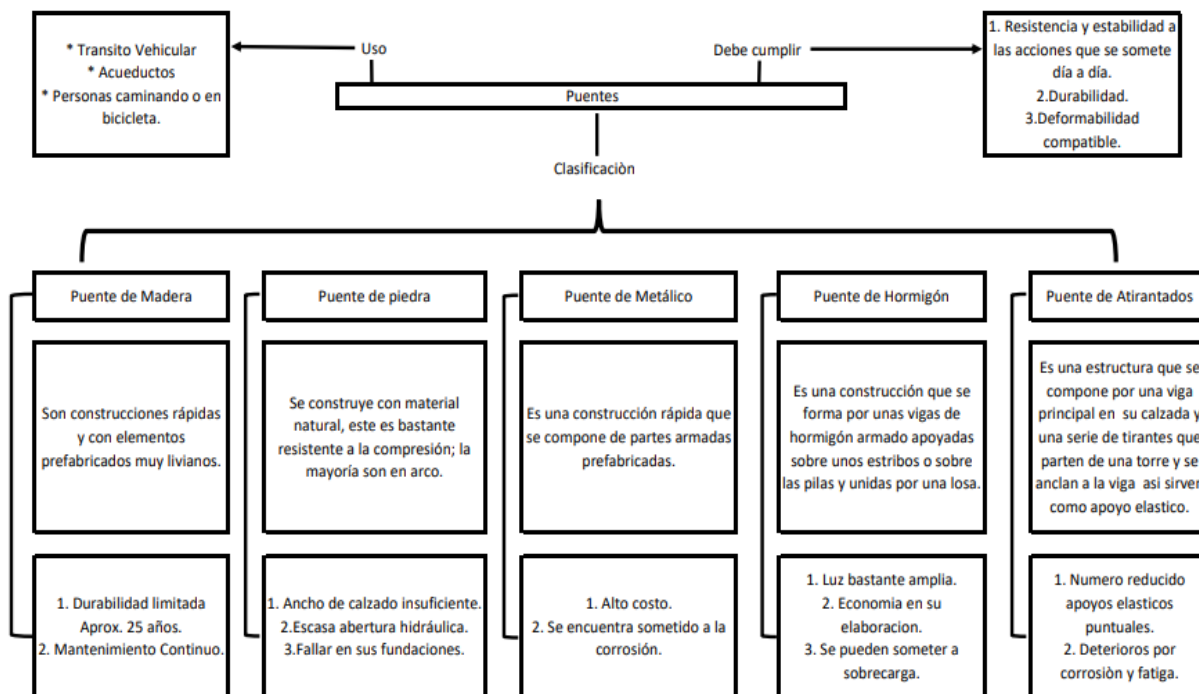
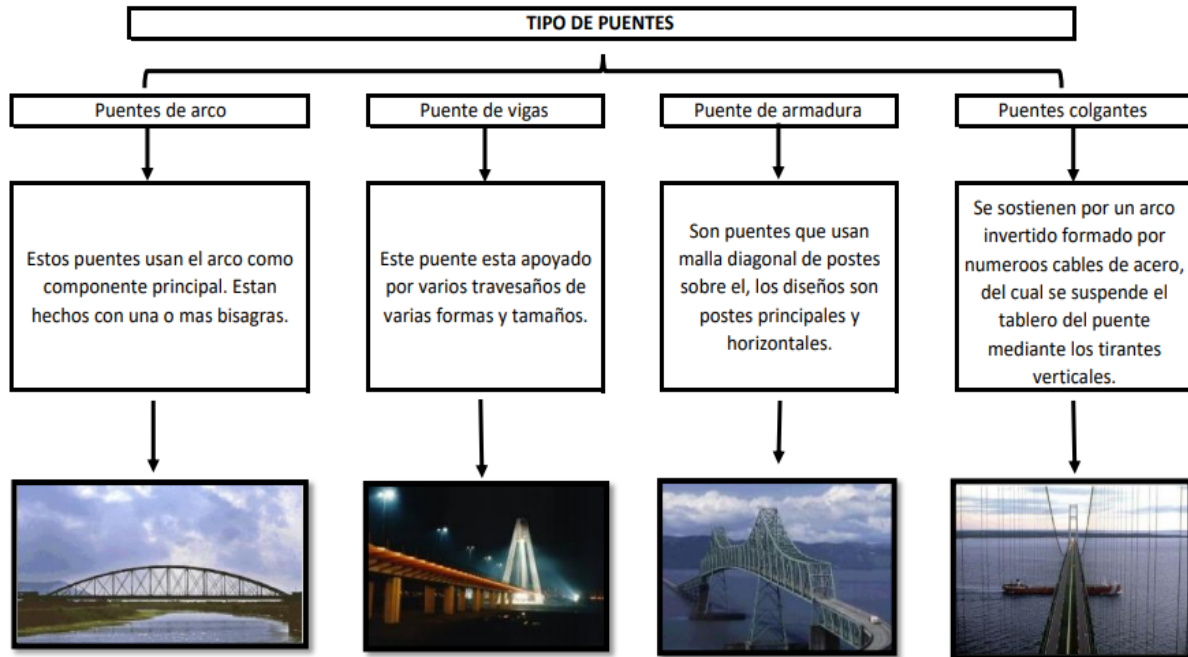


Figura 1. Clasificación de los puentes según su material. Fuente: Elaboración propia

En la clasificación por tipología de puentes, encontramos su configuración estructural. El siguiente mapa conceptual (Figura 2) muestra las tipologías de puentes que se pueden hallar.



*Figura 2. Clasificación de los puentes según su tipología. Fuente: elaboración propia.
Imágenes: extraídas de (Ramírez, 2012) y (Veracruz, 2012)*

3.2. Elementos de un puente

Las partes de un puente son los elementos que componen generalmente la estructura. Son característicos en todo tipo de puente, ya que son directamente responsables de la funcionalidad de estos. A continuación, encontraremos cada uno de estos elementos descritos de forma breve mediante dos mapas conceptuales representados en la Figura 3 y 4.

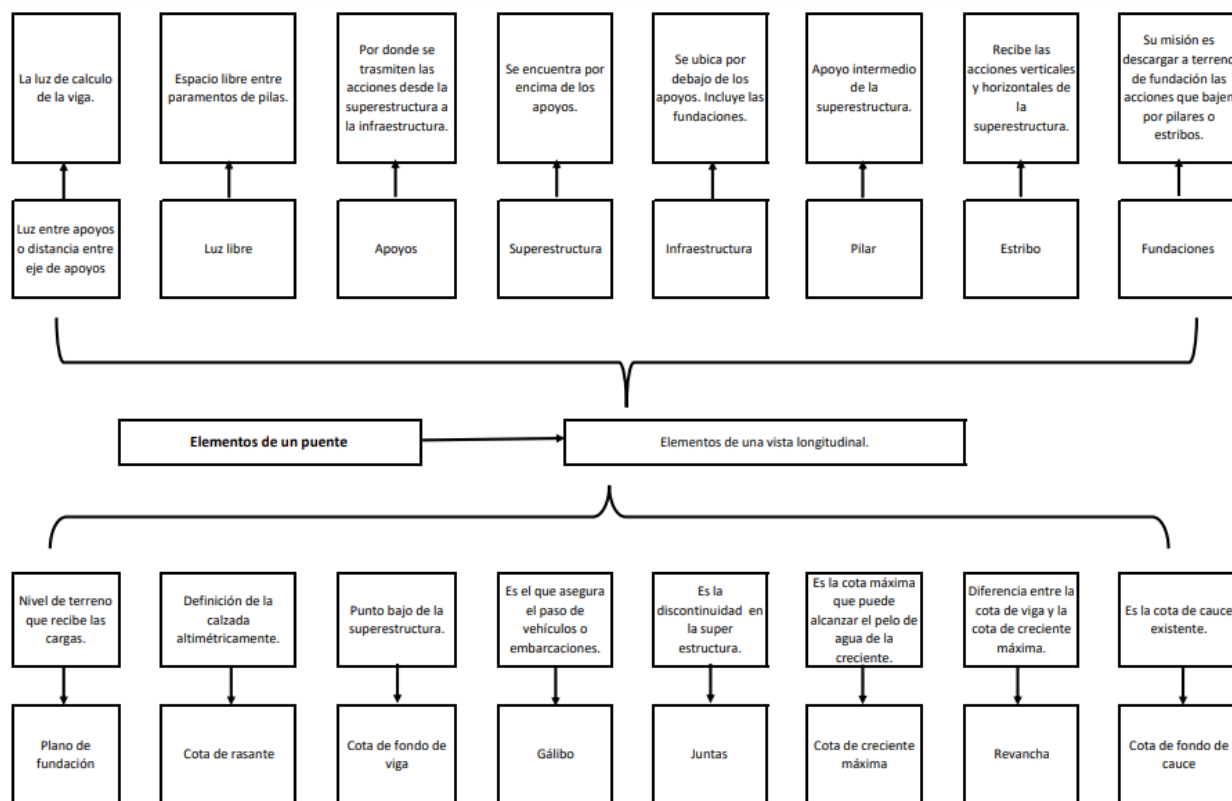


Figura 3. Elementos de un puente parte I. Fuente: elaboración propia

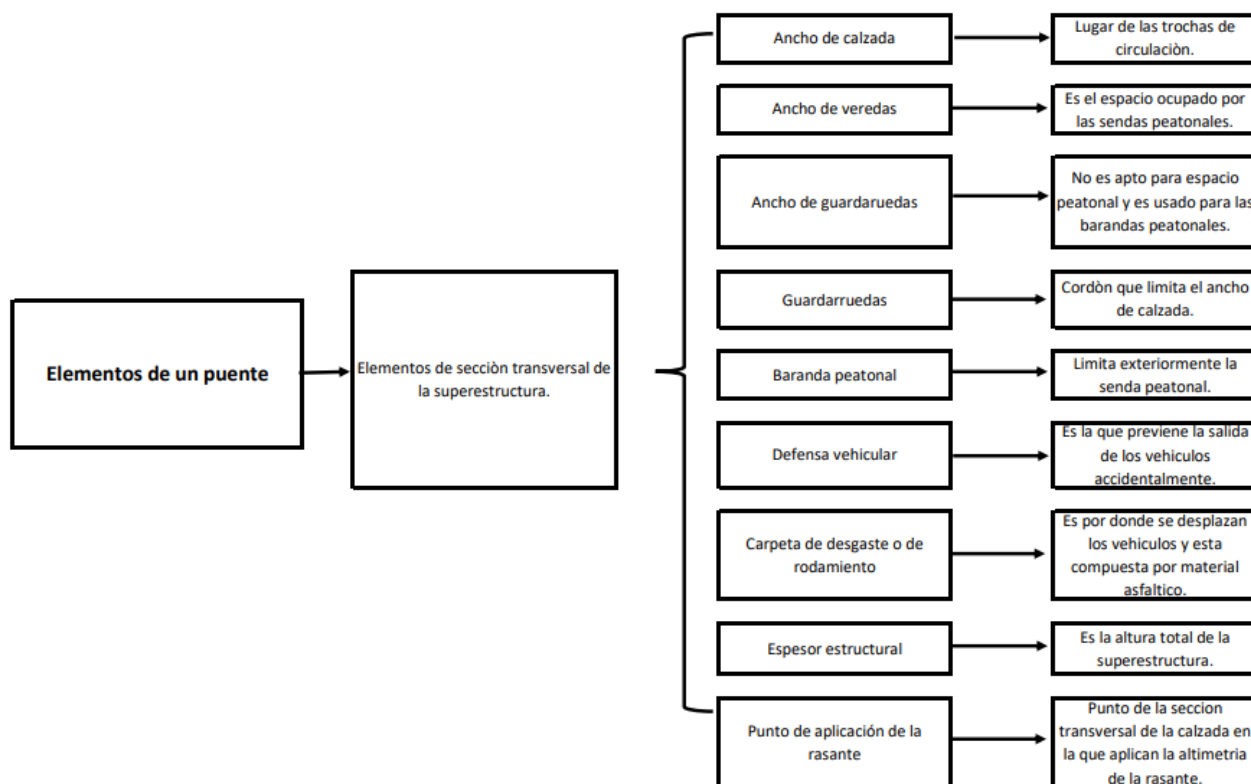


Figura 4. Elementos de un puente parte II. Fuente: elaboración propia

3.3. Cargas térmicas en los puentes

En el diseño de un puente existen factores que son determinantes a la hora de llevar a cabo dicha construcción. Hablamos de los diferentes tipos de cargas que son tomadas en cuenta durante el proceso de diseño entre ellas están las cargas vivas, muertas, cargas permanentes, de viento, de agua y las cargas térmicas en las cuales se hará énfasis.

Como todos sabemos, si la temperatura de un objeto aumenta, su tamaño aumentará (se expandirá), y si la temperatura disminuye, su tamaño disminuirá (Ortiz L, 2007).

La temperatura tiene dos efectos diferentes en la estructura, el primero es los cambios uniformes de temperatura producirán estrés interno, el segundo es Gradiente de temperatura causado por calentamiento desigual (Johnson, 2005)

Si el cambio de temperatura es lineal a lo largo de la sección transversal del puente sencillamente transportado, no habrá estrés, pero si el cambio no es lineal, entonces la estructura se verá afectada por la tensión porque las fibras conectadas no exhiben expansión de temperatura libre (Ghali, A. Favre, 2002), citado por (Rojas, 2019).

3.4. Normativa colombiana CCP- 2014

El CCP-2014 en su numeral 3.12 habla sobre algunos factores que se deben incluir en el diseño de un puente referente a las cargas térmicas; estos son la temperatura uniforme y el gradiente de temperatura.

El cálculo de la temperatura uniforme se puede hacer mediante el procedimiento A como se muestra en la tabla 1. Este procedimiento es un método que se ha usado para el diseño de puentes a través de la historia. Los intervalos de temperatura en este procedimiento están indicados en la tabla 1 y para realizar el cálculo de los efectos de las deformaciones térmicas debemos tomar la diferencia entre los límites inferior o superior y la temperatura de construcción elegida en el diseño de la estructura.

Tabla 1. Procedimiento A.

Clima	Metálicos (°C)	Concreto (°C)
Moderado	-18 a 49	-12 a 27
Frio	-35 a 49	-18 a 27

Fuente: (CCP-14, 2014)

Para el cálculo del **gradiente de temperatura** se tomará como base la tabla 2 con la cual se calcula el cambio de la temperatura con la profundidad en la sección transversal de la estructura, pero no la temperatura absoluta. Dice también que, en el caso de valores positivos de temperatura para diferentes condiciones en la superficie del tablero, deben tomarse los valores de la tabla 2.

En el caso de los valores negativos de temperatura estos se hallan multiplicando los valores de la tabla 2 por -0.30 para tableros de concreto y -0.20 para tableros de asfalto.

Tabla 2.

Bases para gradientes de temperatura.

Zona	T_1, °C	T_2, °C
1	30	7.8
2	25	6.7
3	23	6
4	21	5

Fuente: (CCP-14, 2014)

3.5. La Termodinámica y la transferencia de calor

La termodinámica se define como la ciencia encargada de estudiar las leyes que dirigen la transformación de la energía, el curso en el cual fluye el calor y la disponibilidad (exergía) de la energía para hacer trabajo. Es de resaltar que estos procesos de transformación de energía pueden estar seguidos de cambios físicos y químicos (Jiménez Bernal & Gutiérrez Torres, 2014).

Ninguna rama de la ciencia tiene mayores consecuencias para la vida humana que la

termodinámica (Browne, 2013). En la Figura 5 se presenta un mapa conceptual donde se explica de donde proviene el término, su definición y las variables que la componen.

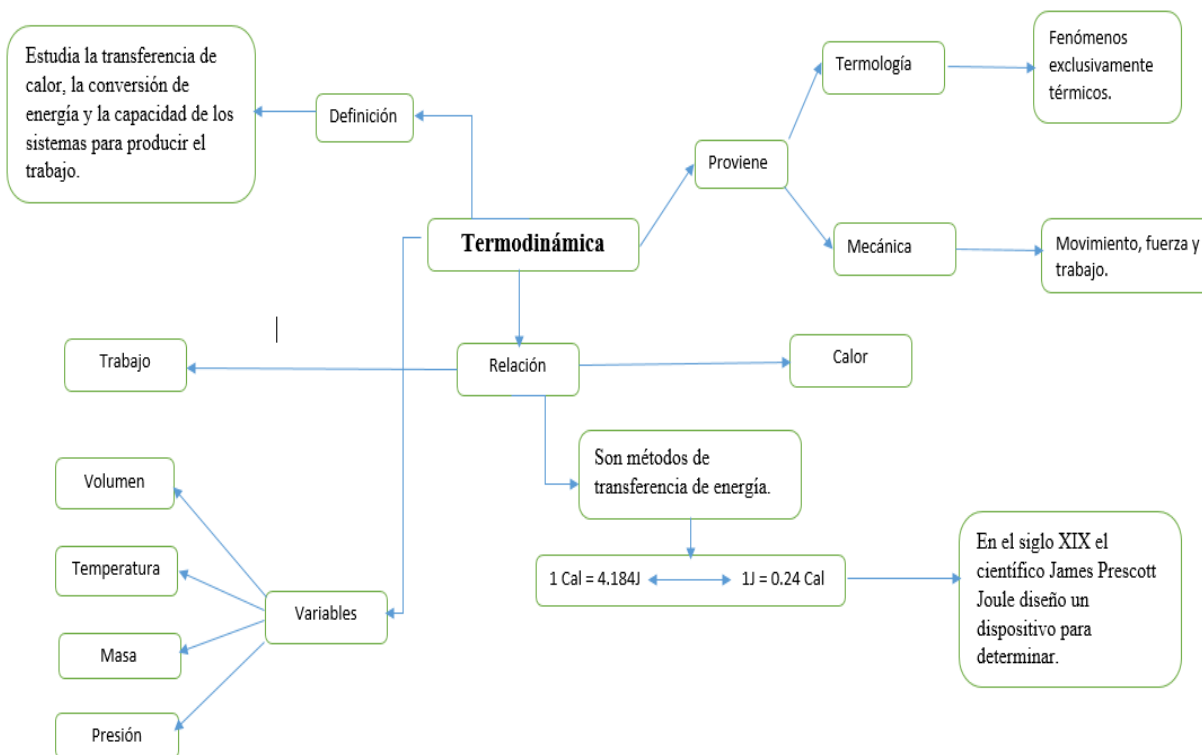


Figura 5. Mapa conceptual de la definición de termodinámica. Fuente: elaboración propia.

3.6. Relación de temperatura y calor

La temperatura es la medida que discretiza la cantidad de energía contenida en un cuerpo en forma de calor, siendo directamente proporcional la temperatura de un cuerpo con el calor; es decir, si el cuerpo contiene una cantidad elevada de calor la temperatura que reflejara será elevada (ÇENGEL, 2007).

A través del tacto, se puede saber si hace calor o frío, sin embargo, para medir la temperatura con precisión, requerimos realizar mediciones de varias propiedades físicas que varían con la temperatura de forma repetitivo. Si dos objetos se ponen en contacto, llegarán a la

misma temperatura. Dos objetos a la misma temperatura están en equilibrio térmico (Browne, 2013).

La energía puede encontrarse en múltiples formas. Las formas vinculadas con su configuración molecular se les denominan energía microscópica y la suma de todas estas se define como energía interna del sistema. Se define como calor a una forma de energía capaz de transferirse de un sistema a otro como consecuencia de la diferencia de temperatura (ÇENGEL, 2007).

3.7. Velocidad y transferencia de calor

Es la acción que realiza la energía en forma de calor, al pasar de un cuerpo a otro. Este proceso se lleva a cabo siempre y cuando existan diferencias de temperaturas entre estos cuerpos. La transferencia de calor siempre se produce del medio que tiene la mayor elevación de temperatura hacia el medio que posee una temperatura más baja (ÇENGEL, 2007).

Es la energía de transmisión causada por la diferencia de temperatura entre diferentes partes del sistema, entre dos o más sistemas, o entre el sistema y el medio ambiente (Muñoz Domínguez, M. Montes Pita, M. J. y de Antonio, 2014).

En la Figura 6, se pueden observar cada uno de los mecanismos por los cuales se transfiere el calor. Estos mecanismos son: conducción, convección y radiación, a continuación, se describen y se explica cómo es el proceso de transferencia.

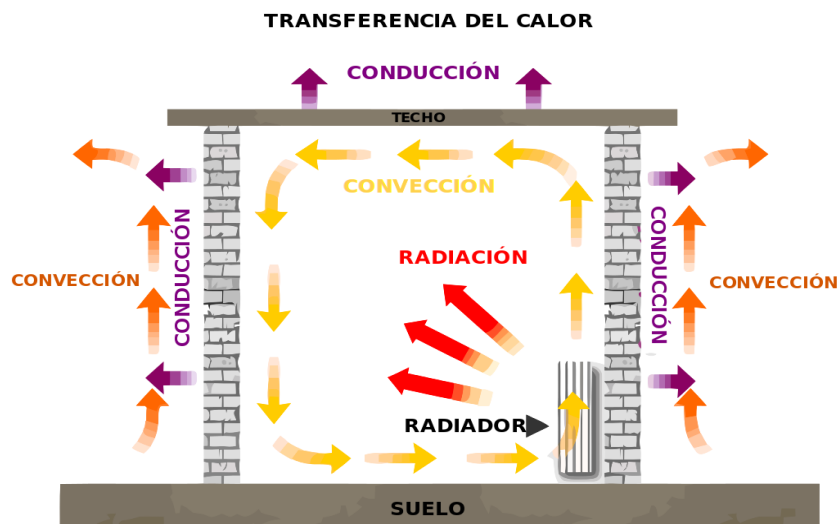


Figura 6. Mecanismos de Transferencia de calor: conducción, radiación y convección. Fuente: tomado de (Torres, 2010)

4. Mecanismos de transferencia de calor

4.1. Conducción

La conducción es la transferencia de calor de un cuerpo con alta temperatura a otro cuerpo en contacto físico con temperatura más baja. Este proceso se da a nivel molecular lo que implica una transferencia de energía por parte de aquellas moléculas más energéticas a aquellas que presentan un nivel más bajo de energía. (Warren M. Rohsenow; James P. Hartnett; Young I. Cho, 1998). La conducción puede presentarse en los tres estados de la materia: sólido, líquido y gaseoso. En los gases y líquidos se da por los choques y la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos la transferencia se da cuando las moléculas se combinan a través de su vibración y se presenta un transporte de energía por parte de electrones que fueron liberados en dicha combinación (ÇENGEL, 2007).

En cuanto a la rapidez o razón de la conducción (ÇENGEL, 2007) concluye:

La conductividad en la capa plana es directamente proporcional a la diferencia de temperatura e inversamente proporcional al espesor de la capa.

Es decir,

$$Q_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \quad (1)$$

Donde:

k: es la conductividad térmica del material

A: es el área rea de transferencia de calor.

$T_1 - T_2$: diferencia de temperaturas. (°C)

Δ_x : Espesor de la capa. (m).

Forma diferencial de la ecuación; Llamada *ley de Fourier*, en honor de J. Fourier.

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (2)$$

Donde:

dT/dx: Es el gradiente de temperatura.

El Signo negativo certifica una cantidad positiva de transferencia de calor en la dirección de x positiva.

k: Conductividad térmica del material.

A: Área de transferencia de calor.



Figura 7. Transferencia de calor a través de la conducción. Fuente: (Bing images, 2009)

4.1.1. Conductividad térmica

La capacidad para transportar calor en un material es medida a través de la conductividad térmica k . La conductividad térmica de un material se puede definir como la unidad de espesor del material a través de una unidad de espesor y la tasa de transferencia de calor por unidad de diferencia de temperatura por unidad de área. Un valor de conductividad térmica más alto indica que el material es buen conductor de calor y los valores bajos indican que es un mal conductor o aislante (ÇENGEL, 2007).

4.2. Radiación

La radiación es la energía emitida por un cuerpo llamados fotones como producto de los cambios en las distribuciones electrónicas de los átomos o moléculas. Es el mecanismo de transferencia de calor más veloz, ya que no necesita de intermediarios. Aquellos cuerpos que poseen una temperatura por encima del cero presentan radiación térmica (ÇENGEL, 2007).

El cálculo de la radiación térmica se basa en la *ley de Stefan-Boltzmann*; esto a nivel macroscópico, que relaciona el flujo de energía emitido por un cuerpo negro con la cuarta

potencia de la temperatura absoluta:

$$e_b = \sigma T^4 \quad (3)$$

Aquí:

σ : constante de Stefan-Boltzmann, con un valor de $5.669 \times 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K}^4)$. Las superficies de ingeniería en general no funcionan como radiadores ideales, y para superficies reales, la ley anterior se modifica;

$$e = \epsilon \sigma T^4 \quad (4)$$

Donde:

ϵ : es la emisividad de la superficie y posee un valor entre 0 y 1. Cuando dos cuerpos negros intercambian calor por radiación, el intercambio de calor neto es entonces proporcional a la diferencia en T^4 . Si el primer cuerpo "ve" solo el cuerpo 2, entonces el intercambio neto de calor del cuerpo 1 al cuerpo 2 viene dado por

$$q = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (5)$$

Cuando, debido a la disposición geométrica, solo una fracción de la energía que sale del cuerpo 1 es interceptada por el cuerpo 2,

$$q = \sigma A_1 F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4) \quad (6)$$

F_{1-2} = factor de forma. Es la fracción de energía que sale del cuerpo 1 que es interceptada por el cuerpo 2. En el caso de que los cuerpos no sean negros, el factor de forma es sustituido por uno nuevo, el cual dependerá de la emisividad ϵ de las superficies implicadas (Warren M. Rohsenow;

James P. Hartnett; Young I. Cho, 1998).

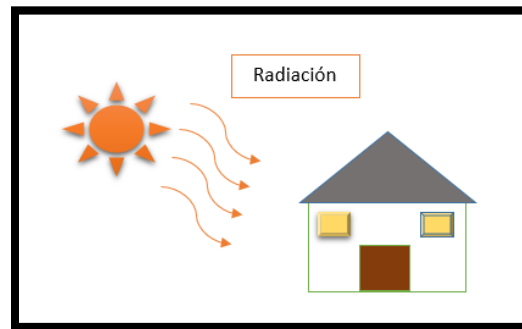


Figura 8. Transferencia de calor por radiación. Fuente: Adaptada de Identificamos el fenómeno de Radiación (Flores, 2015)

4.3. Convección

(Theodore L. Bergman; Adrienne S. Lavine; Frank P. Incropera; David P., 2011) Utilizan la expresión convección para representar la transferencia de energía que se da entre una superficie y un fluido que se desplace sobre esta.

La convección es la transferencia de energía entre un sólido y un líquido o gas, se da por el movimiento y la conducción del fluido. Recibe el nombre de **Convección forzada** si el movimiento del fluido es forzado mediante factores externos como una bomba, un ventilador o el viento. Como oposición la **Convección natural** se debe al movimiento del fluido como consecuencia de la diferencia de densidad ocasionada por la variación de temperaturas de este.

La rapidez de transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura (ÇENGEL, 2007).

Su ecuación determinante es:

$$Q_{conv} = hA_s (T_s - T_{\infty}) \quad (w) \quad (7)$$

Donde:

Q_{conv} : Transferencia de calor por convección (w).

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección ($\frac{w}{m^2}$).

A_s : Área superficial (m^2).

$T_s - T_\infty$: Diferencia de temperaturas entre la superficie (s) y el fluido (∞).

La convección como mecanismo de transferencia de calor no es tenida en cuenta por algunos. Se alega que es la misma conducción de calor. Sin embargo resulta bastante práctico dar reconocimiento como mecanismo de transferencia de calor, aun de los muy válidos argumentos en su contra (ÇENGEL, 2007).

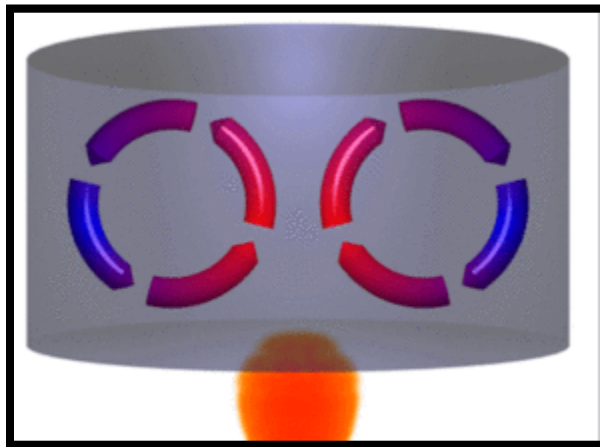


Figura 9. Transferencia de calor por convección. Fuente: (Daniel, 2018)

4.3.1. Convección Forzada Externa

La convección forzada significa que el flujo del fluido es causado por fuerzas externas distintas de la gravedad. Algunas fuentes para este son ventiladores, bombas y el viento (Rolle, 2006).

El movimiento del fluido en la capa límite se puede describir como flujo laminar, donde el fluido se mueve paralelo a la placa o flujo turbulento mientras gira alrededor de la capa límite. Estos dos flujos son conceptos cualitativos importantes en el análisis de flujo de fluidos y transferencia de calor y su caracterización es determinada a partir del número de Reynolds (Rolle, 2006).

En el flujo externo, las capas límite se desarrollan libremente, sin las restricciones impuestas por las superficies adyacentes. Por lo tanto, siempre habrá un área del flujo que está fuera de la capa límite, donde los gradientes de velocidad, temperatura y / o concentración son despreciables (Theodore L. Bergman; Adrienne S. Lavine; Frank P. Incropera; David P., 2011).

Según (ÇENGEL, 2007) La fuerza de resistencia al movimiento es afectada por los mismos fenómenos que la transferencia de calor y se reflejan en el número de Nusselt.

$$Nu = C Re_L^m Pr^n \quad (8)$$

Donde;

m y n: son exponentes constantes.

C: El valor de esta constante obedece a la estructuración geométrica y del fluido.

En la capa límite de velocidad, el flujo iniciara como laminar, sin embargo, si dicha placa es bastante larga este flujo cambiara a turbulento. Esta transición obedece a la estructuración geométrica de la superficie, aspereza, temperatura superficial y clase de fluido (ÇENGEL, 2007).

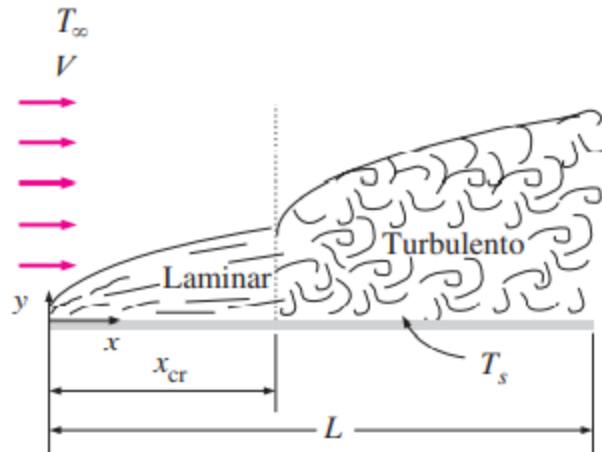


Figura 10. Zonas laminar y turbulenta en una placa plana durante el flujo en la capa limite. Fuente: (ÇENGEL, 2007).

5. Estado del Conocimiento

Se usa SCOPUS (Scopus, 2020) la base de datos de publicaciones científicas, para la cual es necesaria tener presente palabras claves para facilitar y poder ampliar la búsqueda de documentos. Se da inicio en la búsqueda así: Bridge, Concrete and Bridge, Effect and Thermal, Temperature, Temperature and Structur, Effect and Temperature, Distribution and Temperature, Engineering and Bridge, Load and Therman, Solar Radiation, Thermal, Load (Elsevier B.V., 2004).

Teniendo en cuenta que es una herramienta bastante amplia en cuanto a su información se decide tomar un límite de tiempo con el fin de contar con información más reciente.

Tabla 3.

Cantidad de artículos por año según la base de datos Scopus.

Palabra/ Año	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Bridge	75	60	80	84	118	37
Concrete- Bridge	1	0	1	4	1	0
Effect- Thermal	5	2	4	5	5	2
Temperature	111	111	133	218	145	50
Temperature – Structur	2	0	1	3	1	0
Effect – Temperature	9	20	10	18	15	6
Distribution- Temperature	1	1	1	3	4	0
Engineering – Bridge	0	0	0	5	3	0
Load- Therman	1	0	0	1	2	0
Radiation – Solar	3	8	2	4	9	4
Thermal	31	52	34	55	44	21
Load	19	16	8	16	11	4

Fuente: elaboración propia.

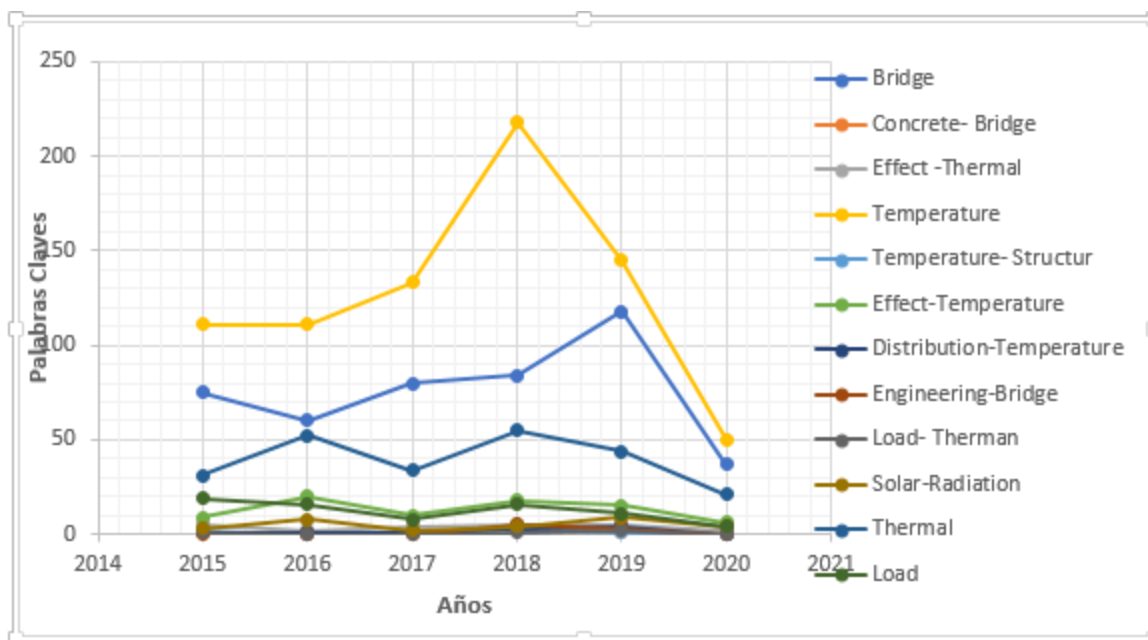


Figura 11. Cantidad de publicaciones realizadas en cinco años. Fuente: propia

Dado la amplitud en cuanto a información manejada por esta herramienta, se eligen algunos artículos científicos que hablan o tienen alguna relación con proyecto de investigación que se está realizando, Inicialmente se eligen 22 documentos científicos los cuales fueron publicados entre el año 2015 y 2020 que servirán como punto de referencia para llevar a cabo el desarrollo del proyecto.

A continuación, se encuentra la Tabla 4, en la cual se brindará información sobre los temas de enfoque de los 22 artículos.

Tabla 4.

Artículos elegidos.

Contenido	Citas
<i>Monitoreo de campo a las condiciones térmicas de vigas, puentes atirantados y fundaciones.</i>	(Lin et al., 2020)
	(Chen et al., 2020)
	(Lin, Xue, et al., 2020)
	(Sawicki & Brühwiler, 2020)
	(C. Liu et al., 2019)
	(Bayane et al., 2019)
	(Lin et al., 2019)
	(Reilly & Glisic, 2019)
	(Rózański & Ziopaja, 2018)
	(Tang et al., 2018)
	(Skorpen et al., 2018)
	(Gottsäter et al., 2018)
	(Dai et al., 2017)
<i>Modelos Matemáticos para la comparación de datos obtenidos en campo.</i>	(Huang et al., 2019)
	(Yang et al., 2018)
	(Shi et al., 2018)
	(Wang et al., 2018)
	(S. Liu et al., 2018)
<i>Aplicación de monitoreo de la salud estructural en los puentes vehiculares.</i>	(Song et al., 2018)
	(Sen et al., 2019)
<i>Experimentos realizados por medio de muestras obtenidas de los puentes.</i>	(Rocha & Póvoas, 2019)
	(Arias Jiménez & Bobadilla Moreno, 2017)

Fuente: extraído de (Scopus, 2020)

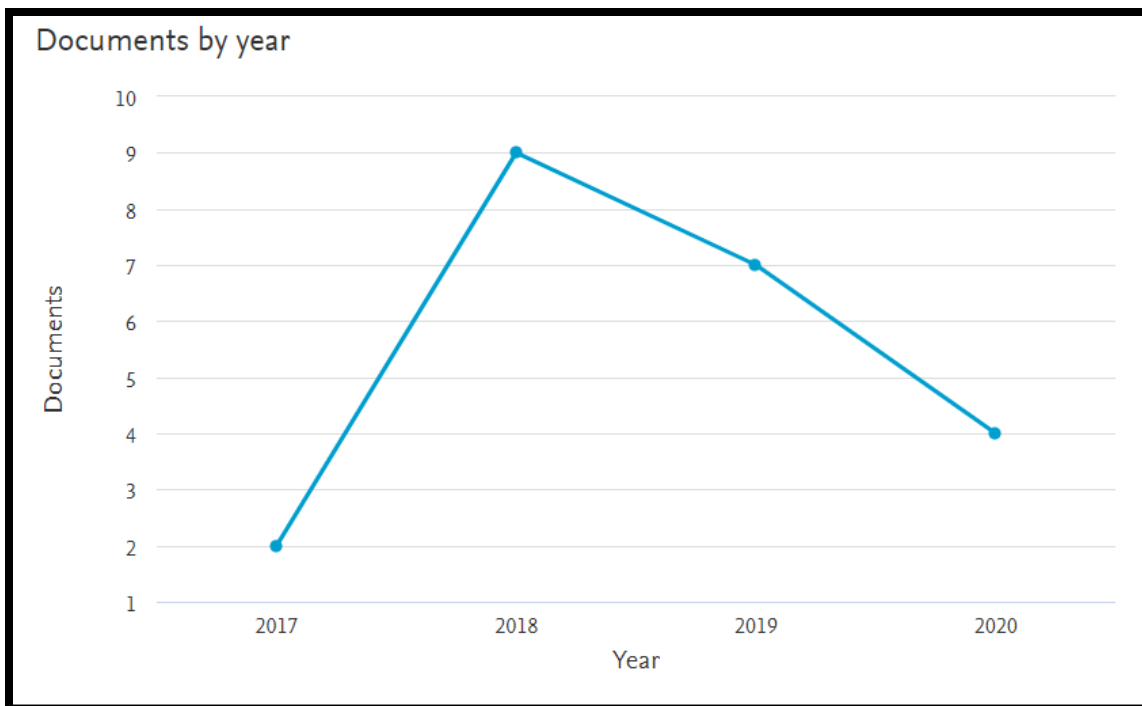


Figura 12. Documentos por año registrados en Scopus.

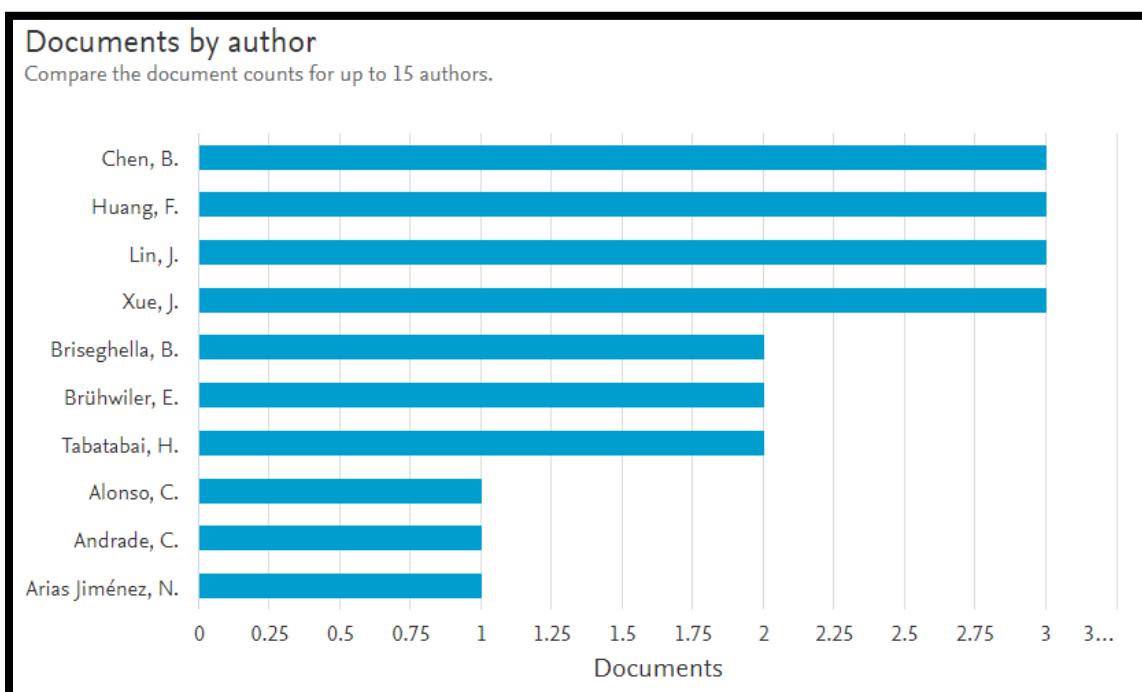


Figura 13. Documentos por autor registrados en Scopus. Fuente: extraído de (Scopus, 2020)

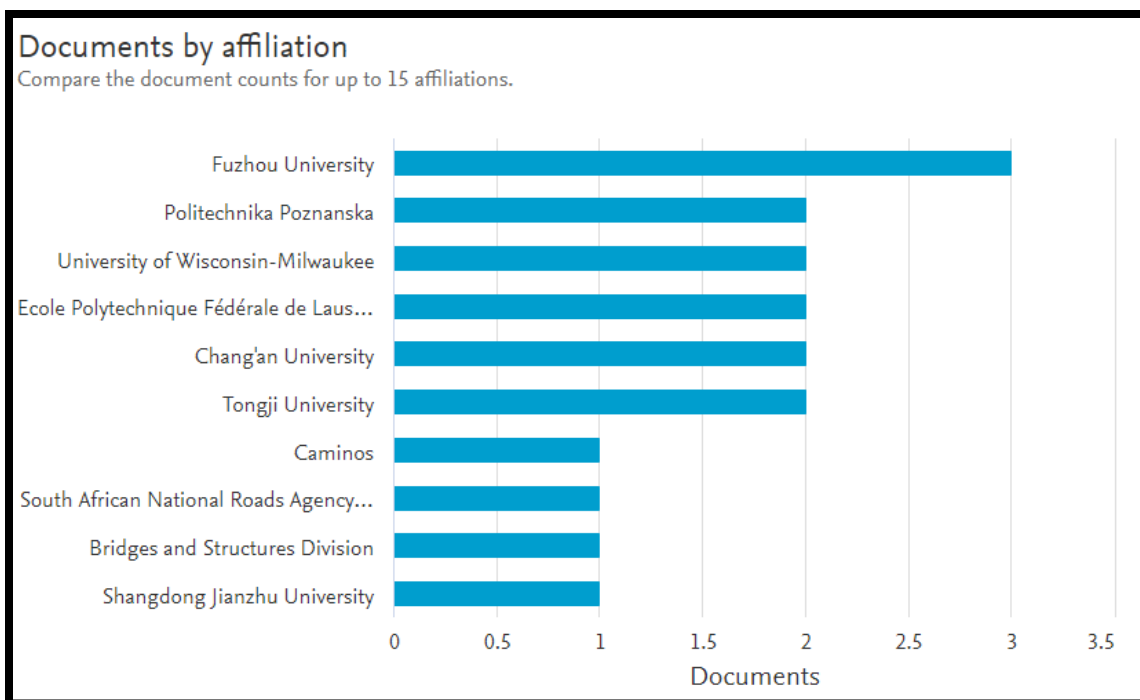


Figura 14. Documentos por universidad o institución registradas en la base de Scopus.

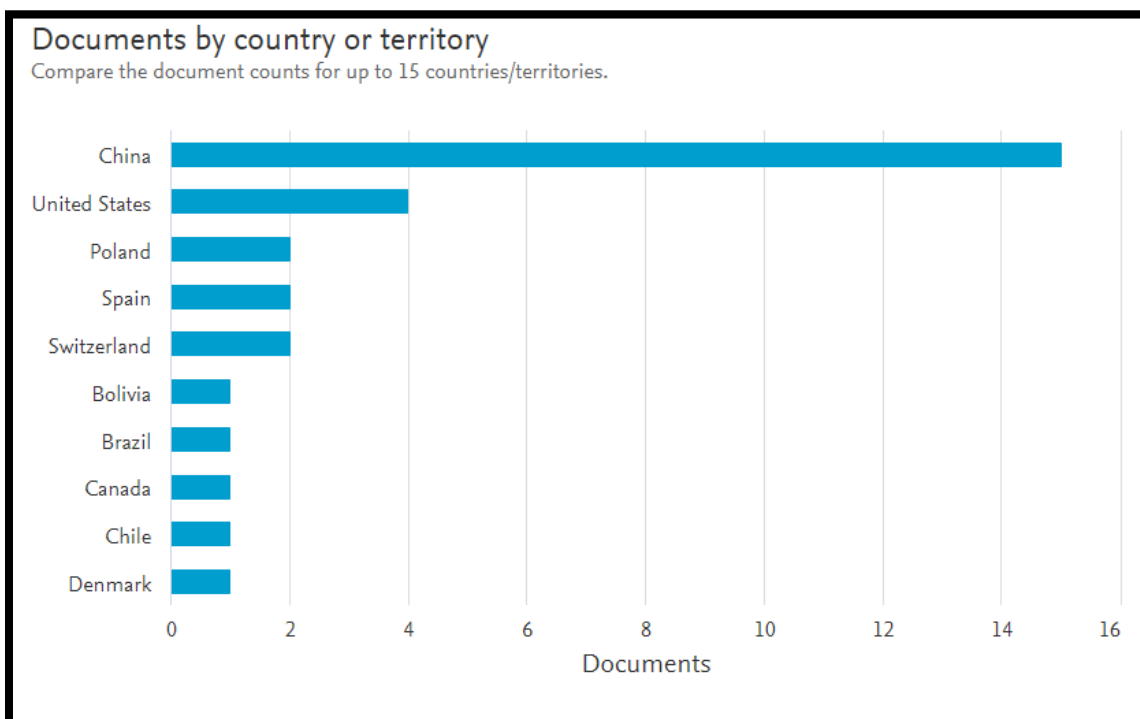


Figura 15. Documentos por país registrados en Scopus. Fuente: extraído de (Scopus, 2020)

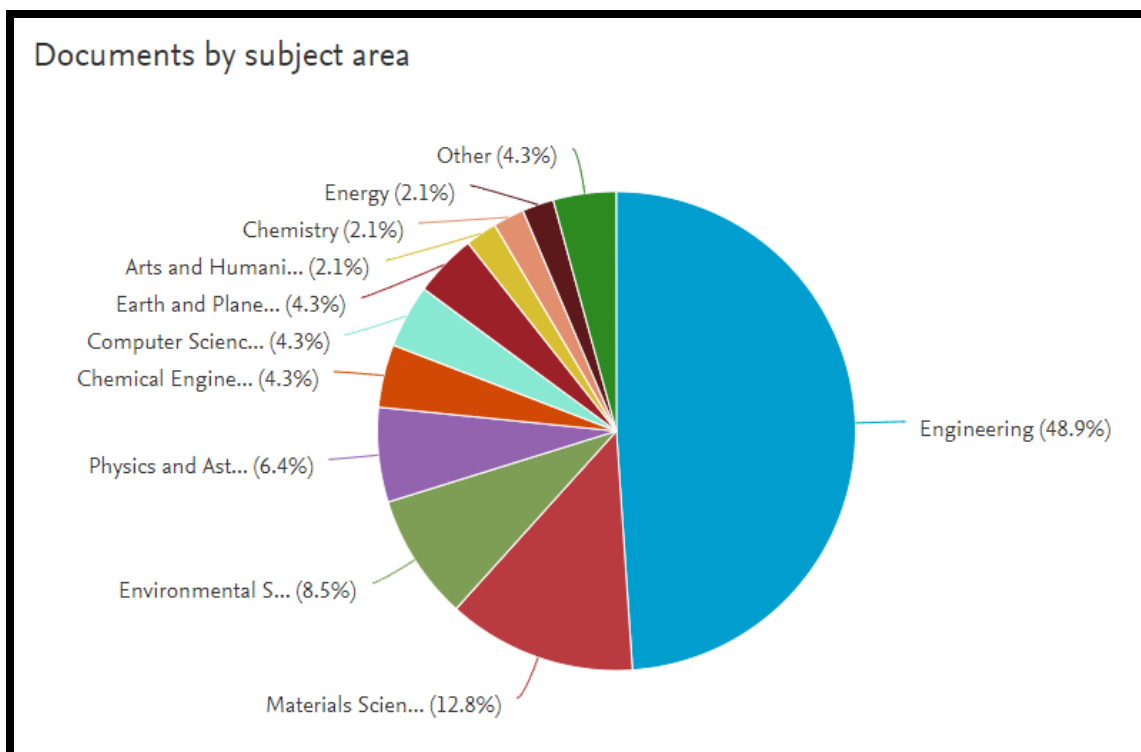


Figura 16. Documentos por Área temática registrados en Scopus. Fuente: extraído de (Scopus, 2020)

5.1. Enfoque al estado del conocimiento.

5.1.1. Convección en puentes

(Song et al., 2018) estudián las situaciones reales de las temperaturas de la superficie y las fuerzas de los pilotes de hormigón en la fase temprana, analizando las influencias de la convección variable en el tiempo sobre las tensiones de la temperatura en la superficie.

El cálculo de los efectos de la temperatura, se basará en los parámetros de convección correspondientes para el proceso de construcción y se aplicará la velocidad de viento promedio de 12 horas como límite a la superficie de la estructura después de la remoción del encofrado.

En el puente segundo de la Carretera del Río Yangtze de Wuhu se analizaron las influencias de las frecuentes velocidades del viento, usando el ANSYS para los procesos de

enfriamiento sobre las tensiones de temperatura del pilón en fase temprana y las técnicas de protección. Dando como resultado que, altos esfuerzos de tracción en la superficie del pilón y la influencia de la frecuente velocidad del viento son la razón principal de una gran variedad de grietas. En este caso la optimización de técnicas de protección y adaptación del enfriamiento pueden ayudar a reducir la tensión acumulada y tensión instantánea en la superficie de la estructura.

Basados en el proceso de enfriamiento se propone un método de control activo de parámetros convectivos, que ayuden acelerar los efectos de la convección en la fase inicial para mejorar la seguridad anti-fisuras de la estructura. Los cálculos determinan que la tasa de enfriamiento de la superficie en la etapa de control es de $6 - 13^{\circ} \text{C/ d}$.

Los resultados obtenidos en cuanto al método propuesto han sido positivos debido al control de los parámetros convectivos para la aplicación del pilón del puente.

5.1.2. Puentes de viga de cajón

(Lin et al., 2020) estudian puentes sin juntas, debido a esto se toma un puente con vigas de caja de lado a lado. De esta forma se toma la temperatura de la sección transversal del puente y su movimiento térmico longitudinal de la súper estructura.

La temperatura efectiva promedio de las secciones transversales de la viga podría predecir con precisión el movimiento térmico longitudinal de la superestructura. Las temperaturas promedio más altas y bajas de los puentes efectivos para vigas de caja de lado a lado se estimaron para 12 ciudades en 4 regiones climáticas en China en condiciones de temperatura históricamente extremas.

5.1.3. Estudios realizados al interior y exterior de puentes compuestos

(Tang et al., 2018) realizaron un estudio de temperaturas a los puentes compuestos al interior y exterior, para poder garantizar seguridad y durabilidad a dicha estructura.

Este estudio se basó en un modelo de elementos finitos finos del campo de temperatura del puente y la ley de distribución.

Para la distribución de temperaturas de luz solar, fueron necesarios incluir dos parámetros tensión y deformación especialmente para estructuras de puentes en concreto de arco.

El monitoreo se realizó al puente de Haierwa, en la provincia de Hebei. El objetivo fue monitorear y analizar la deformación del puente de arco de armadura de concreto debido al cambio de temperatura del aire. Los resultados muestran las tendencias diarias de la temperatura y la deformación vertical del puente en el tramo medio, $L / 4$ y pie de arco en el invierno y el verano. La relación lineal se calculó entre la temperatura y la deformación de las secciones críticas con base en los datos de monitoreo.

5.1.4. Simulaciones de cargas térmicas

(Gottsäter et al., 2018) realizaron un modelo para evidenciar las cargas térmicas las cuales provocan grietas cuando la estructura no puede cambiar de tamaño. Este modelo se ejecutó durante 12 meses en un puente de pórtico, tomando medidas de 13 puntos específicos y realizando así la comparación entre las temperaturas simuladas y medidas. Los parámetros contemplados fueron: la temperatura del aire medida, la velocidad del viento, la radiación de onda larga y corta estas conllevaron al cálculo de la temperatura para cada hora en el periodo de tiempo. Fue necesario incluir el suelo que se encontraba al lado del puente.

Su resultado fue predecir la distribución de temperatura de una manera adecuada, ya que pudo obtener valores conservadores de la diferencia de temperatura entre partes estructurales agregando no más de un ΔT de 1.5° C a la diferencia de temperatura simulada.

6. Metodología

La forma adecuada para poder llevar a cabo el desarrollo de un proyecto, es tener muy claro el procedimiento o los pasos a seguir para dicho desarrollo. Teniendo en cuenta esto, se determinó que este proyecto de investigación se realizaría en cuatro fases.

6.1. Primer Paso

Con el fin de minimizar desplazamientos entre puentes y debido a la frecuencia y el horario requerido para llevar el desarrollo del proyecto, se eligieron los puentes más cercanos para llevar a cabo el registro fotográfico y poder realizar la tarea en ambos puentes de manera simultánea.

Puentes de estudio

Puente Vehicular No. 1 General Santander



Figura 17. Ubicación puente vehicular No. 1. Fuente (Google Earth, 2020)

Datos

Fecha de construcción: 2003

Longitud del puente:

Tipología: VNI_3

Tipo material tablero: concreto reforzado

Tipo de malla vial: arterial

Localización: N 4° 35' 14,68'' - W 74° 7' 30,98''

Este puente vehicular fue construido como parte de la FASE DE TRANSMILENIO POR EL CORREDOR VIAL DEL SUR. Ubicado en la intersección de la NQS con Avenida Batallón Caldas (Av. carrera 50), la estructura cuenta con 8 carriles; tres de tráfico mixto por ambos sentidos y dos para Transmilenio. La tipología de su estructura pertenece a un puente pórtico (IDU - Inventario y estado de servicio de los puentes de la ciudad de Bogotá D.C., 2020).



Figura 18. Imágenes puente No. 1. Fuente: Elaboración propia

Puente Vehicular No. 2 Matatigres



Figura 19. Ubicación puente No.2. Fuente: extraído de (Google Earth, 2020)

Datos

Fecha de construcción: 2000 Estudios y diseños para la intersección Av. Jorge Gaitán Cortes con Av. General Santander y conexión Av. Quiroga Contrato IDU 241 de 1999.

Número de luces: 7

Número de apoyos: 8

Área de la Superestructura: 1635.39 m²

Longitud del puente: 181.71 m

Coordenadas: 4°35'19"N-74°7'24"W

Código: 10-02-17-06-77 (SAP – IDU)

Contrato: CIF-IDU 212-02

El puente vehicular Matatigres es un puente monolítico en su infraestructura, inicia en la transversal 33 y se divide hacia la calle 38 a sur y hacia la calle 36 sur. Su superestructura con pilas como apoyo y viga cajón continua.

Su estructura esta cimentada sobre pilotes debido a que se cuenta con suelos arcillosos secos y pre consolidados de gran espesor, arenas o limos combinados entre ellos (IDU - Matatigres, 2017).



Figura 20. Algunos puntos de análisis. Fuente: elaboración propia

6.2. Segundo Paso

Se realizó el monitoreo en campo de los puentes, a través de una cámara térmica modelo FLIR ONE PRO (*FLIR Tools | FLIR Systems*, n.d.). Este procedimiento se llevó a cabo a través del registro fotográfico de la estructura del puente, ubicando puntos específicos para el análisis. A continuación, se muestran dos figuras; la figura No. 21 es de la cámara utilizada y la figura No. 22 de las imágenes tomadas donde se evidencia las temperaturas que registra la estructura.



Figura 21. Cámara térmica, modelo FLIR ONE PRO. Fuente: elaboración propia.



Figura 22. Imagen de temperaturas registradas por la estructura del puente. Fuente: elaboración propia.

Puente No. 1 General Santander

Rango de fechas: desde el 05 hasta el 24 de agosto de 2020

Horarios: en la mañana 5:30 am y en la tarde 12:00 pm

La medición de la temperatura superficial de este puente fue tomada durante 22 días consecutivos, de los cuales dos días fueron necesarios para la identificación de puntos estratégicos para realizar este monitoreo.

Se realizaba la toma diaria de 24 fotografías en toda la estructura del puente. Sin embargo, se eligieron únicamente 4 de ellas para realizar el análisis y la comparación de datos. A continuación, se muestran las imágenes elegidas.

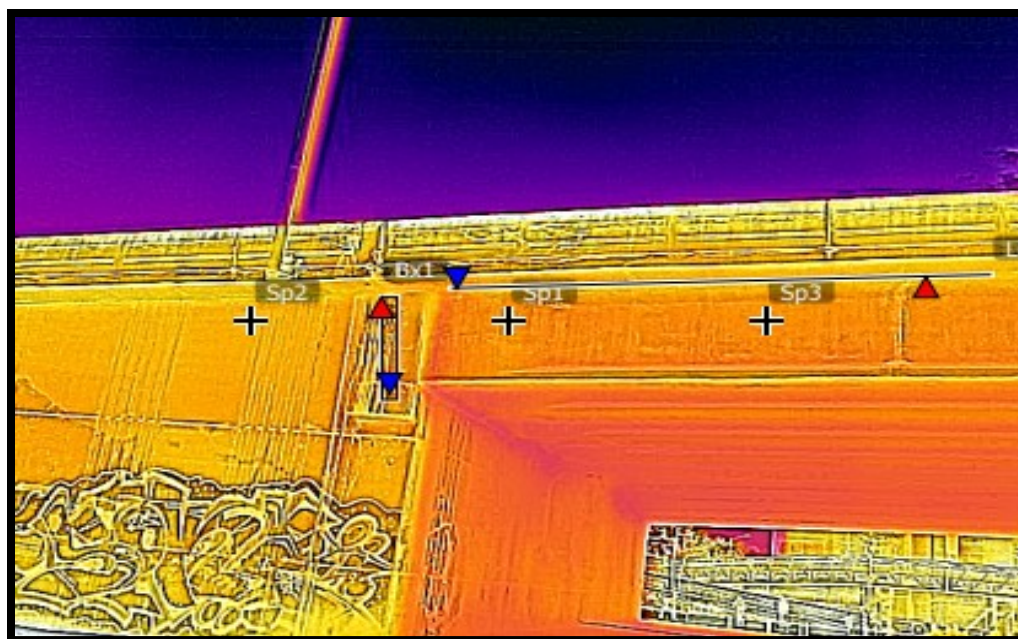


Figura 23. Fotografía No 1 con puntos para análisis. Fuente: elaboración propia



Figura 24. Fotografía No 2 con puntos para análisis. Fuente: elaboración propia.



Figura 25. Fotografía No 3 con puntos para análisis. Fuente: elaboración propia



Figura 26. Fotografía No 4 con puntos para análisis. Fuente: elaboración propia

Puente No. 2 Matatigres

Rango de fechas: desde el 08 hasta el 27 de agosto del 2020

Horarios: en la mañana 5:00 am y en la tarde 12:50 pm

Tiempo de monitoreo: 20 días consecutivos.

La toma diaria para este puente fue de 11 fotografías, de las cuales se escogieron 6 para el respectivo análisis. Se eligieron las imágenes que, a criterio propio, eran las más adecuadas para realizar la evaluación de las temperaturas según el tipo de estructura que constituye el puente.

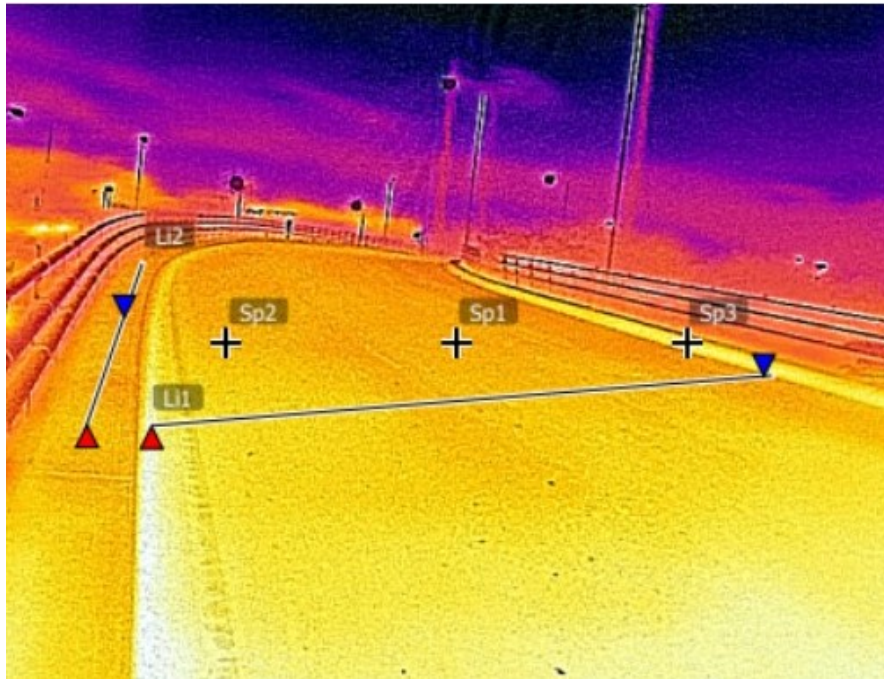


Figura 27. Fotografía No 1 con puntos para análisis. Fuente: elaboración propia

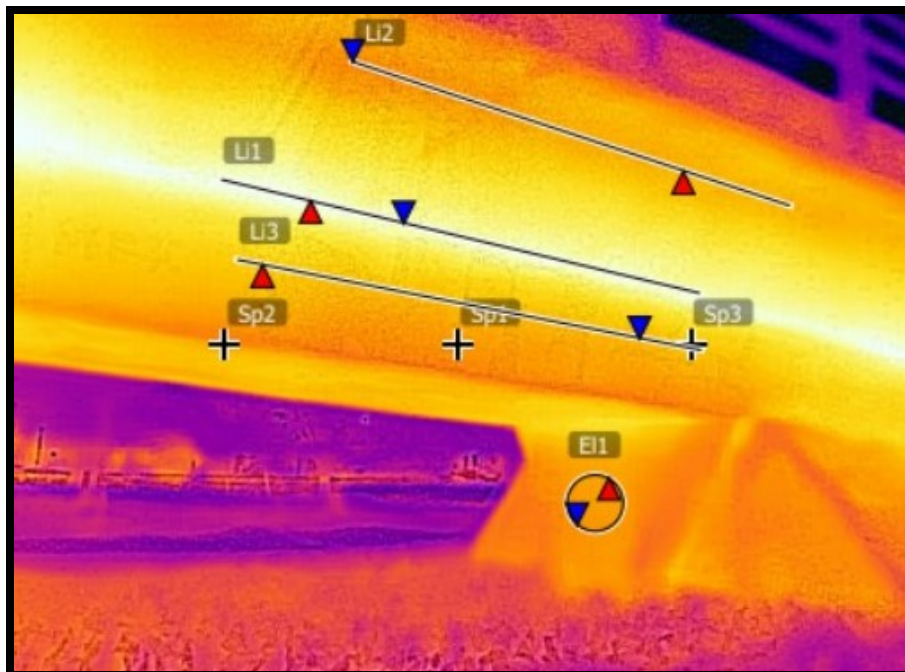


Figura 28. Fotografía No 2 con puntos para análisis. Fuente: elaboración propia

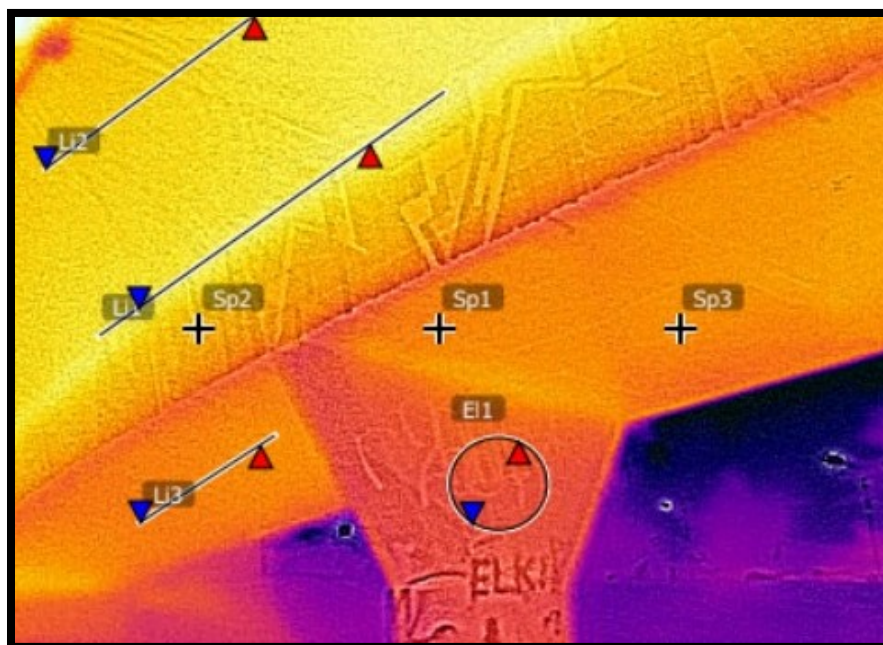


Figura 29. Fotografía No 3 con puntos para análisis. Fuente: elaboración propia



Figura 30. Fotografía No 4 con puntos para análisis. Fuente: elaboración propia



Figura 31. Fotografía No 5 con puntos para análisis. Fuente: elaboración propia



Figura 32. Fotografía No 6 con puntos para análisis. Fuente: elaboración propia

6.3. Tercer paso

Para el desarrollo de este paso fue necesario contar con un computador con capacidad para descargar programas.

Inicialmente se descargó la aplicación FLIR TOOLS, esta permitirá realizar el correcto análisis de las fotografías tomadas, también servirá para la identificación y generación de informes con todos los datos que fueron registrados a través de la cámara. Una vez instalada la aplicación, se procedió a crear una carpeta con el nombre del puente la cual debía tener un orden por días, horarios y las fotos escogidas para que fuera más sencillo agregarla. Esta carpeta se encuentra en el panel principal de la aplicación. A continuación, se muestra la forma en que se realizó (ver Figura 33).

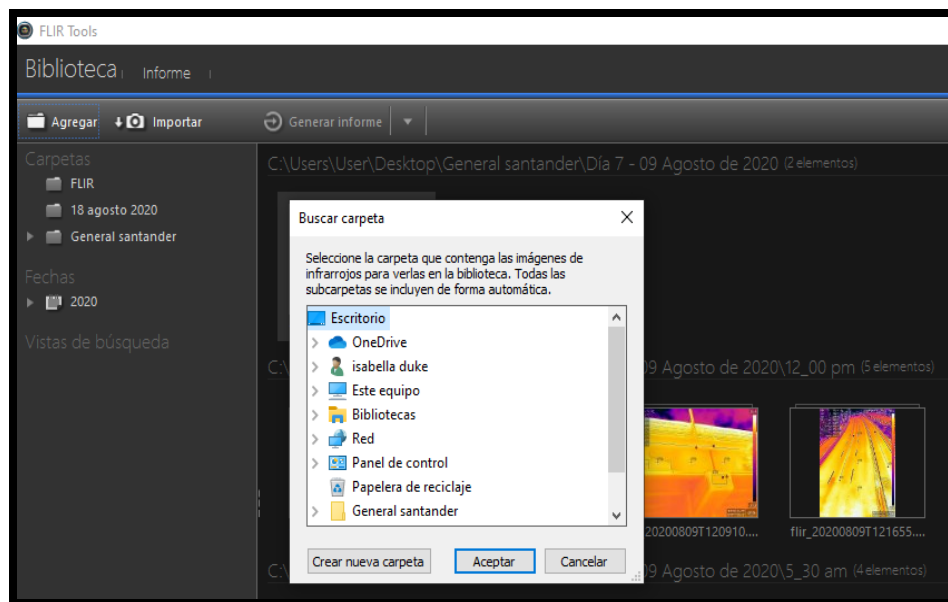


Figura 33. Creación de carpeta con fotografías para cada uno de los puentes. Fuente: elaboración propia

Una vez creadas las carpetas del puente vehicular de General Santander y el puente vehicular de Matatigres lo que se procedió a realizar fue el análisis de estas fotografías con las herramientas que brinda la aplicación FLIR Tools. En la Figura 34 se puede ver la interfaz de la aplicación y posteriormente en la figura 35 se observa el proceso de trazado de líneas y triángulos en los puntos de interés elegidos dentro de la fotografía.

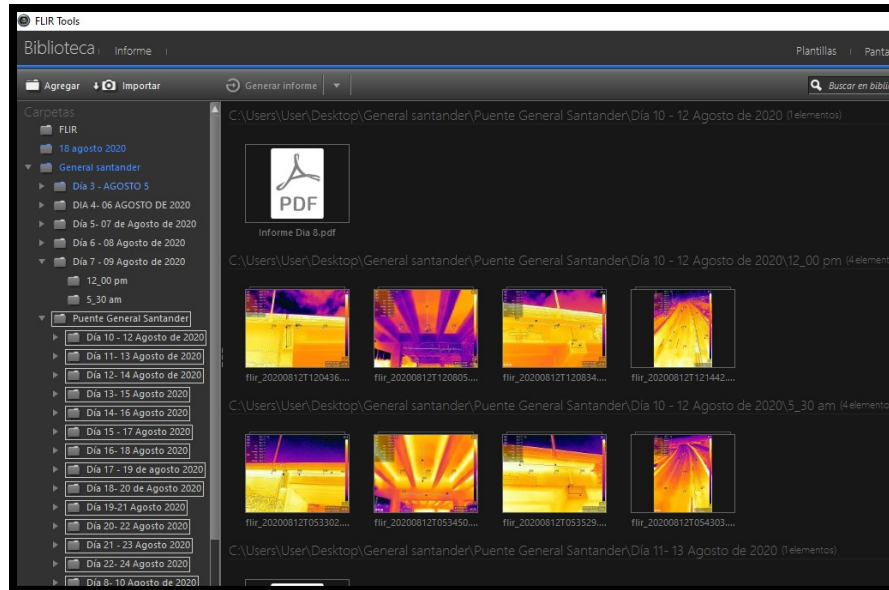


Figura 34. Interfaz de la aplicación FLIR Tools. Fuente: elaboración propia

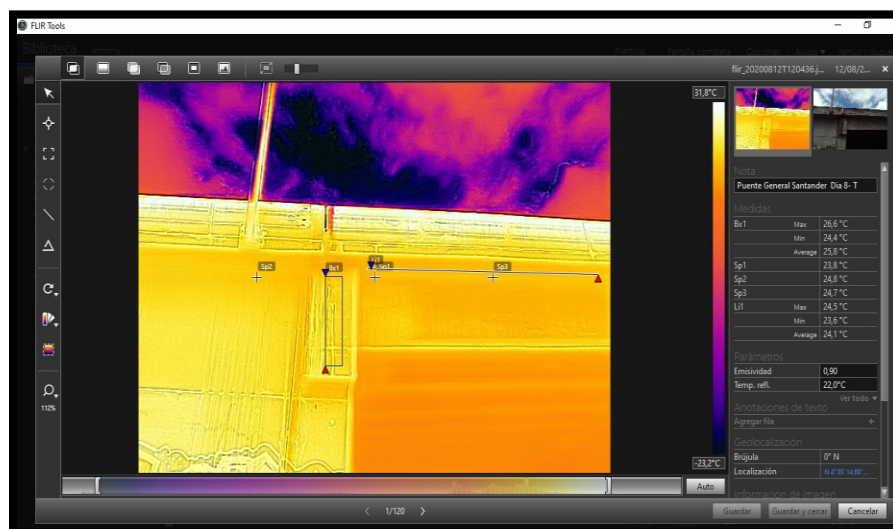


Figura 35. Identificación de puntos para el análisis con trazado de líneas y rectángulos. Fuente: elaboración propia.

Cuando ya se terminó de señalar los puntos específicos de cada una de las fotografías, se procede a seleccionar toda la información para poder generar el informe, este queda automáticamente guardado en un formato PDF en la carpeta que inicialmente creamos para añadir a la aplicación.

6.4. Cuarto paso

Una vez obtenidos los informes del puente vehicular General Santander y el puente vehicular de Matatigres. Se procedió a realizar una tabla en Excel la cual se alimenta con todos los datos que generan los informes, con estos datos se logra identificar temperaturas altas y bajas de las estructuras ya mencionadas anteriormente. A continuación, se muestran las temperaturas más altas registradas para el puente Matatigres y General Santander.

Puente Matatigres Informacion entre las 12:00 pm - 13:00 pm							
Fotografia # 1		Linea 1			Linea 2		
		TABLERO			BORDILLO		
# DIAS	Fechas	Temp. Maxima	Temp. Minimo	Temp. Promedio	Temp. Maxima	Temp. Minimo	Temp. Promedio
1	08/08/2020	35,8	31,5	34,3	33,9	31,3	32,8
2	09/08/2020	32,6	28	30,8	31,2	29,1	30,2
3	10/08/2020	30,8	24,5	29,1	27,9	25,7	27,1
4	11/08/2020	32,4	27,4	30,9	31,8	28,8	30,6
5	12/08/2020	41,5	31	39,5	39,8	36,6	38,4
6	13/08/2020	32,6	28,4	31,2	32,5	29,1	31,1
7	14/08/2020	38,3	31,6	36,4	35,9	33,5	34,9
8	15/08/2020	38,1	30,8	36,4	34,3	29,6	32,8
9	16/08/2020	30,5	24	29,1	28,7	26	27,6
10	17/08/2020	19,4	17,9	18,7	19	18,2	18,7
11	18/08/2020	30,4	25,7	29,6	31,2	29,3	30,5
12	19/08/2020	29,6	23,3	28,3	28	26,3	27,1
13	20/08/2020	33	25,5	31,6	32,5	29,8	31,4
14	21/08/2020	32,6	28,8	31,6	33,9	31	32,6
15	22/08/2020	24,3	18,1	23	23,5	21,3	22,7
16	23/08/2020	25,9	19,6	24,8	25,3	22,6	24,1
17	24/08/2020	44,5	39,3	42,6	46,3	43,6	45,1
18	25/08/2020	29,7	26,2	28,3	31	27,8	29,8
19	26/08/2020	28,7	25,2	27,5	26,7	24,7	25,9
20	27/08/2020	34,7	25,6	33,3	35,6	32,4	34,5
Emisividad = 0,9				Temp. Refle. = 22 °C			
Temperatura Atmosferica = 20 °C				Tem.optica ext. = 25 °C			

Figura 36. Temperatura más alta registrada en el puente Matatigres. Fuente: elaboración propia

Puente General Información entre las 12:00 pm - 1:00 pm							
Fotografía # 4		Linea 1			Linea 2		
		TABLERO			TABLERO		
# DIAS	Fechas	Temp. Maxima	Temp. Minimo	Temp. Promedio	Temp. Maxima	Temp. Minimo	Temp. Promedio
1	05/08/2020	41,8	37,2	39,5	39,3	37,6	38,6
2	06/08/2020	35,6	31,8	33,6	33,5	31,1	32,8
3	07/08/2020	32,8	31,3	32,3	32	30,9	31,6
4	08/08/2020	35,7	33,1	34,7	35,1	33,1	34,3
5	09/08/2020	38,3	35,8	37,5	37,9	36,2	37,3
6	10/08/2020	35,8	33,8	35,2	35,9	33	35
7	11/08/2020	37,3	35	36,4	36,8	34,4	36
8	12/08/2020	39,1	36,4	38,3	39,5	36,5	38,5
9	13/08/2020	34,8	31,6	33,6	35	31,3	34,1
10	14/08/2020	38,3	34,9	36,9	39,1	36,7	38,4
11	15/08/2020	38,8	34,5	37,2	39,6	37,8	38,9
12	16/08/2020	33,9	31,1	32,7	34,3	32,3	33,6
13	17/08/2020	20	18	19,1	19,2	16,6	18,2
14	18/08/2020	29,8	28,2	29,3	29,4	27,7	28,8
15	19/08/2020	33,7	30,6	32,7	34,1	31,6	33,2
16	20/08/2020	35,6	33,3	34,7	36,4	34	35,3
17	21/08/2020	36,6	33	35,1	36,9	35	36,2
18	22/08/2020	29,2	26,7	28,2	29	26,4	28,3
19	23/08/2020	29,6	26,5	28,5	29,8	27,2	29
20	24/08/2020	46,2	40,5	43,8	46	40,9	44,3
Emisividad = 0,9				Temp. Refle. = 22 °C			
Temperatura Atmosferica = 20 °C				Tem.optica ext. = 25 °C			

Figura 37. Temperatura más alta registrada en el puente General Santander. Fuente: elaboración propia.

Puente Matatigres Información entre las 5:00 am - 6:00 am							
Fotografía # 1		Linea 1			Linea 2		
		TABLERO			BORDILLO		
# DIAS	Fechas	Temp. Maxima	Temp. Minimo	Temp. Promedio	Temp. Maxima	Temp. Minimo	Temp. Promedio
1	08/08/2020	16,4	15,3	15,9	15,7	14,9	15,3
2	09/08/2020	14,5	12,3	13,2	13,6	12,2	13,1
3	10/08/2020	14,9	14	14,5	14,2	13,4	13,9
4	11/08/2020	14,8	11,5	12,6	13,3	12	12,8
5	12/08/2020	13,3	9,9	10,8	11,4	11,1	11,3
6	13/08/2020	14,4	11,4	12	12,1	11,2	11,6
7	14/08/2020	14,4	13,1	13,7	14,1	13,3	13,6
8	15/08/2020	14,5	13,8	14,3	14	13,1	13,6
9	16/08/2020	11,7	9,7	10,5	10,1	8,9	9,4
10	17/08/2020	18,2	15,8	16,7	16,6	15,6	16,1
11	18/08/2020	9,5	6,9	8,3	8,3	7,7	8
12	19/08/2020	12	9,7	10,1	10,5	9,7	10,2
13	20/08/2020	10,1	6,8	7,4	9	8,2	8,7
14	21/08/2020	10,3	8,7	9,1	10,3	9,4	9,8
15	22/08/2020	12,1	10,1	10,7	11	9,4	10,2
16	23/08/2020	11	8,9	9,7	11,1	10	10,5
17	24/08/2020	11,1	10	10,5	10,9	10,1	10,4
18	25/08/2020	13,2	8	9,4	11,3	10	10,8
19	26/08/2020	10,2	6,1	6,9	8,1	6,4	7,2
20	27/08/2020	13	10,2	11,1	11,6	10,9	11,2
Emisividad = 0,9				Temp. Refle. = 22 °C			

Figura 38. Temperaturas más bajas registradas en el puente Matatigres. Fuente: elaboración propia.

Puente General Información entre las 5:00 am - 6:00 am							
Fotografía # 2		Linea 1			Linea 2		
		TABLERO			Viga		
# DIAS	Fechas	Temp. Maxima	Temp. Minimo	Temp. Promedio	Temp. Maxima	Temp. Minimo	Temp. Promedio
1	05/08/2020	17,4	15,2	16,6	13,8	13,5	13,7
2	06/08/2020	16,1	13,6	15,1	12,9	12,4	12,7
3	07/08/2020	17,2	16,2	16,7	14,4	13,7	14,1
4	08/08/2020	15,4	13,6	14,8	13,4	12,8	13,2
5	09/08/2020	16,7	14,1	15,9	14,6	13,6	14,3
6	10/08/2020	17,7	15	16,9	15,5	14,8	15,3
7	11/08/2020	17,8	16,4	17,5	15,3	14,7	15,1
8	12/08/2020	17,6	16,7	17,2	14,6	13,6	14,3
9	13/08/2020	18,7	17,3	18,1	16,2	15,4	15,9
10	14/08/2020	18,4	16,8	17,9	16,5	15,7	16,3
11	15/08/2020	18,3	16,8	17,8	16,4	15,9	16,2
12	16/08/2020	19	17,2	18,4	15,8	15,1	15,5
13	17/08/2020	18,6	17,3	18,2	16,1	15,7	16
14	18/08/2020	15,7	14,3	15,1	13,7	13	13,5
15	19/08/2020	17,3	16,1	16,9	15,3	14,7	15,1
16	20/08/2020	16,4	15,3	16	13,9	13,2	13,7
17	21/08/2020	17,1	16,6	16,9	15,6	15,1	15,4
18	22/08/2020	16,3	14,1	15,6	11,9	10,7	11,4
19	23/08/2020	16	14,7	15,6	13,7	13,2	13,6
20	24/08/2020	16,2	14,4	15,5	14,3	13,7	14,1
Emisividad = 0,9				Temp. Refle. = 22 °C			

Figura 39. Temperaturas más bajas registradas en el puente General Santander. Fuente: elaboración propia.

Para complementar este análisis también fue necesario contar con datos meteorológicos; en este caso se emplearon los datos de la estación aeropuerto internacional el dorado. Fueron obtenidos de (Colombia Weather History | Weather Underground, 2020) con el fin de identificar los siguientes parámetros durante el mes de agosto: precipitación, temperatura y velocidad del viento. La Figura 40 muestra el comportamiento meteorológico para el mes de agosto en la ciudad.

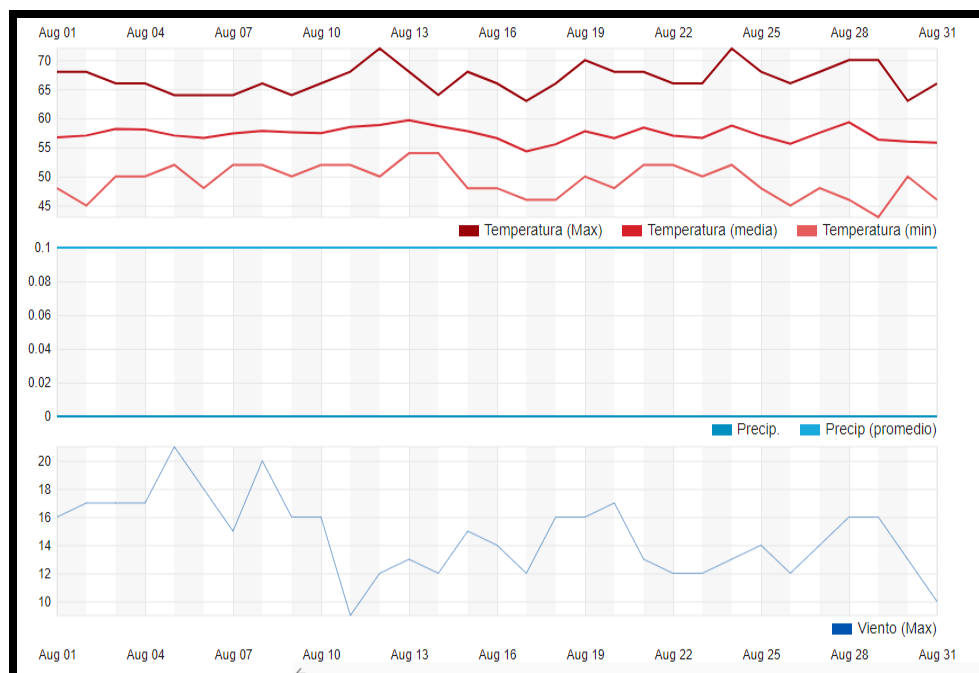


Figura 40. Gráfica de datos meteorológicos para el mes de agosto en la ciudad de Bogotá.
Fuente: <https://www.wunderground.com/history/monthly/co/bogot%C3%A1/SKBO/date/2020-8>

En la Figura 41, se muestra la gráfica de la radiación presentada para el mes de agosto del 2020 en la ciudad de Bogotá. Los parámetros de radiación solar son fundamentales para usar la ecuación de equilibrio de energía, por lo tanto, fue indispensable utilizar una fuente diferente para hallar tales parámetros (Colombia Weather History | Weather Underground, 2020).

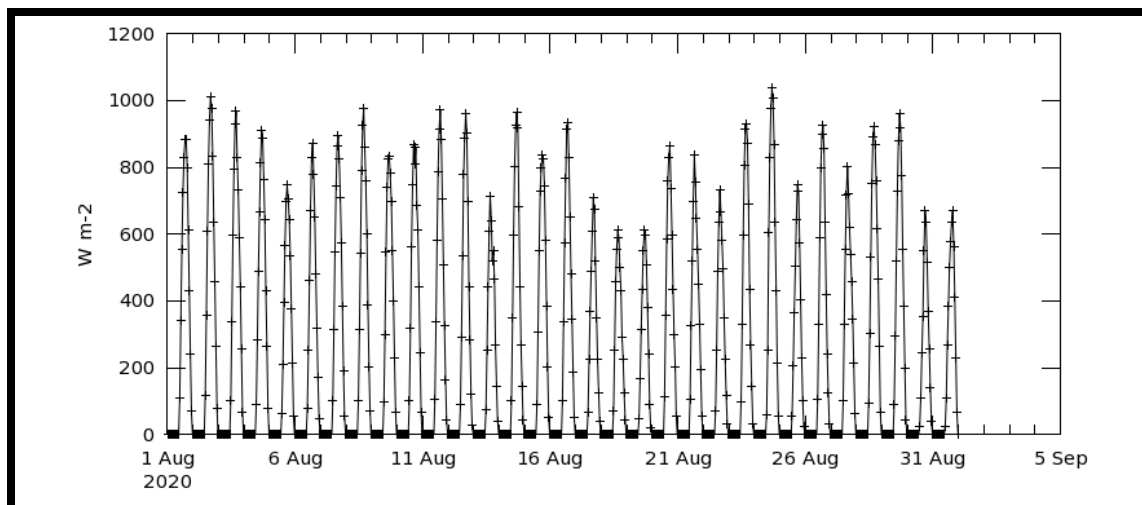


Figura 41. Grafica de radiación presentada en el mes de agosto en la ciudad de Bogotá.

Fuente (Giovanni - NASA, 2020):

<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=TmAvMp&starttime=&endtime=&variableFacets=dataFieldMeasurement%3AIncident%20Radiation%3B>

7. Análisis de resultados

Como punto de partida, se tiene la recolección de datos en los dos puentes objeto de estudio; General Santander y Matatigres ubicados en el sur de la ciudad de Bogotá. La medición de temperatura superficial se realizó durante 20 días consecutivos del mes de agosto. En el puente General Santander se inició el día 05 de agosto y se culminó el 24 de agosto. Para el puente de Matatigres se inició la tarea el día 08 de agosto hasta el día 27 del mismo mes. El registro de temperaturas del puente Matatigres se inició tres días después con el objetivo de distribuir el tiempo y optimizar los desplazamientos de un puente a otro.

La toma de temperaturas superficiales se realizó en horarios donde se presentan las más bajas temperaturas (5:00 a 6:00 am) y las más altas de (12:00 pm a 2:00 pm), el propósito de estos horarios es poder observar de una forma clara el cambio de temperatura al cual está expuesto la estructura del puente durante dicha franja de tiempo.

7.1. Análisis de temperaturas recolectadas Puente General Santander

Las Figuras 42, 43, 44, 45 son ejemplos precisos de los informes y cálculos realizados para algunos de los componentes que tienen influencia directa en los cambios de las temperaturas superficiales a las que están expuestas las diferentes partes de la estructura del puente. Estos informes fueron generados por medio de la aplicación FLIR Tools.

Como descripción general de las figuras; estas contienen tres marcadores fundamentales que señalan los puntos escogidos para este análisis, se identifican como Sp1, Sp2 y Sp3. Para dicho análisis se eligieron fotografías de la parte superior, del perfil y de la parte inferior del

puente. Adicionalmente en estas fotografías se trazan unas líneas que señalan un punto específico del puente, en el cual vamos a evaluar la temperatura.

Los informes generados a través de FLIR Tools son la base para representar gráficamente el comportamiento de las temperaturas a las que se expone la estructura del puente.



Figura 42. Informe generado para fotografía No 1 - Perfil entrada al puente. Fuente: elaboración propia

En las Figuras 43 y 44 se muestra el comportamiento de la temperatura para los dos puntos específicos que fueron elegidos en la fotografía No 1. Estas temperaturas corresponden a los horarios de mañana y tarde y su resultado es un promedio entre las más altas y bajas temperaturas que se registraron en estos puntos durante el periodo de estudio.

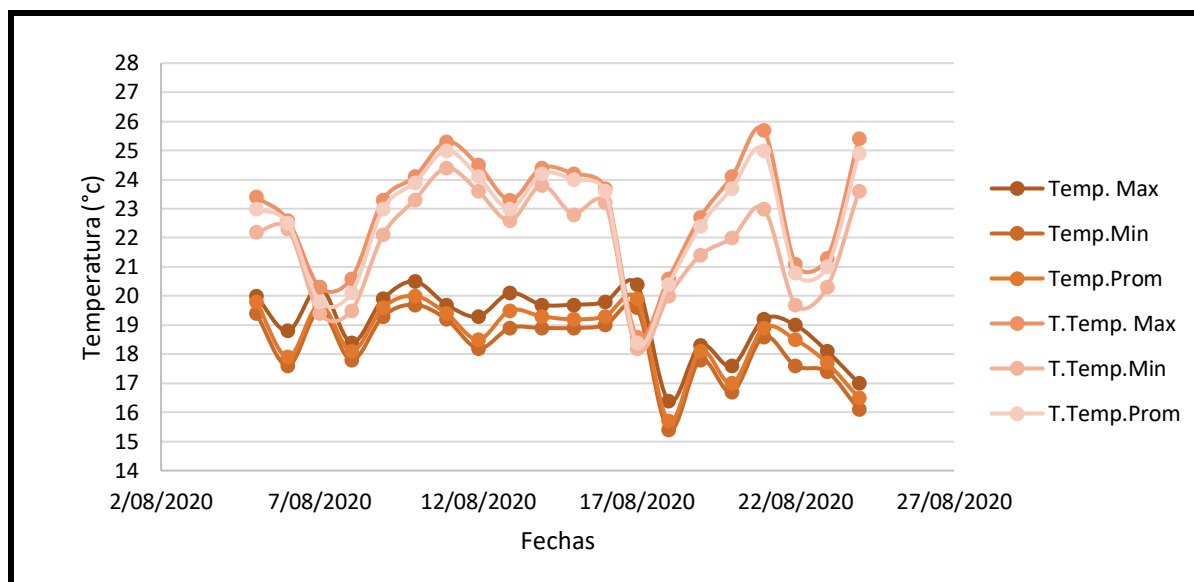


Figura 43. Temperaturas registradas en el horario de la mañana y de la tarde para el tablero. Fuente: elaboración propia

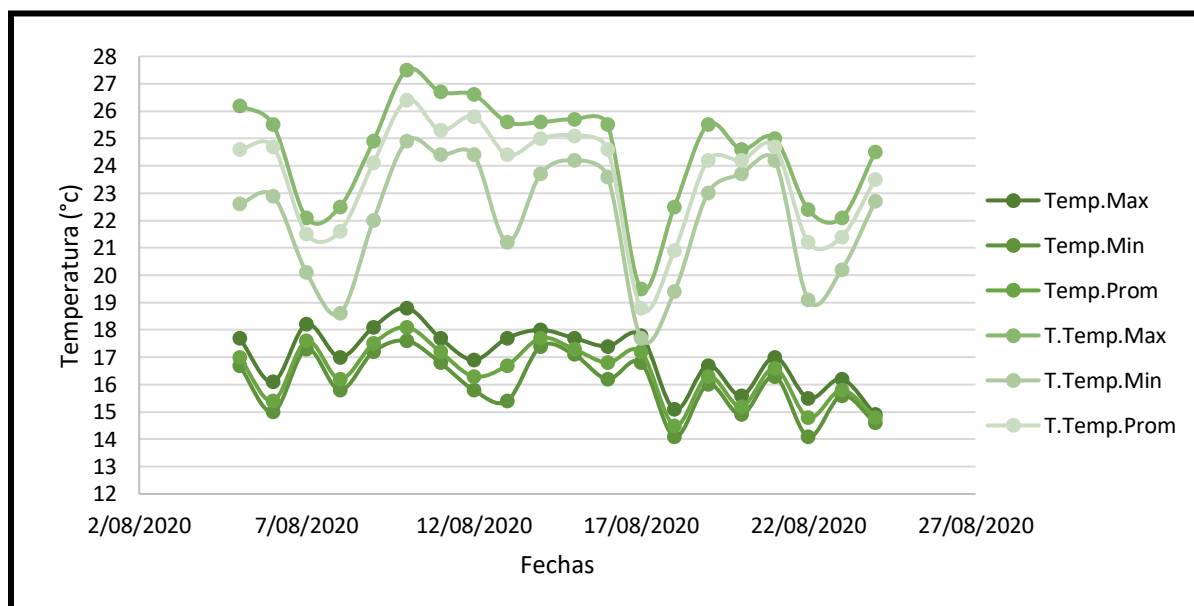


Figura 44. Temperaturas registradas en punto de interés en ambos horarios (mañana y tarde) en bordillo. Fuente: elaboración propia.



Puente Vehicular General Santander Dia 20

Medidas

Sp1	20,3 °C	
Sp2	19,4 °C	
Sp3	21,4 °C	
LI1	Max	22,5 °C
	Min	19,6 °C
	Average	21,4 °C
LI2	Max	18,5 °C
	Min	18,0 °C
	Average	18,2 °C

Parámetros

Emisividad	0.9
Temp. refl.	22 °C
Distancia	3 m
Temp. atmosférica	20 °C
Temp. óptica ext.	25 °C
Trans. óptica ext.	0.8
Humedad relativa	50 %

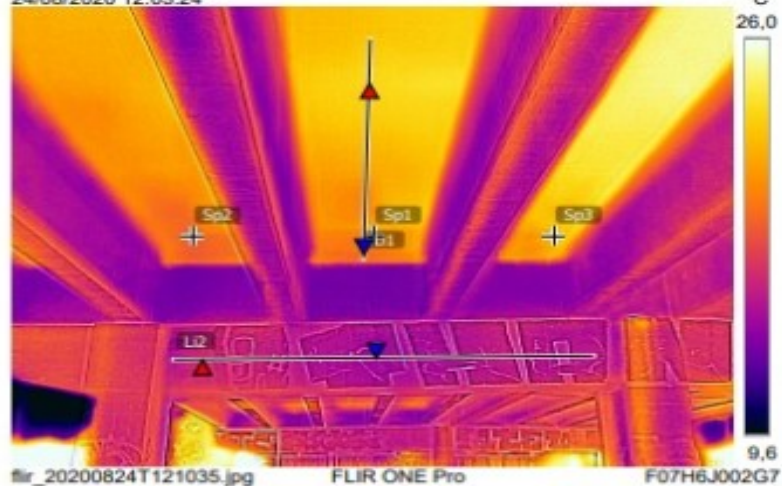
Geolocalización

Brújula	0° N
Localización	N 4° 35' 18.81", W 74° 7' 35.23"
	http://maps.google.com/?q=11&hl=es&sp=4.5889,-74.1265

Nota

Puente General Santander Dia 20- T

24/08/2020 12:03:24



24/08/2020 12:03:24



Figura 45. Fotografía No 2 Tablero, apoyos parte inferior del puente. Fuente: propia

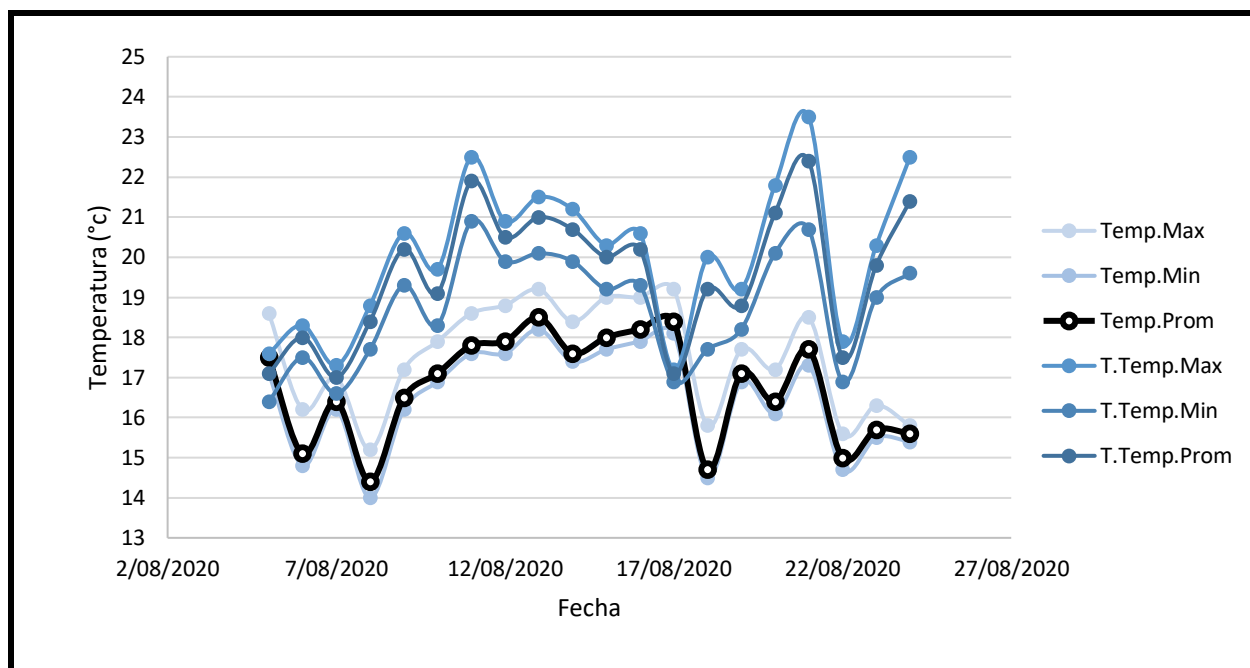


Figura 46. Temperaturas registradas en ambos horarios (mañana y tarde) para el tablero. Fuente elaboración propia.

Como se observa en la figura 46 la temperatura más alta para el horario de la mañana fue el día 13/08/20 con una temperatura promedio de 18.5°C y en el horario de la tarde el día 21/08/20 se registró una temperatura de 23.5°C.

En la figura 47 se puede deducir que la temperatura más baja registrada fue el día 08/08/20 con una temperatura de 14.5°C para el horario de la mañana y para el horario de la tarde el día 05/08/20 con una temperatura de 14.9°C.

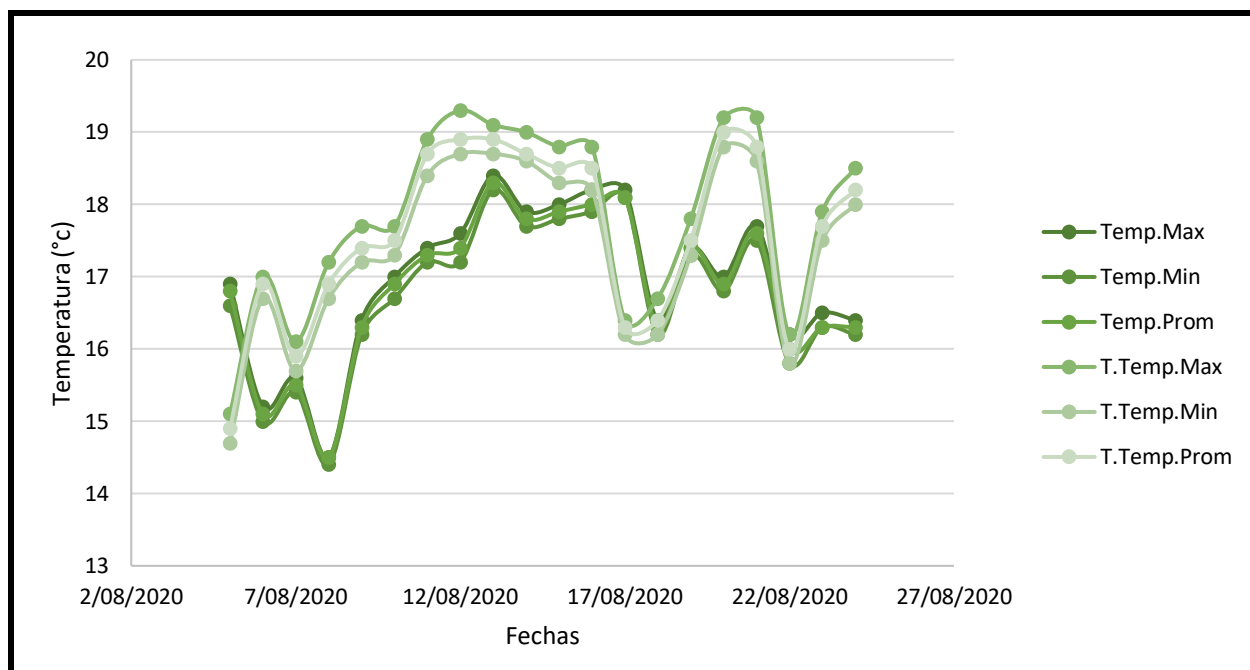


Figura 47. Temperaturas registradas en ambos horarios (mañana y tarde) en la viga. Fuente: elaboración propia.

Los puntos específicos elegidos en esta fotografía, que corresponde a la numero 2. Presenta una variación mínima de temperaturas durante el periodo de monitoreo en ambos horarios (mañana y tarde). Esta variación está por debajo de los 5°C y esto se debe principalmente a que los puntos elegidos están en la parte inferior de la estructura del puente.



Puente Vehicular General Santander Dia 20

Medidas

Bx1	Max	18,4 °C
	Min	17,6 °C
	Average	17,8 °C
Sp1		19,8 °C
Sp2		19,3 °C
Sp3		20,2 °C
Li1	Max	22,5 °C
	Min	21,2 °C
	Average	21,7 °C

Parámetros

Emisividad	0.9
Temp. refl.	22 °C
Distancia	3 m
Temp. atmosférica	20 °C
Temp. óptica ext.	25 °C
Trans. óptica ext.	0.8
Humedad relativa	50 %

Geolocalización

Brújula	0° N
Localización	N 4° 35' 18,81", W 74° 7' 35,23"
	http://maps.google.com/?z=17&hl=es&q=4.5666,-74.1265

Nota

Puente General Santander Dia 20- T

24/08/2020 12:03:24



flir_20200824T121124.jpg

FLIR ONE Pro

F07H6J002G7

24/08/2020 12:03:24



flir_20200824T121124.jpg

FLIR ONE Pro

F07H6J002G7

Figura 48. Fotografía No 3 perfil puente, tablero y viga. Fuente: elaboración propia.

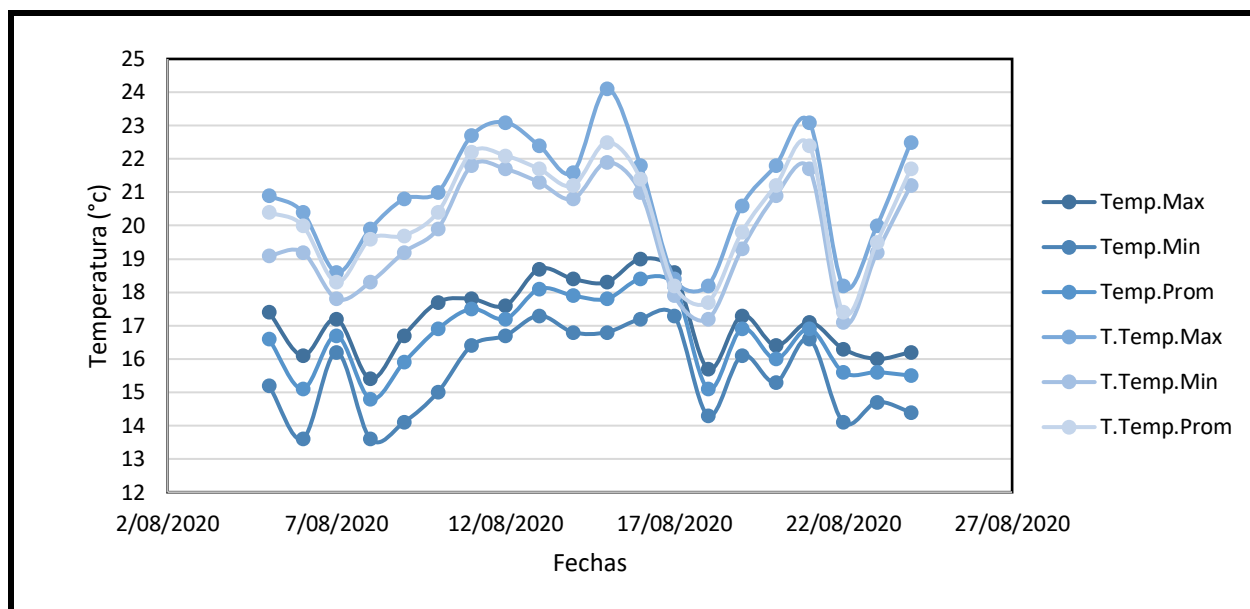


Figura 49. Temperaturas registradas en punto de análisis de ambos horarios (mañana y tarde) para el tablero.
Fuente: elaboración y propia

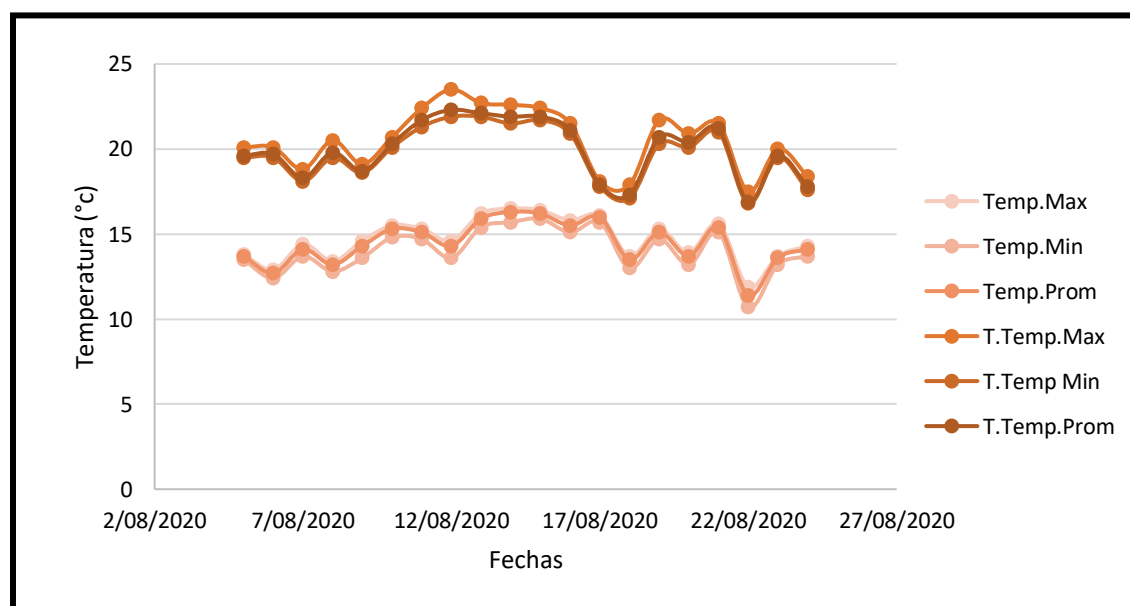


Figura 50. Temperaturas registradas en punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) en la viga.
Fuente: elaboración propia.



Puente Vehicular General Santander Dia 20

Medidas

Sp1		13,6 °C
Sp2		12,6 °C
Sp3		14,3 °C
Li1	Max	14,8 °C
	Min	13,5 °C
	Average	14,1 °C
Li2	Max	14,3 °C
	Min	12,9 °C
	Average	13,8 °C

Parámetros

Emisividad	0.9
Temp. refl.	22 °C
Distancia	3 m
Temp. atmosférica	20 °C
Temp. óptica ext.	25 °C
Trans. óptica ext.	0.8
Humedad relativa	50 %

Geolocalización

Brújula	0° N
Localización	N 4° 35' 11,89", W 74° 7' 29,65"
http://maps.google.com/?z=17&v=k&q=4.5806,-74.1249	

Nota

Puente General Santander Dia 20- M

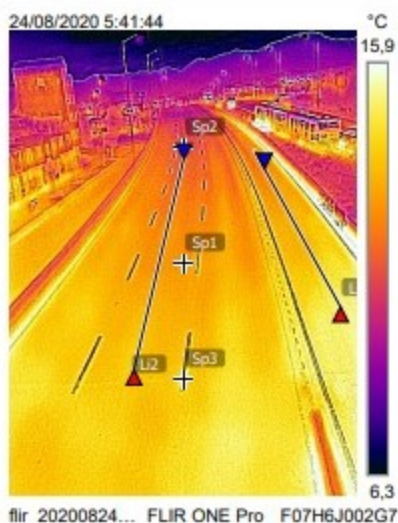


Figura 51. Fotografía No 4 parte superior del puente. Fuente: elaboración propia.

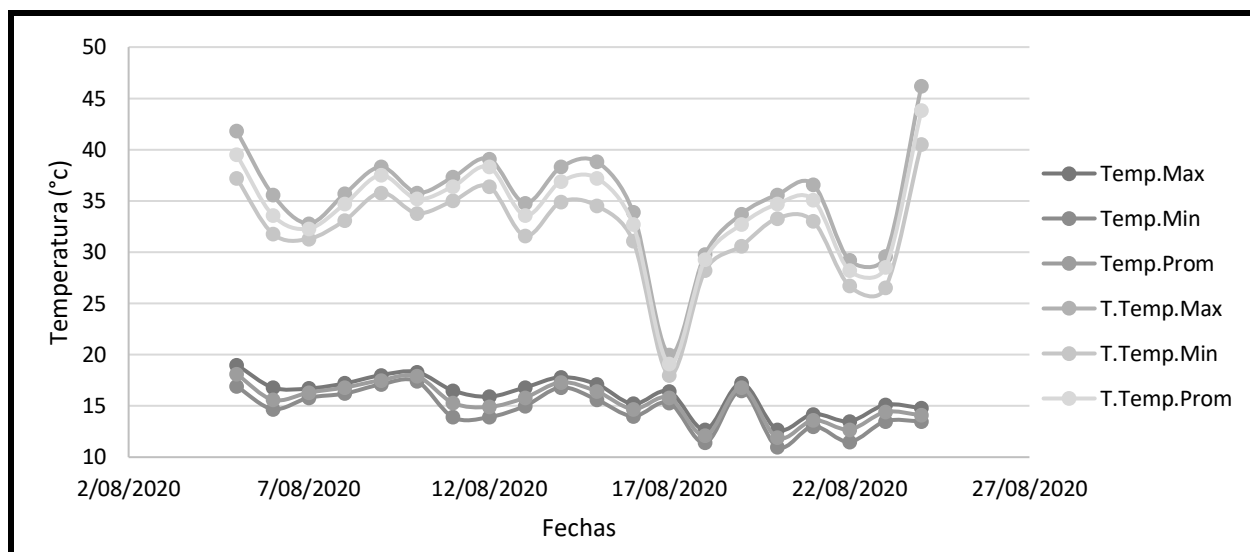


Figura 52. Temperaturas registradas en punto de análisis para ambos horarios (mañana y tarde) para el tablero.
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 53 se observa de una forma muy marcada que el día 17/08/20 en el horario de la tarde, su temperatura más baja fue de 19.2°C. Debido a precipitaciones presentadas en ese día.

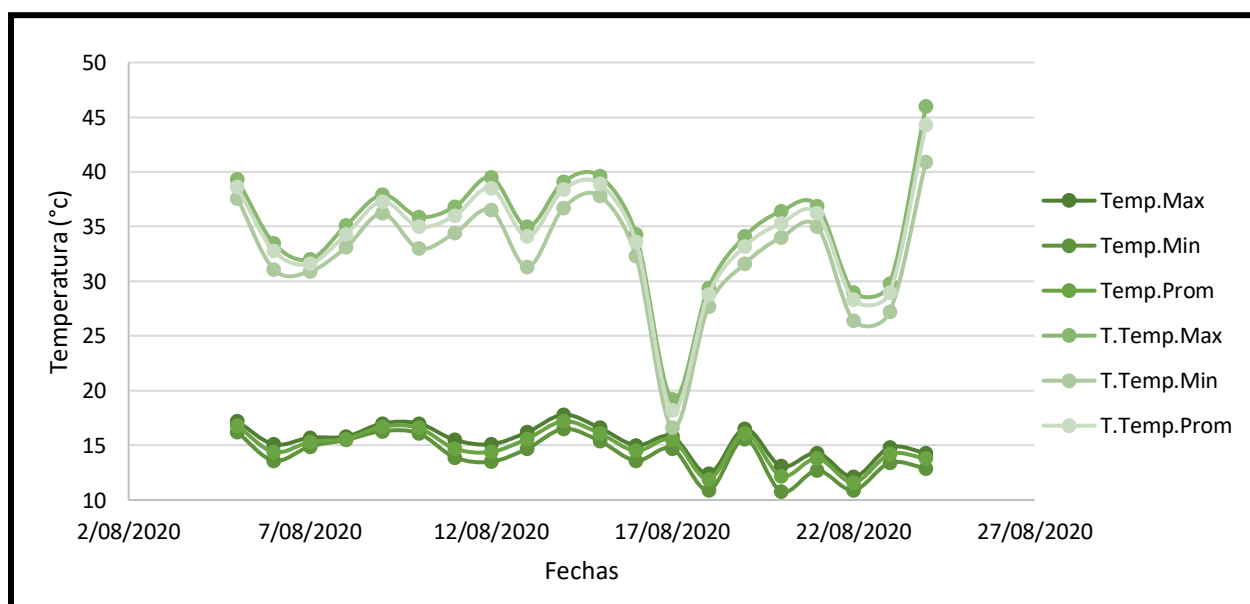


Figura 53. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para el tablero.
Fuente: Elaboración propia.

Para concluir el análisis de los puntos de mayor interés en el primer puente, se muestra la Figura No. 54 la cual se hace una comparación de temperaturas de la parte superior vs la parte inferior del puente general Santander. En esta grafica se observa la máxima temperatura registrada, así como también la mínima.

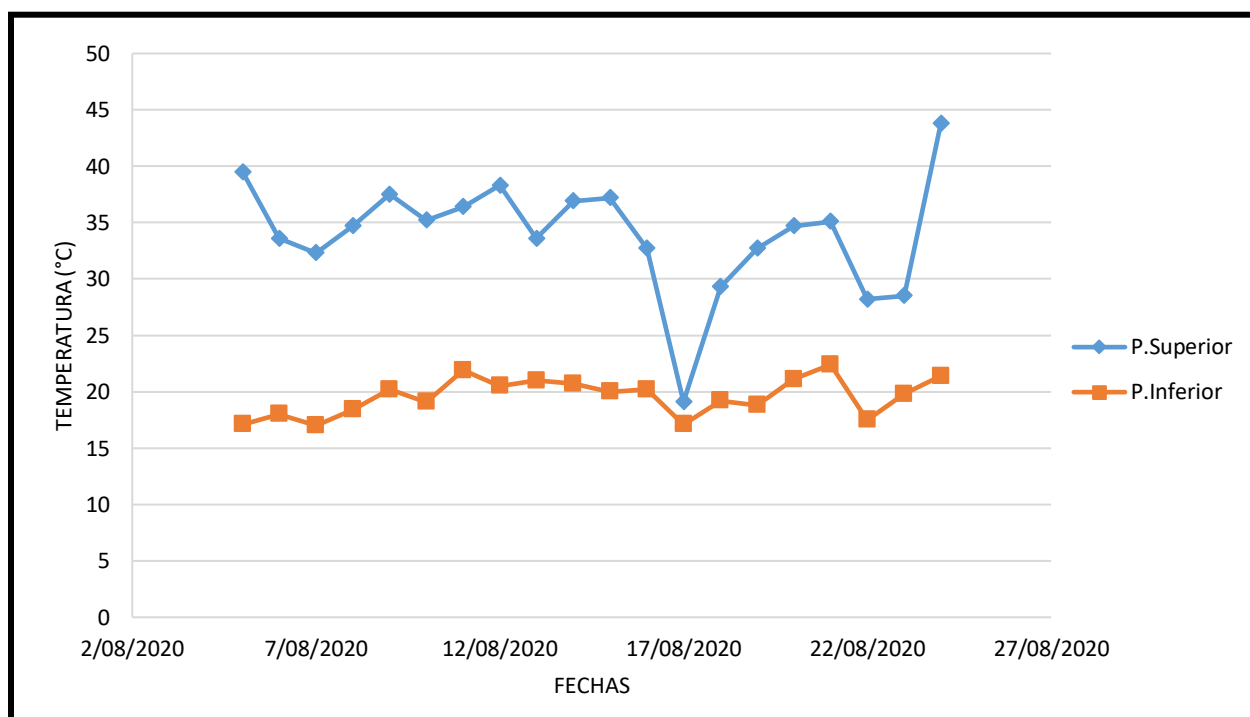


Figura 54. Comparación de temperaturas registradas en parte superior vs parte inferior del puente. Fuente: elaboración propia.

La comparación se realizó con el promedio de las temperaturas del horario de la tarde para ambas partes. Observamos como para la parte superior el día 17/08/2020 se registra la más baja temperatura con 19.1°C y la más alta temperatura el día 24/08/2020 con 43.8°C.

Para la parte inferior vemos como su máxima temperatura se registra el día 21/08/2020 con 22.4°C y la más baja temperatura el día 07/08/2020 con 17°C.

Se puede decir entonces que la parte superior del puente siempre estará sometida a más altas temperaturas en comparación con la parte inferior, debido a la exposición constante que sufre esta parte de la estructura.

7.2. Informes Puente Matatigres

A diferencia del puente General Santander, el puente de Matatigres es un puente viga cajón en forma de Y. Para el análisis de esta estructura se eligen 6 fotografías que abarcan ambas partes del puente y en algunas fotografías se eligen hasta cuatro puntos específicos para evaluar la temperatura superficial a la cual se ven expuestos estos puntos de la estructura.

En las Figuras 55, 58, 63, 68, 73, 78 se pueden observar cada una de las fotografías elegidas para el análisis. Cada figura contiene una primera imagen la cual corresponde a la imagen térmica registrada por la cámara y la segunda corresponde a la imagen normal. Adicionalmente en cada una de las figuras en su costado izquierdo aparecen los datos bases del análisis como los parámetros, la localización y los marcadores elegidos para señalar la imagen como Sp1, Sp2 y Sp3.

Como se mencionó anteriormente para cada fotografía se eligieron dos y en algunos cuatro puntos específicos para evaluar en cada una de estas. En las figuras 56, 57, 64, 65, 66, 67, 74, 75, 76,77 se muestran las gráficas correspondientes a la variación de temperaturas registradas para cada uno de los puntos elegidos. Se muestra la variación en ambos horarios (mañana y tarde) y se saca un promedio de estas temperaturas para cada una de las jornadas.

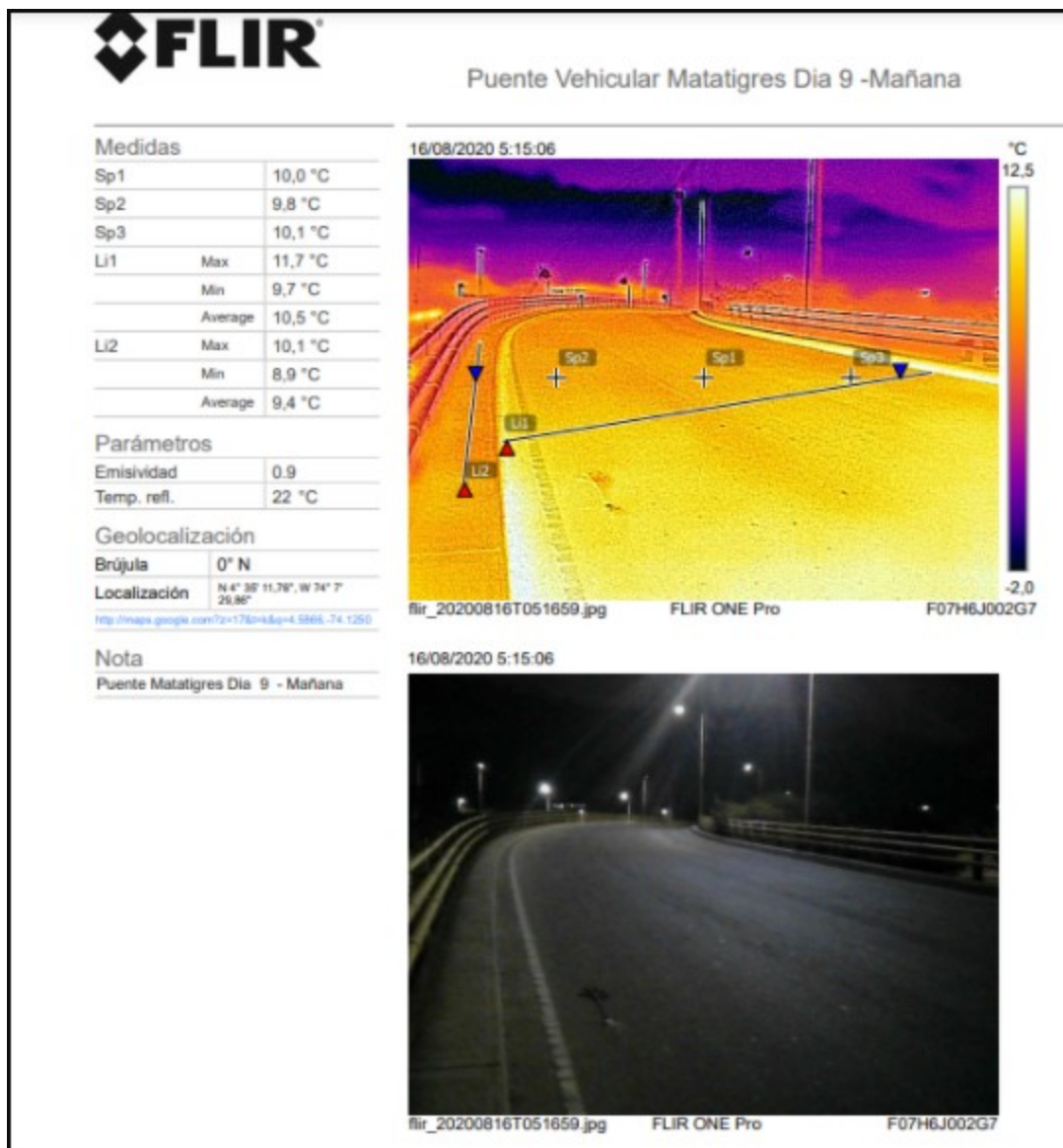


Figura 55. Fotografía No 1 tablero parte superior. Fuente: elaboración propia.

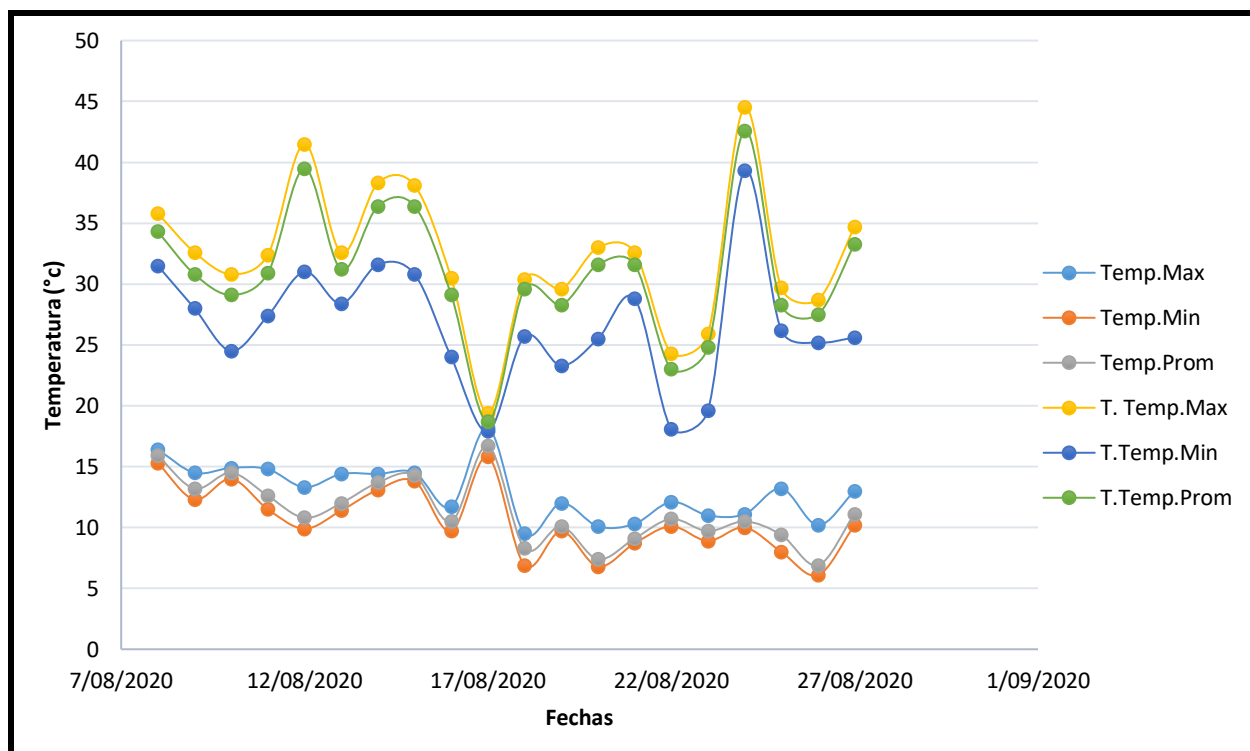


Figura 56. Temperaturas registradas para tablero en horarios de mañana y tarde para el tablero.
Fuente: elaboración propia.

De la Figura 56 se puede concluir que existe una aproximación de temperaturas el día 17/08/2020 puesto que la temperatura más baja registrada en el horario de la tarde es de 18.7°C y la temperatura más alta registrada en el horario de la mañana es de 16.7°C.

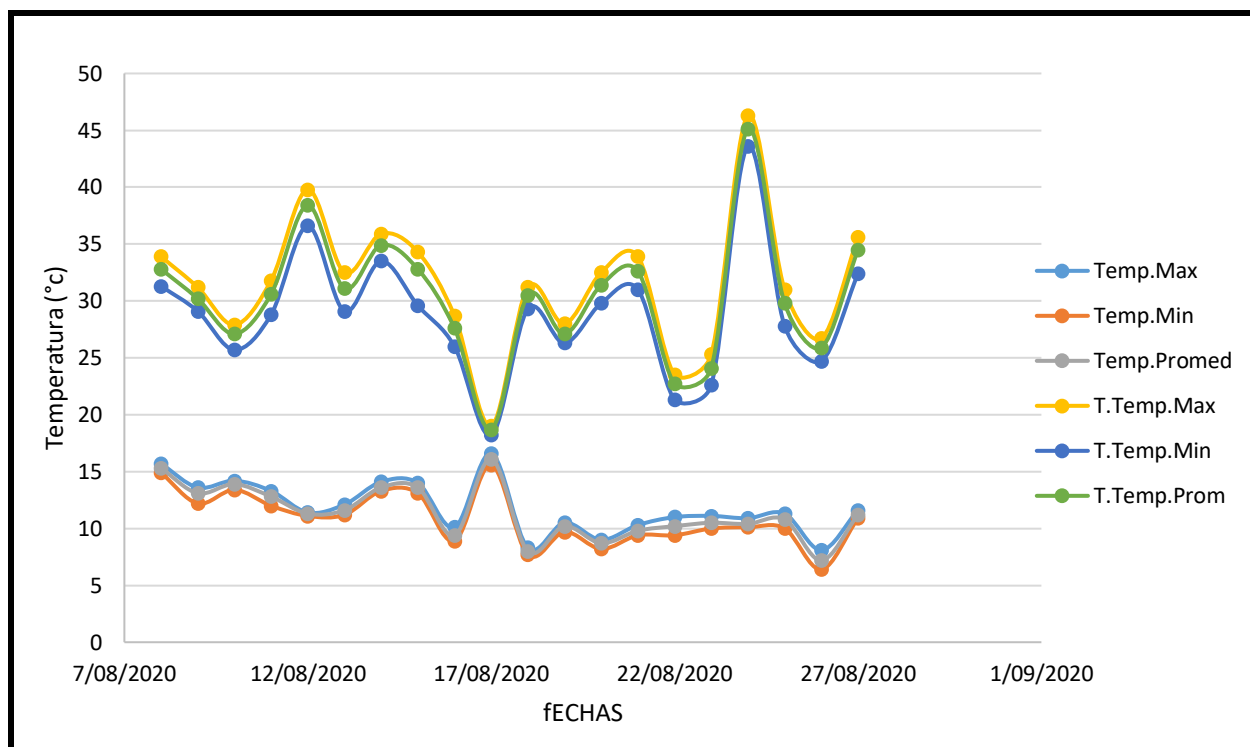


Figura 57. Temperaturas registradas para bordillo en horarios de mañana y tarde en bordillo. Fuente: elaboración propia.

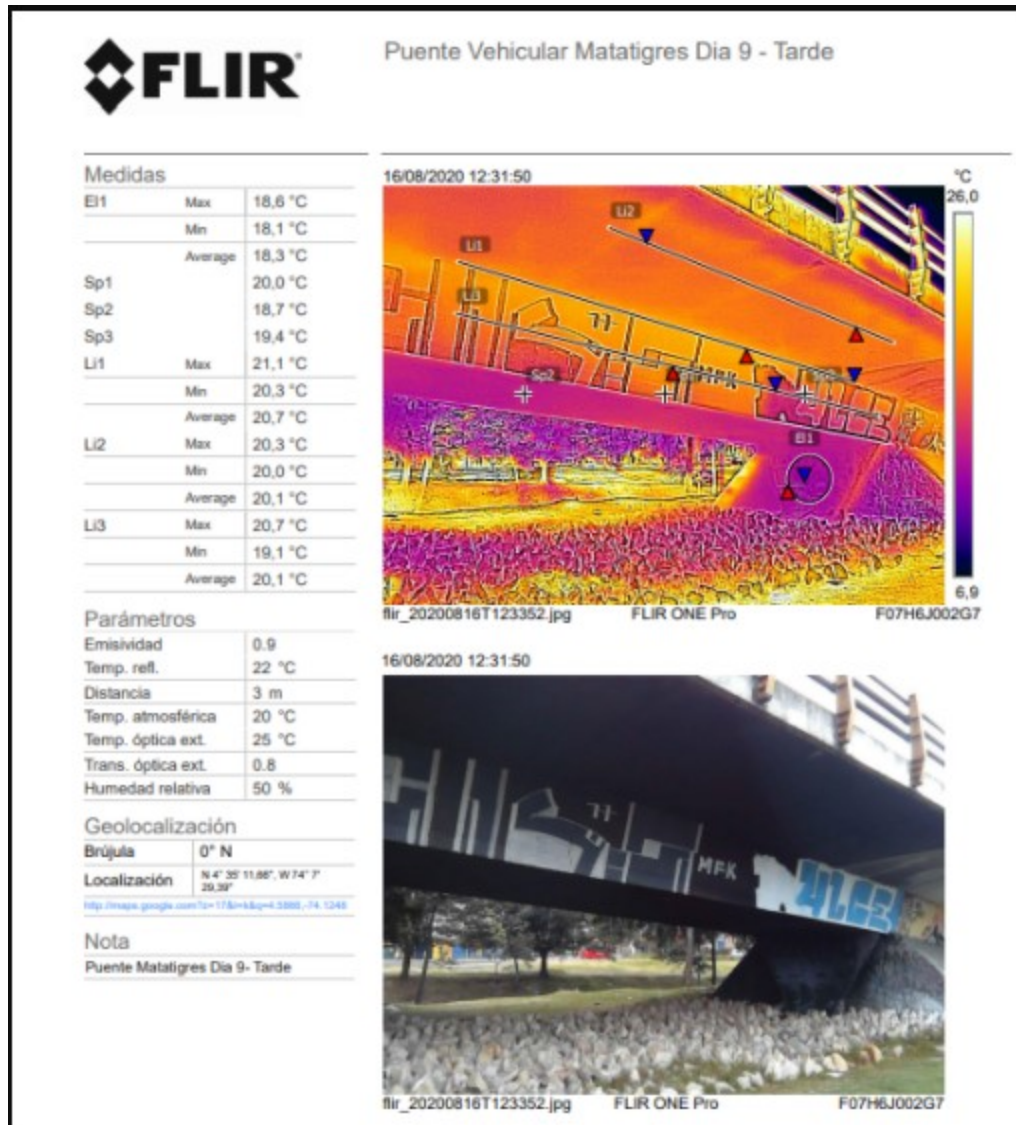


Figura 58. Fotografía No 2 con puntos para análisis. Fuente: elaboración propia.

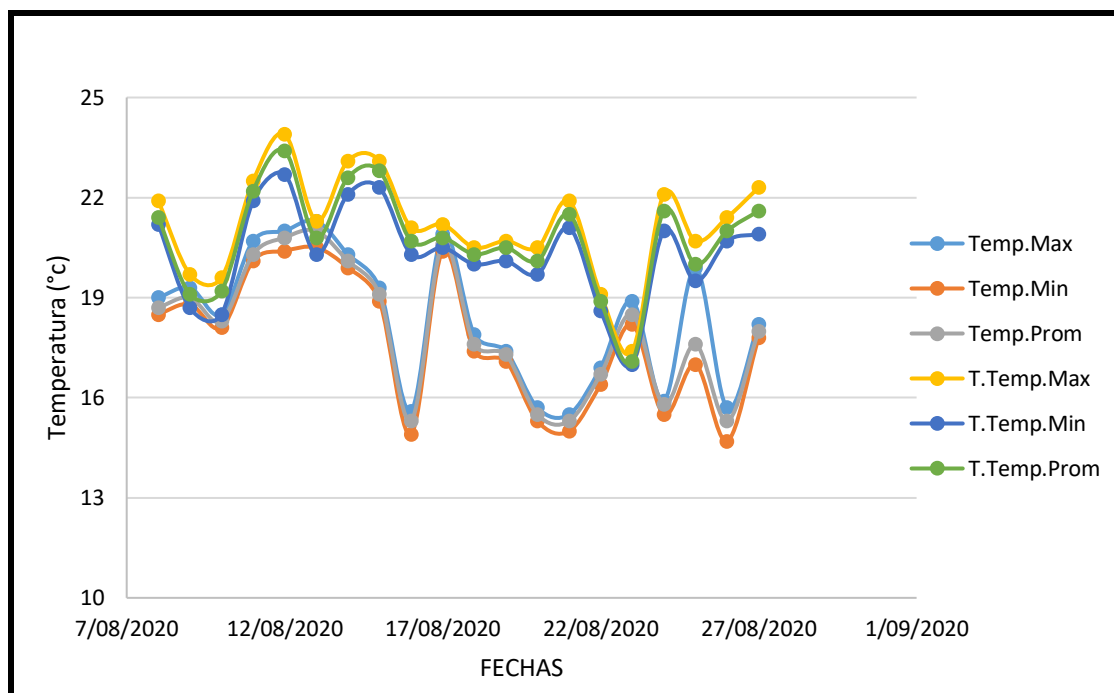


Figura 59. Temperaturas registradas para horario de mañana y tarde para el tablero. Fuente: elaboración propia.

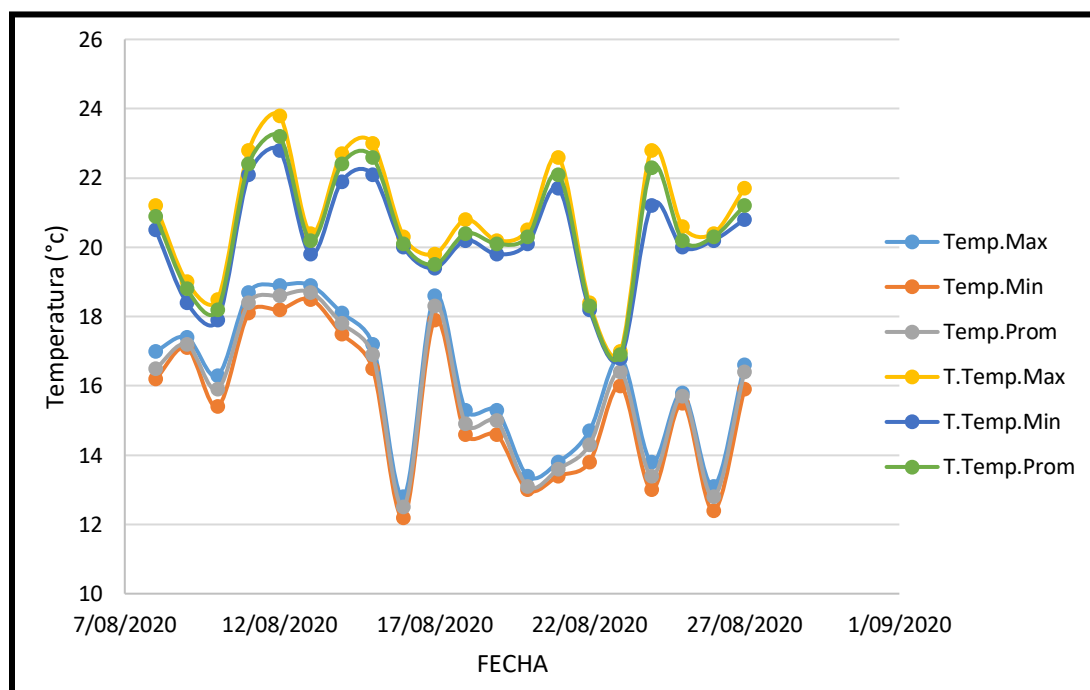


Figura 60. Temperaturas registradas en punto de análisis en ambos horarios en el voladizo. Fuente: elaboración propia.

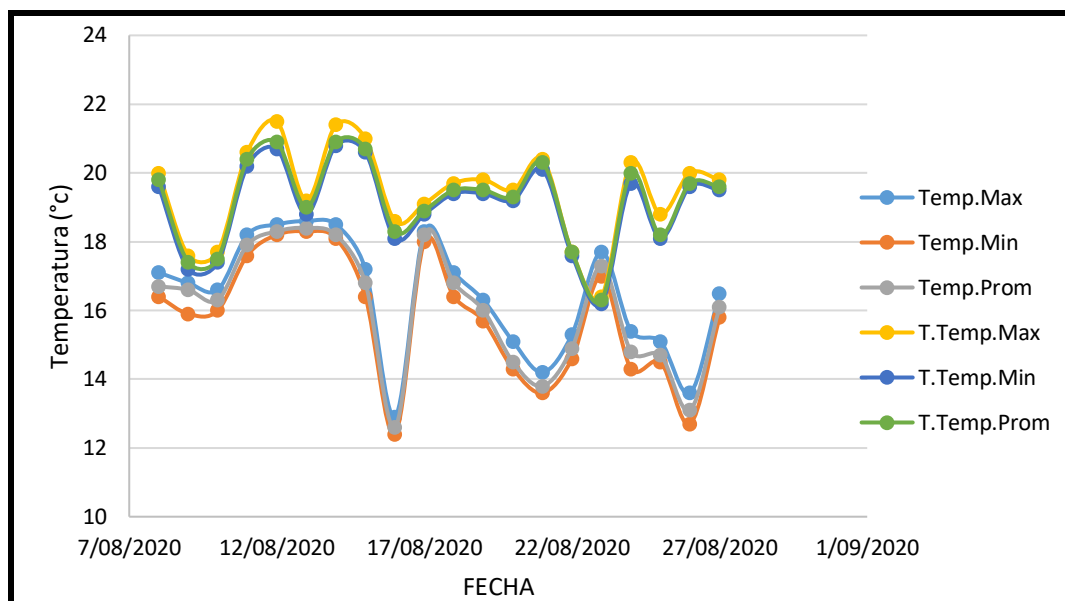


Figura 61. Temperaturas registradas en la mañana y en la tarde en la columna. Fuente: elaboración propia.

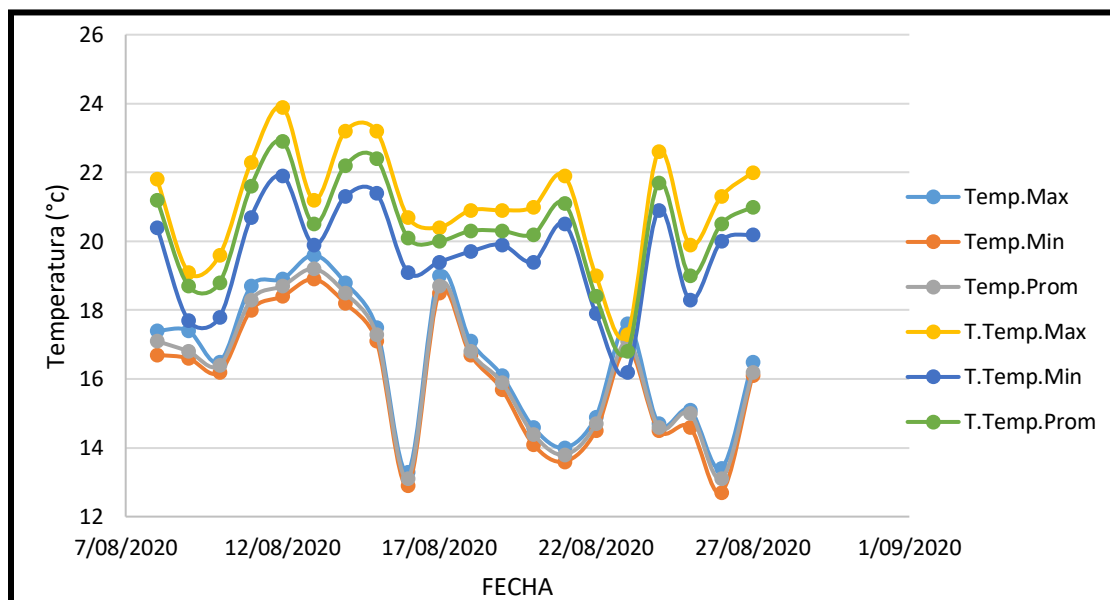


Figura 62. Temperaturas registradas en la mañana y en la tarde en viga. Fuente: elaboración propia.

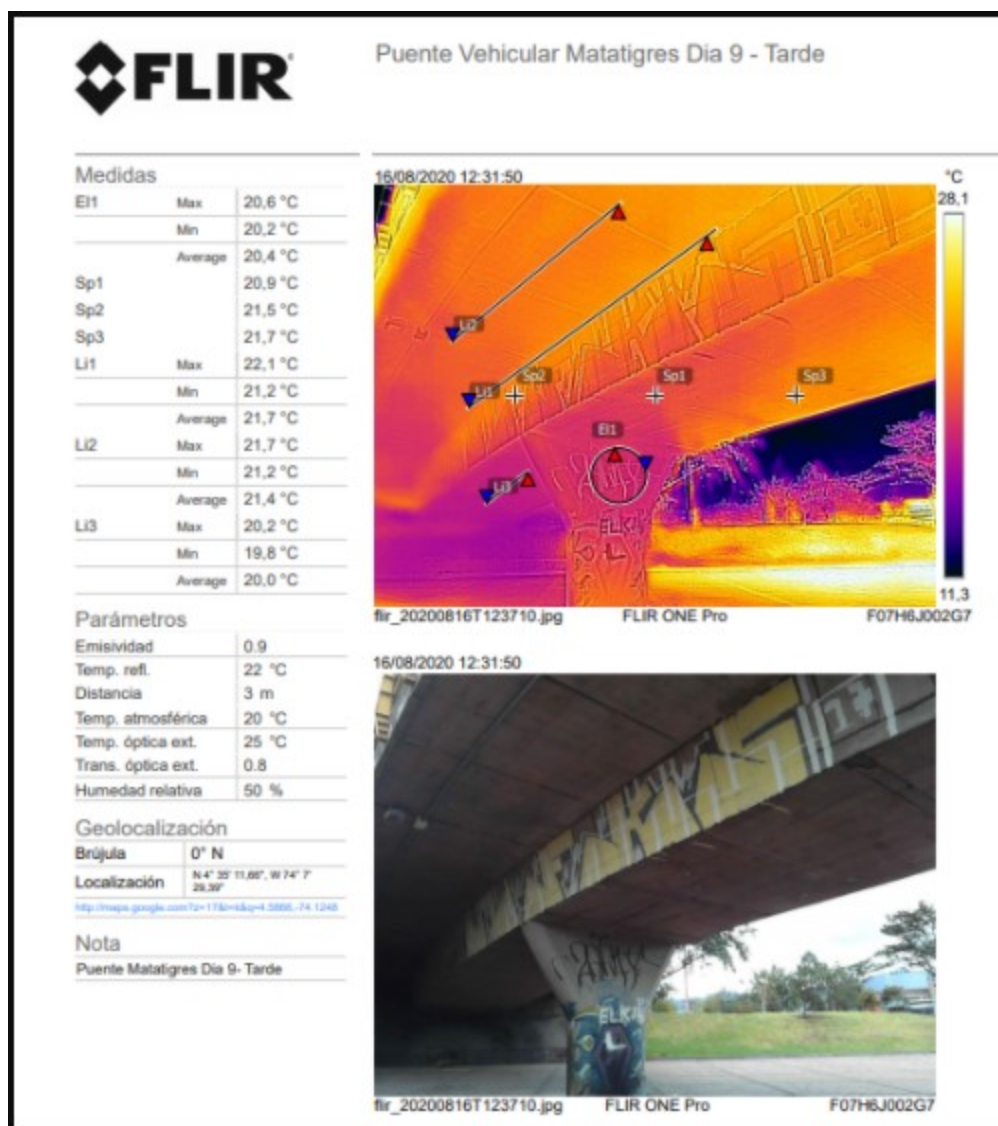


Figura 63. Fotografía No 3 con puntos para análisis. Fuente: elaboración propia.

En la Figuras 64, se observa que en su mayoría de días las temperaturas en ambos horarios son muy similares. El rango de temperaturas está dentro de los 17.2°C a 23°C, la variación no está por encima de los 3°C con excepción del día 12/08/20 en cual presenta una temperatura por debajo de la registrada durante el periodo de estudio correspondiente 15.1°C.

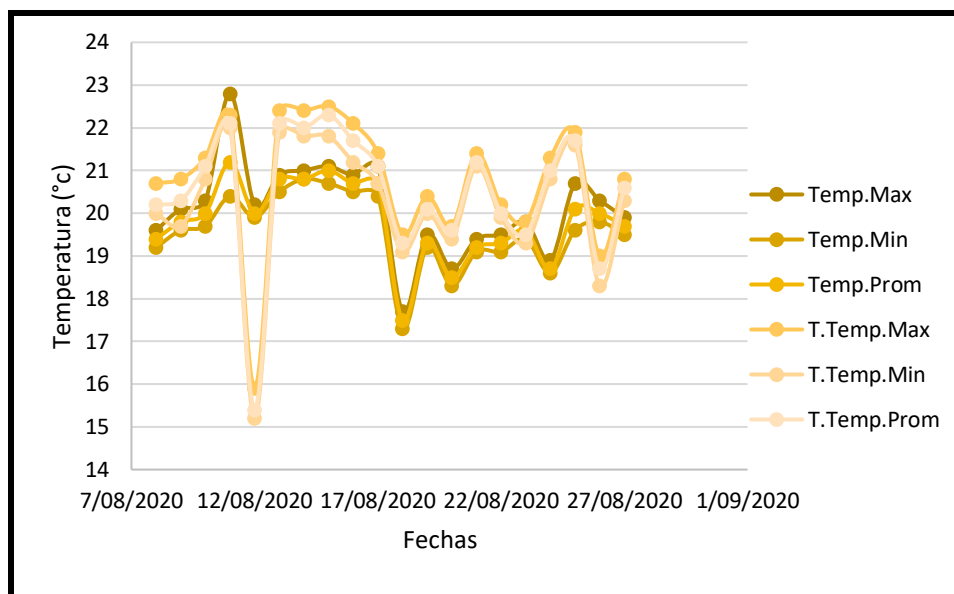


Figura 64. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para el tablero.
Fuente elaboración propia.

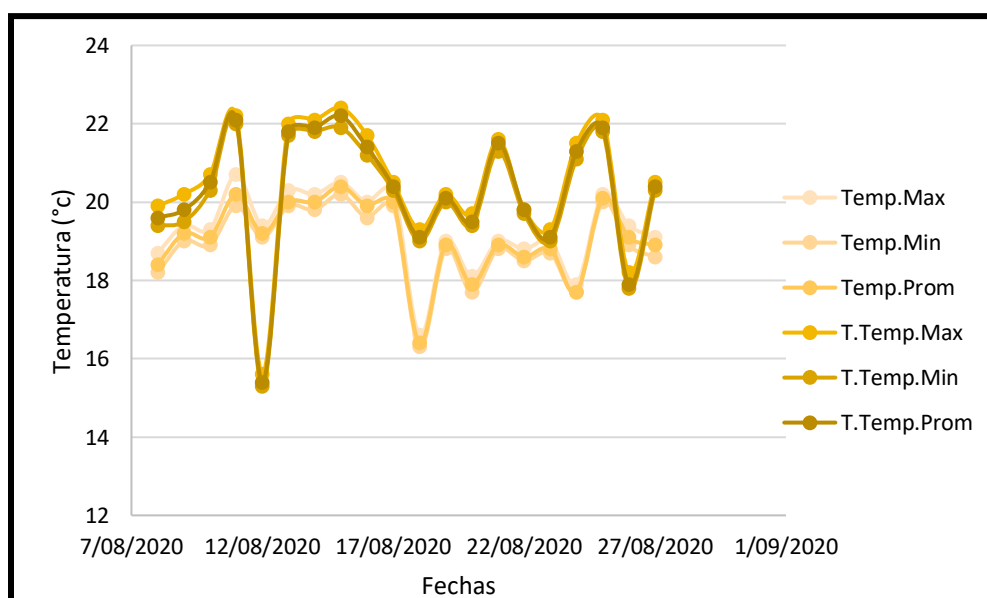


Figura 65. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) en voladizo.
Fuente elaboración propia.

De la Figura 66 se puede concluir que el día 12/08/20 en el horario de la tarde la temperatura más baja registrada es de 13.7°C. Su variación con respecto al día anterior en el

mismo horario está por encima de los 6°C. Esta temperatura es inclusive más baja que las registradas en el horario de la mañana.

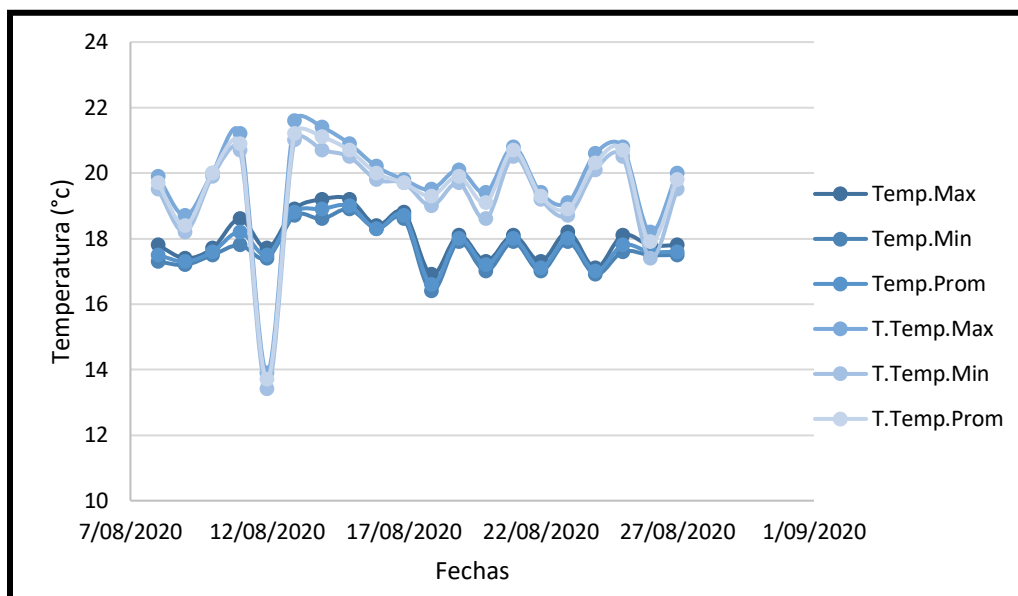


Figura 66. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) en viga. Fuente elaboración propia.

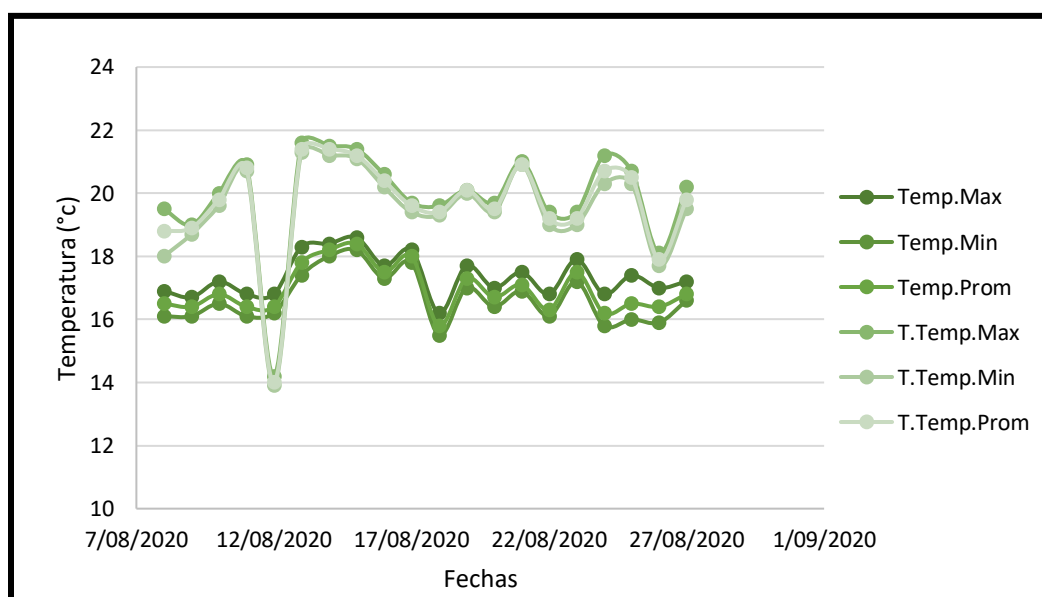


Figura 67. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) en la columna. Fuente elaboración propia.

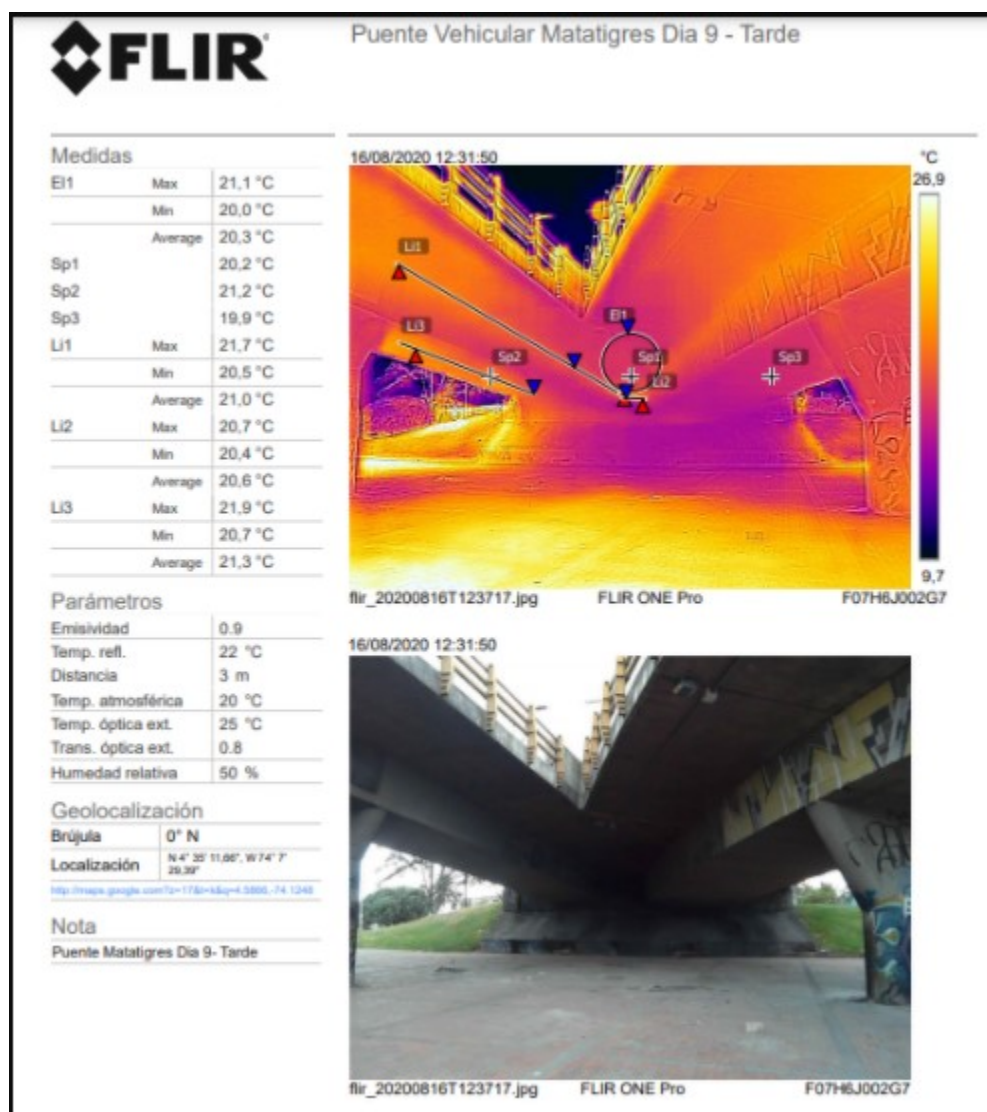


Figura 68. Fotografía No 4 con puntos para análisis en la Y. Fuente elaboración propia.

La variación de temperaturas en algunos puntos de análisis es muy similar, es el caso de la Figura 69 y 70 donde se puede evidenciar el comportamiento de dichas temperaturas y se observa que en algunos casos se registra la misma temperatura tanto para el horario de la mañana como para el horario de la tarde.

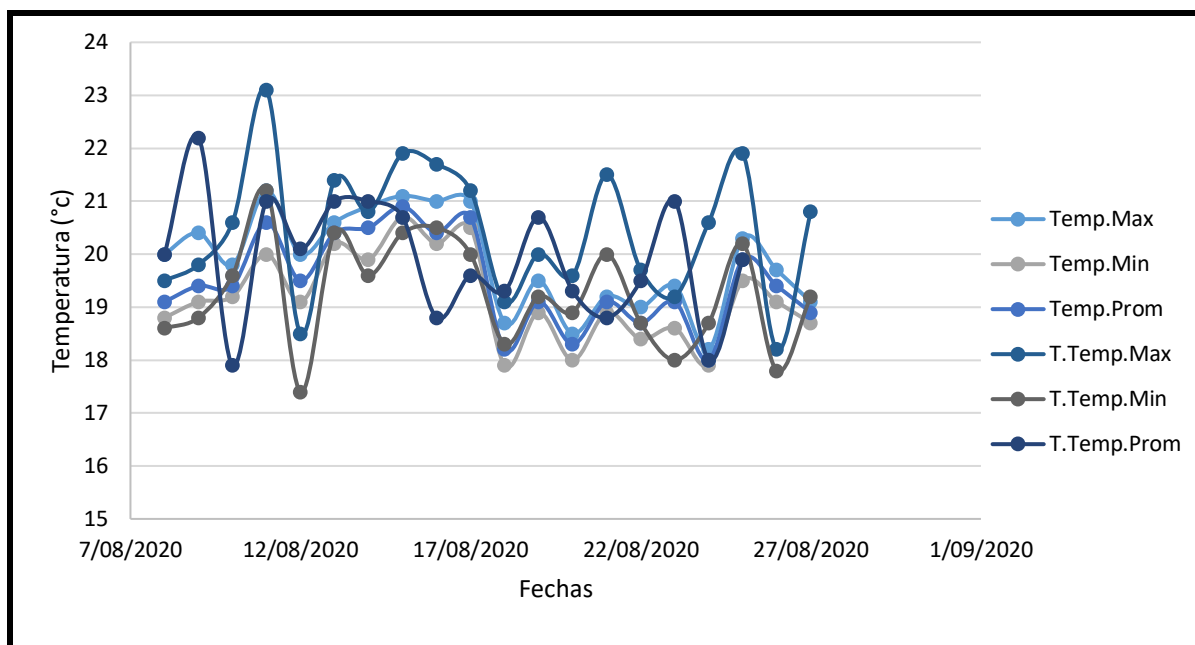


Figura 69. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para tablero.
Fuente elaboración propia.

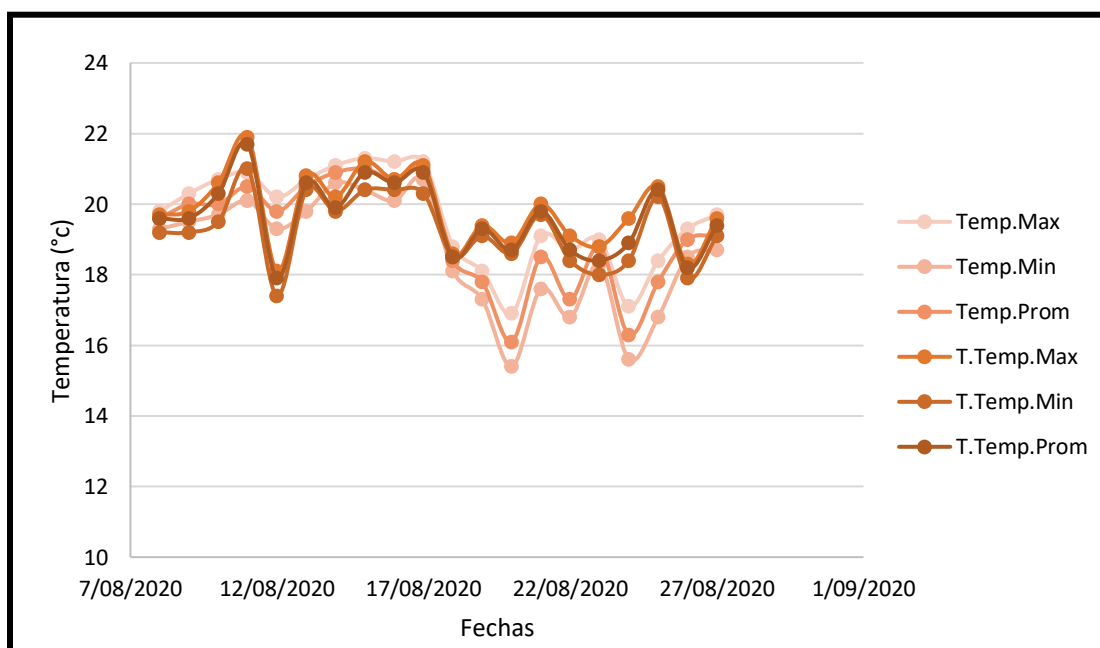


Figura 70. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para unión.
Fuente: elaboración propia.

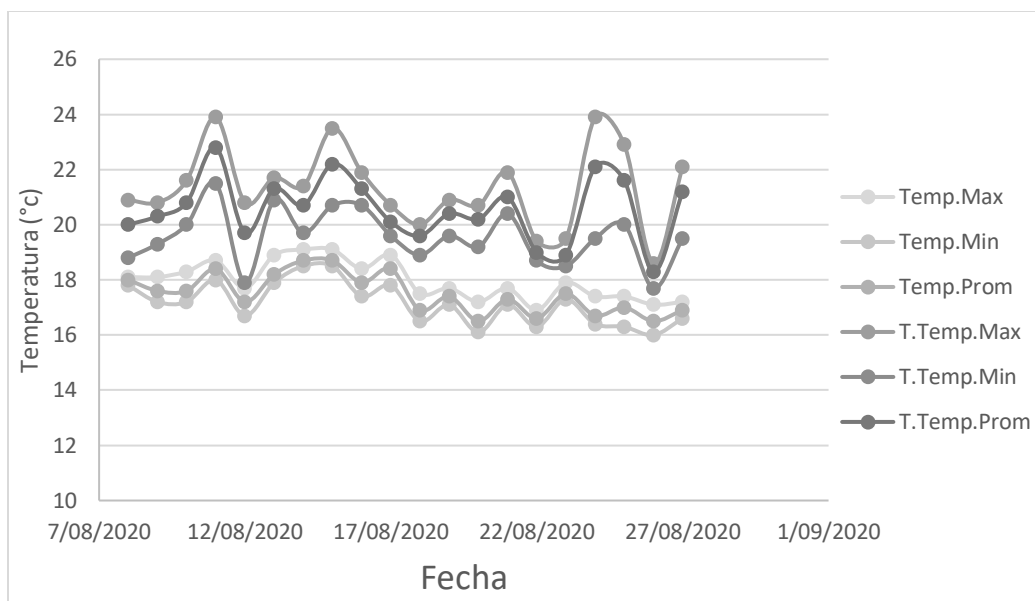


Figura 71. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) en la viga
Fuente: elaboración propia.

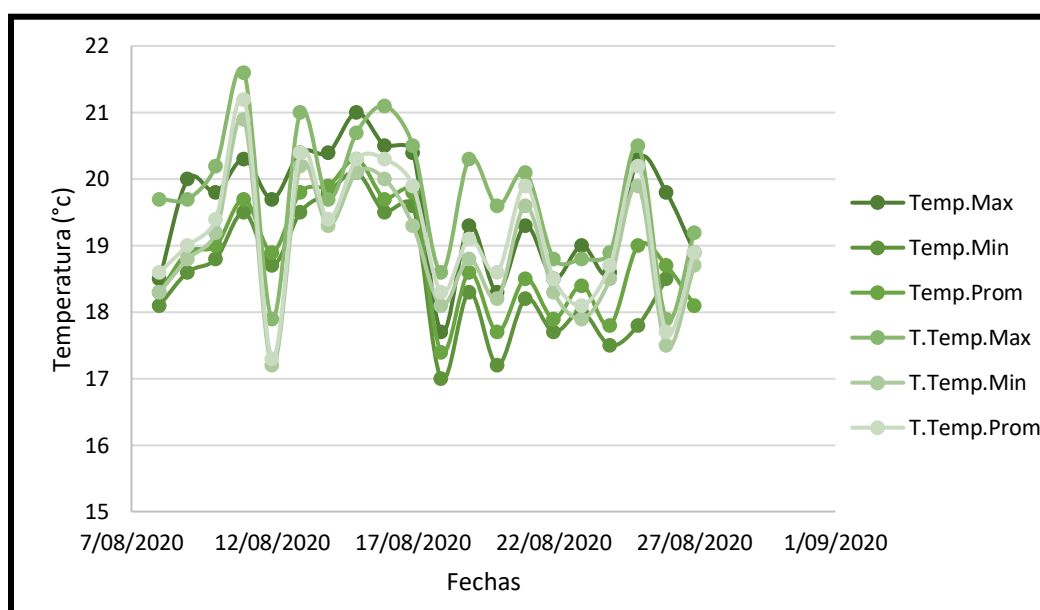


Figura 72. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) en el voladizo.
Fuente: elaboración propia.

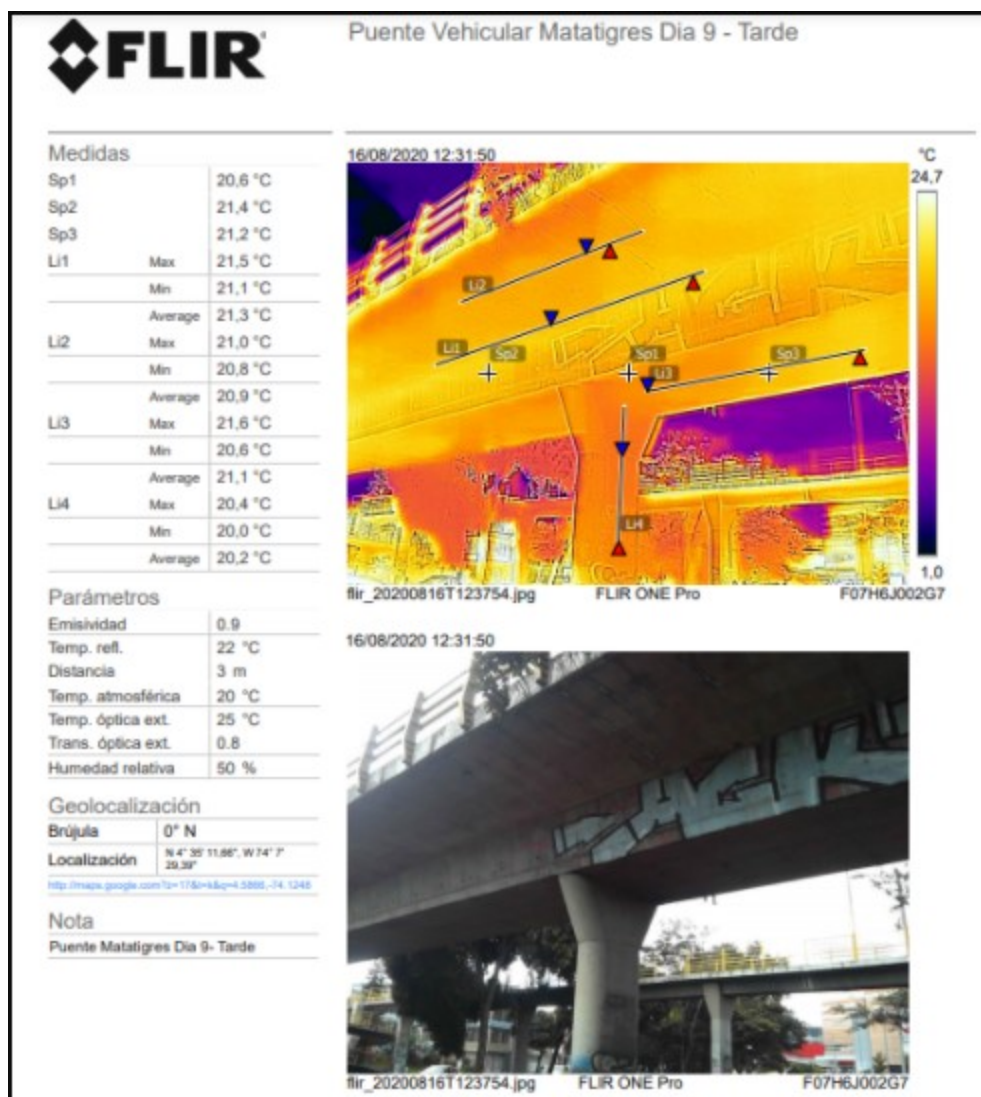


Figura 73. Fotografía No 5 con puntos para análisis. Fuente: elaboración propia.

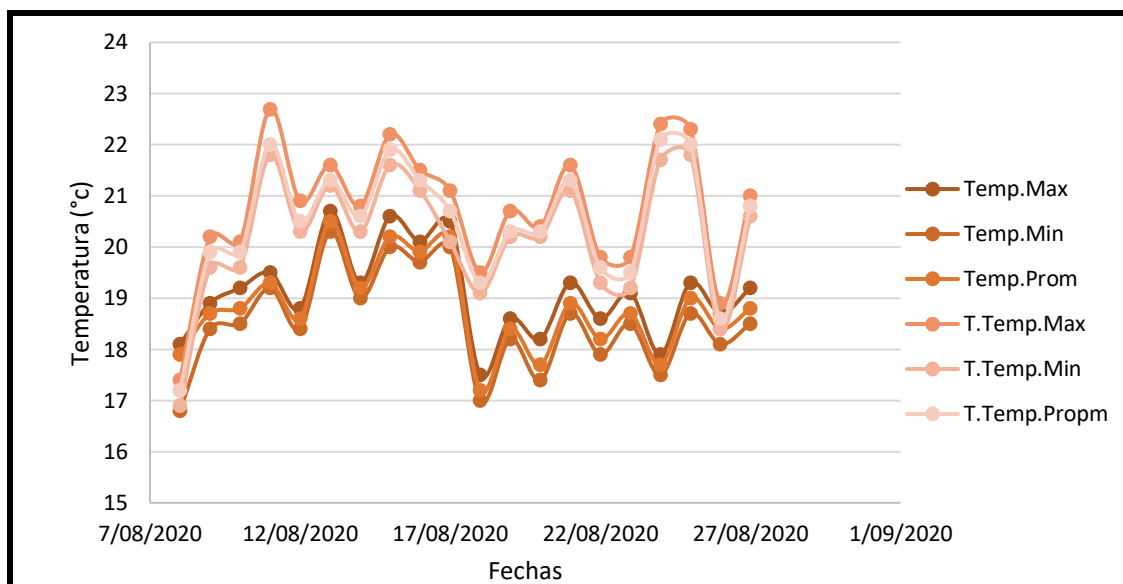


Figura 74. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para tablero.
Fuente: elaboración propia.

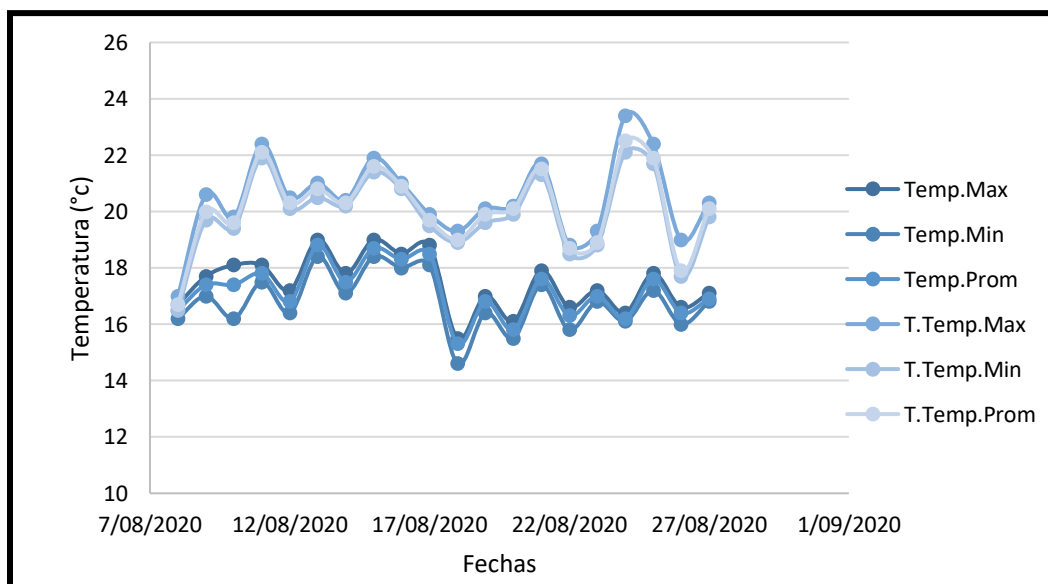


Figura 75. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para voladizo.
Fuente: elaboración propia.

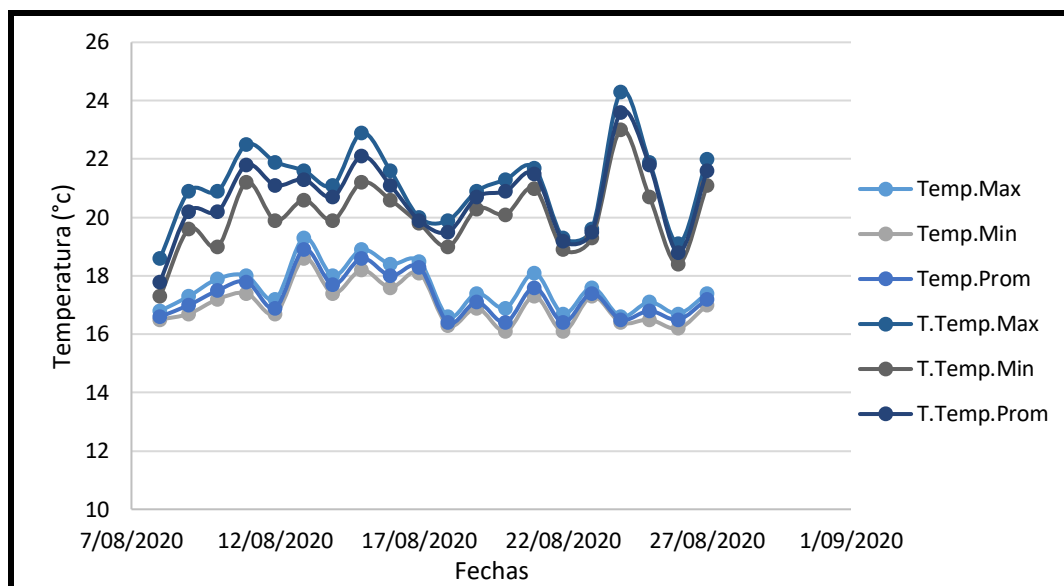


Figura 76. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para la viga.
Fuente: elaboración propia.

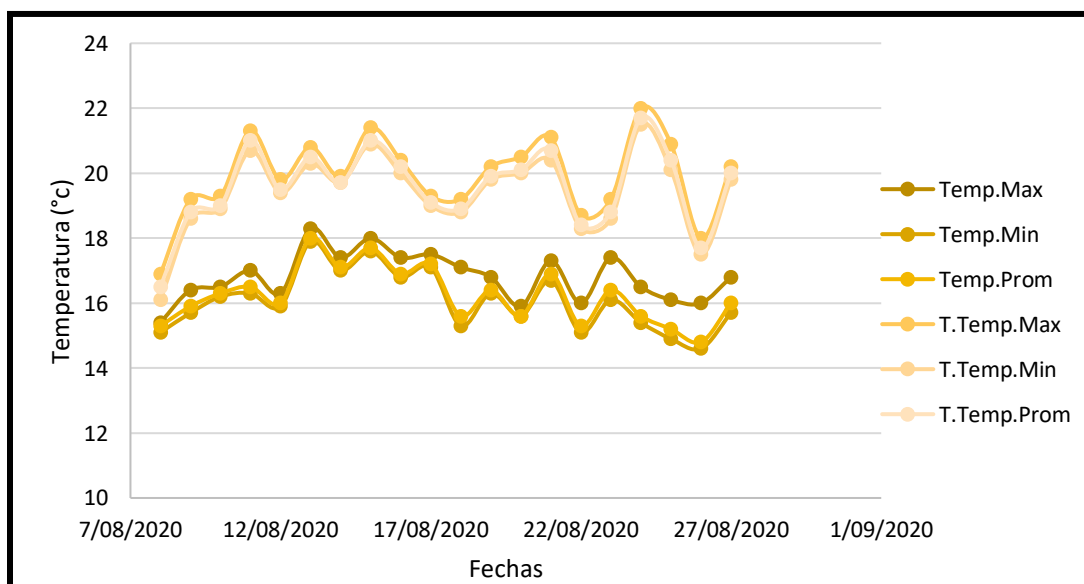


Figura 77. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) en la columna.
Fuente: elaboración propia.

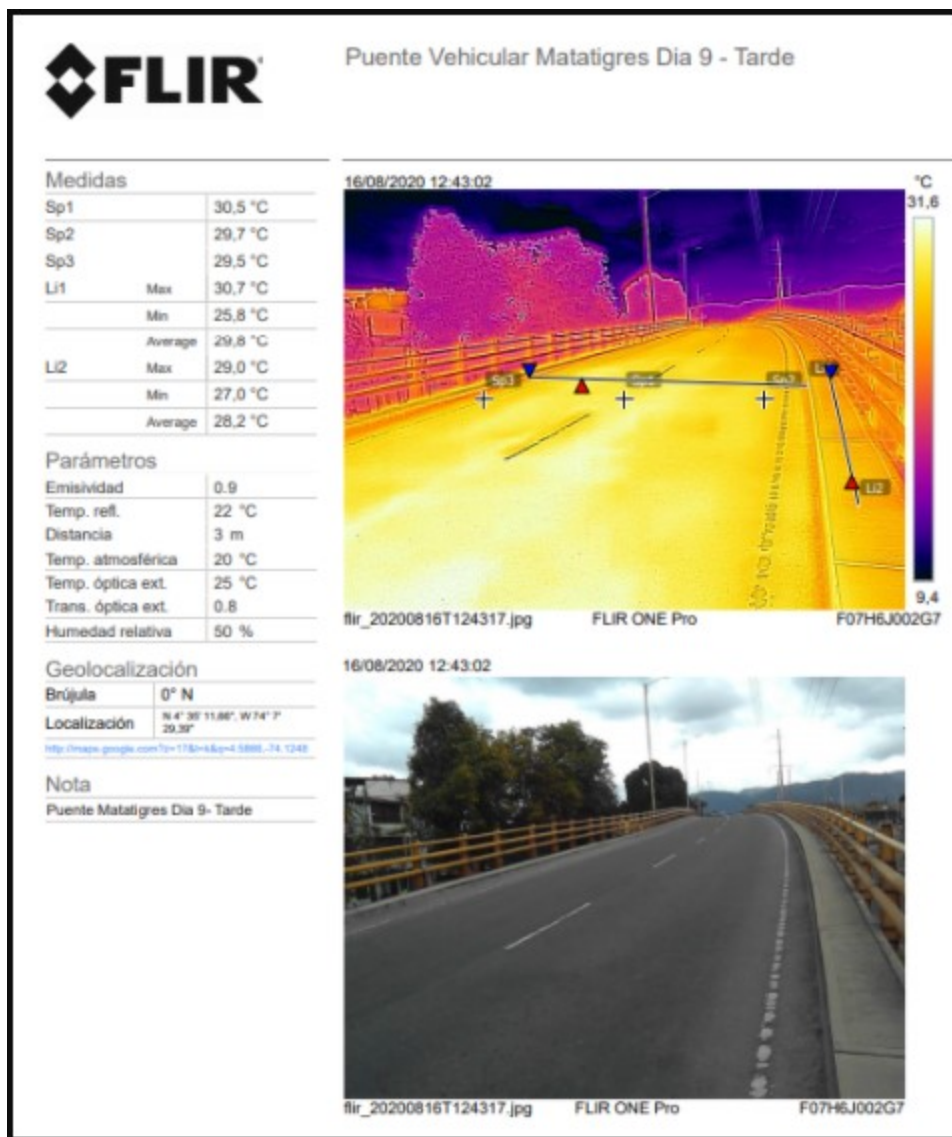


Figura 78. Fotografía No 6 con puntos para análisis. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 79 correspondiente al tablero en la parte superior de la estructura, se observa que el día en que se registró la más alta temperatura fue el día 24/08/20 con una temperatura de 44.9°C para el horario de la tarde.

En general la variación de temperatura para el periodo de monitoreo en el horario de la mañana estuvo dentro de los 10°C. Sin embargo, el horario de la tarde presentó una variación por

encima de los 25°C, lo cual corresponde al doble y más de temperatura que se registró para el horario de la mañana.

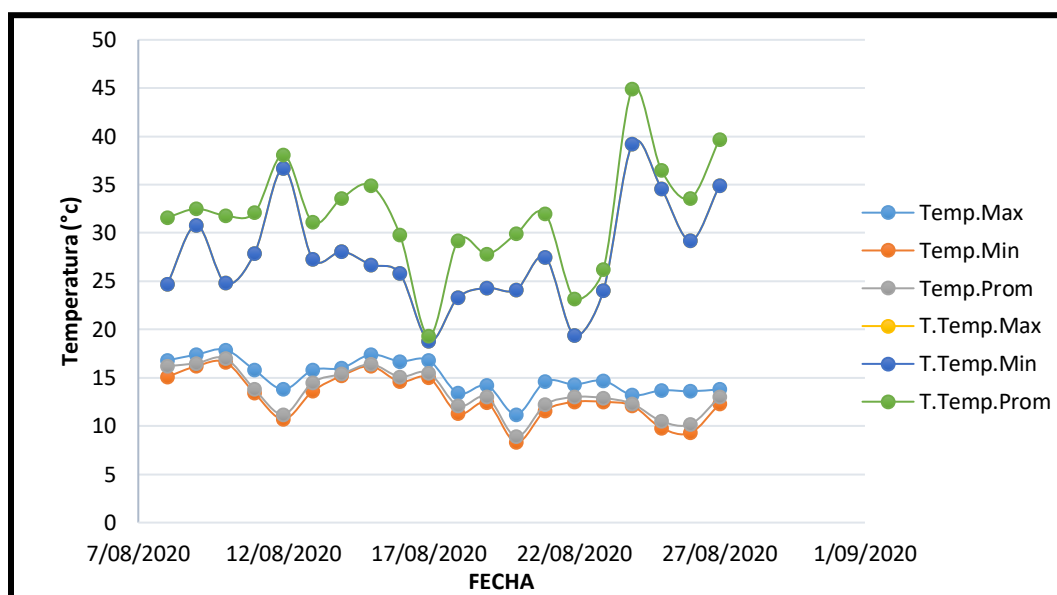


Figura 79. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para el tablero.
Fuente: elaboración propia.

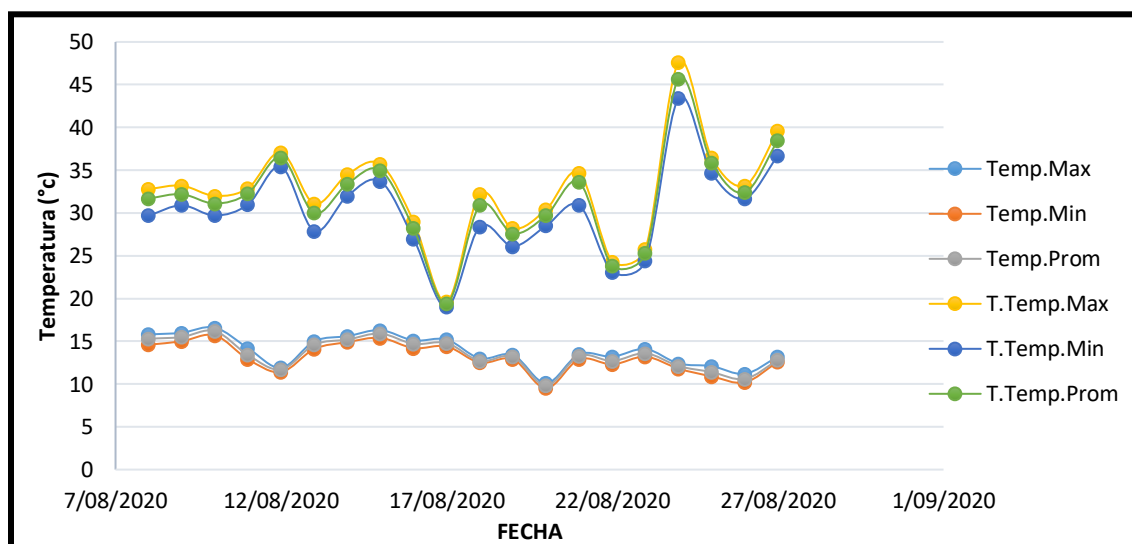


Figura 80. Temperaturas registradas para punto de análisis en ambos horarios (mañana y tarde) para bordillo.
Fuente: elaboración propia.

7.3. Análisis numérico

Después del análisis de los informes y la variación de temperaturas en cada uno de los puentes elegidos. Se procede a realizar el cálculo de la temperatura que afecta directamente el tablero del puente, tanto en su parte superior como en la inferior teniendo en cuenta sus especificaciones técnicas y su composición, esto a través de un análisis numérico. Para llevar a cabo dicho análisis se realiza una comparación entre los datos obtenidos mediante el monitoreo in situ y los datos calculados, para esto se tendrán en cuenta parámetros como los que se muestran en la tabla No 5. Específicamente el coeficiente de emisividad.

Tabla 5.

Propiedades de los materiales.

Material	parámetro	Unidad	Valor utilizado
Concreto	Conductividad Térmica	W/(m °C)	2
	Calor Especifico	J/(kg ° C)	900
	Densidad	kg/m3	2400
	Coefficiente de absorción	-	0,7
	Coefficiente de emisividad	-	0,9
	Coefficiente de expansión térmica	°C	0,0000008
Asfalto	Conductividad Térmica	W/(m °C)	1
	Calor Especifico	J/(kg ° C)	920
	Densidad	kg/m3	2100
	Coefficiente de absorción	-	0,9
	Coefficiente de emisividad	-	0,9
	Coefficiente de expansión térmica	°C	0

Fuente: (Ghali, A. Favre, 2002)

Para realizar un análisis mediante el balance numérico, los puentes objeto de estudio deben encontrarse en equilibrio como muestra la Figura 81.

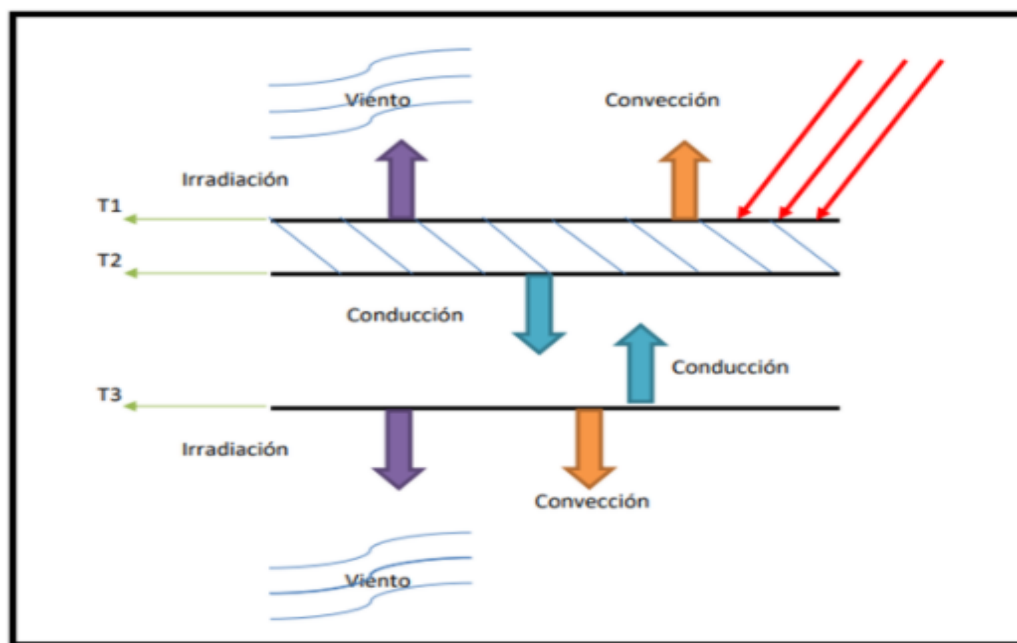


Figura 81. Equilibrio térmico en el puente. Fuente: adaptado de (Patarroyo & Meneses, 2020)

Con este análisis se pretende verificar la temperatura superficial del tablero en su parte superior correspondiente al asfalto (T1). Esto se realiza mediante el desarrollo de la siguiente ecuación:

$$ES + E_{cv} + E_i + E_{cd} = 0 \quad (9)$$

Como indica la ecuación 9, esta debe estar en equilibrio.

Para la verificación de la temperatura superficial del tablero en su parte inferior correspondiente al concreto (T3). Se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$E_{cv} + E_i + E_{cd} = 0 \quad (10)$$

Como se observa en esta ecuación ya no se tiene en cuenta la energía solar, pero la ecuación debe seguir estando en equilibrio.

Donde:

Es: energía solar su unidad de medida es en w/m^2 .

Está presente únicamente en la parte superior del puente. Se halla multiplicando el coeficiente de absorción del asfalto α por la radiación solar de cada día. A continuación, se muestra la ecuación.

$$Es = \alpha * radiación\ solar \quad (11)$$

Ecv: energía por convección.

Esta energía está presente en el tablero del puente tanto en su parte superior como en su parte inferior. Para determinar su valor se hace necesario calcular en primer instante el coeficiente de convección (h_c), este cambia de acuerdo con la velocidad del viento (v).

$$h_c = 6 + 4V, V \leq 5 \text{ m/s} \quad (12)$$

$$h_c = 7.4V^{0.78}, V > 5 \text{ m/s} \quad (13)$$

Una vez hallado el coeficiente de convección por medio de la ecuación x o x, se halla la energía de convección como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Ecv = hA (T1 - T3) \quad (14)$$

Ei: energía por irradiación

Se halla a partir de la constante de Boltzman (σ) y la emisividad (ϵ) de cada material como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Ei = \sigma A (T^4 - TA^4) \quad (15)$$

Donde:

A: es el área de estudio

T: temperatura superficial

TA: temperatura registrada por día

Ecd: energía por conducción unidad de medida w/m*k

Es necesario conocer el espesor del asfalto (La) y el espesor del concreto (Lc). Una vez se tengan estos datos se calcula la energía por conducción mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{T3-T1}{\left(\frac{Lc}{Kc*A}\right)+\left(\frac{La}{Ka*A}\right)} \quad (16)$$

Donde:

A: es el área de estudio

Kc: constante de conducción del concreto

Ka: constante de conducción del acero

Temperatura superficial

Al resolver las ecuaciones se hallan las temperaturas superficiales incidentes en la parte superior e inferior de la estructura del puente. Este análisis se lleva a cabo para cada día del periodo en que se realizó el monitoreo en ambos horarios (mañana y tarde).

En las Figuras 81 y 82 se muestran las gráficas registradas para el tablero en horarios de la mañana y tarde respectivamente, para el puente General Santander.

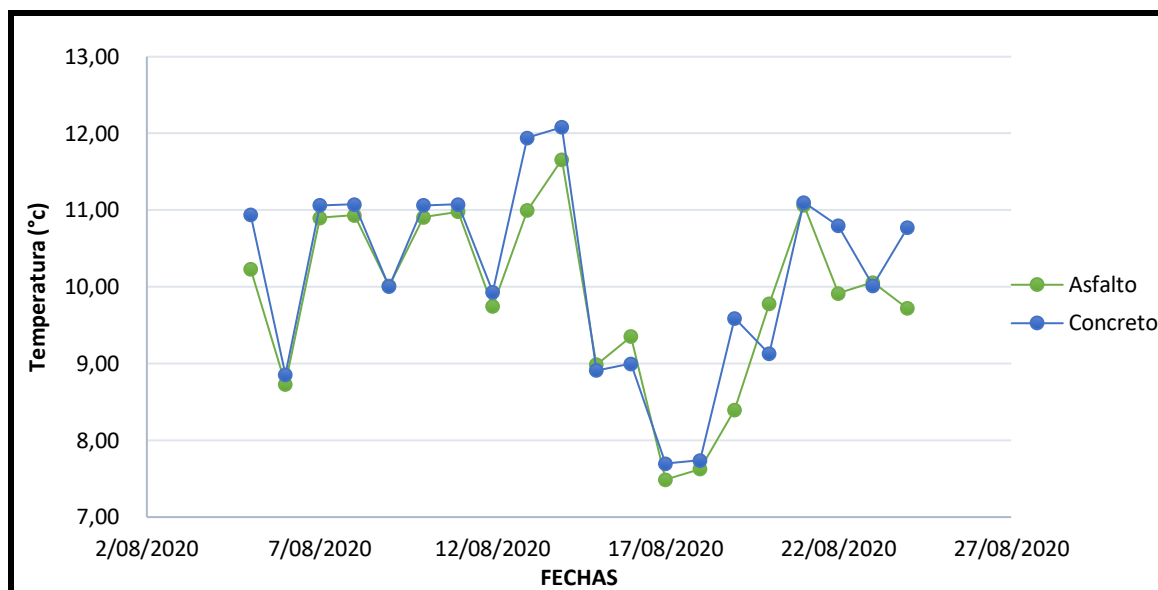


Figura 82. Temperatura superficial del tablero en la mañana en el tablero. Fuente: elaboración propia.

De la anterior Figura se concluye que la temperatura superficial del tablero que afecta directamente la capa de asfalto y concreto en el horario de la mañana no tiene mayor variación, incluso en la mayoría de los días presenta las mismas temperaturas.

El día con mayor temperatura es el 14/08/20 con 12°C para la capa de concreto, el asfalto presenta este mismo día una temperatura del 11°C. La temperatura más baja la registra la capa de asfalto el día 17/08/20 con 7,8°C.

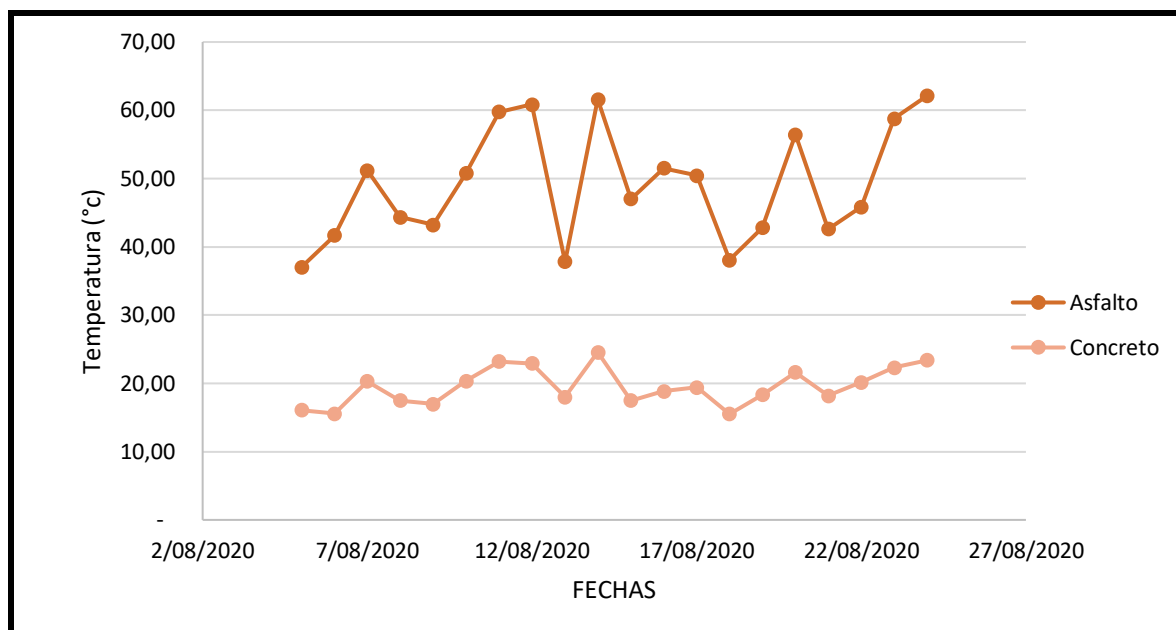


Figura 83. Temperaturas superficiales en el tablero en el horario de la tarde. Fuente: elaboración propia.

En el caso del horario de la tarde (ver Figura 83) se aprecia que las temperaturas del tablero tanto superiores como inferiores registran temperaturas superficiales con mayor diferencia, siendo siempre más altas las registradas en la parte superior del tablero. Las temperaturas superficiales, más altas alcanzan los 60° C y las más bajas los 39°C, hablando de la parte superior del tablero que corresponde al asfalto. Para el caso de la parte inferior del tablero que corresponde al concreto la temperatura superficial más alta registrada es de 26°C para el día 14/08/20 y la más baja es de 16°C el día 18/08/20.

En las figuras 84 y 85 se muestran las temperaturas superficiales registradas para el puente Matatigres en ambos horarios (mañana y tarde). Se muestra la variación de temperaturas para el tablero del puente en su parte superior que corresponde al asfalto y su parte inferior que corresponde al concreto.

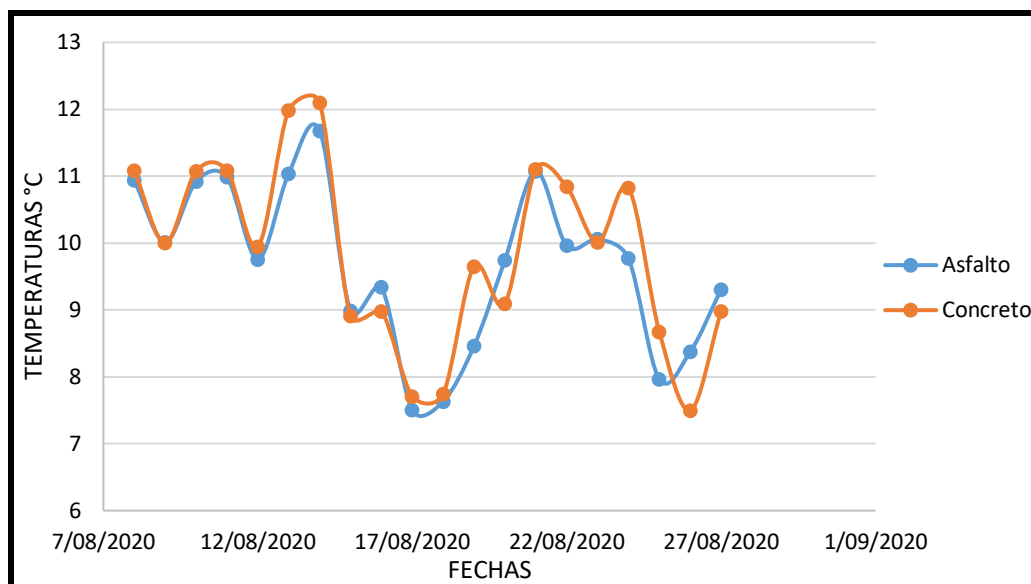


Figura 84. Temperaturas superficiales del tablero en la mañana. Fuente: elaboración propia.

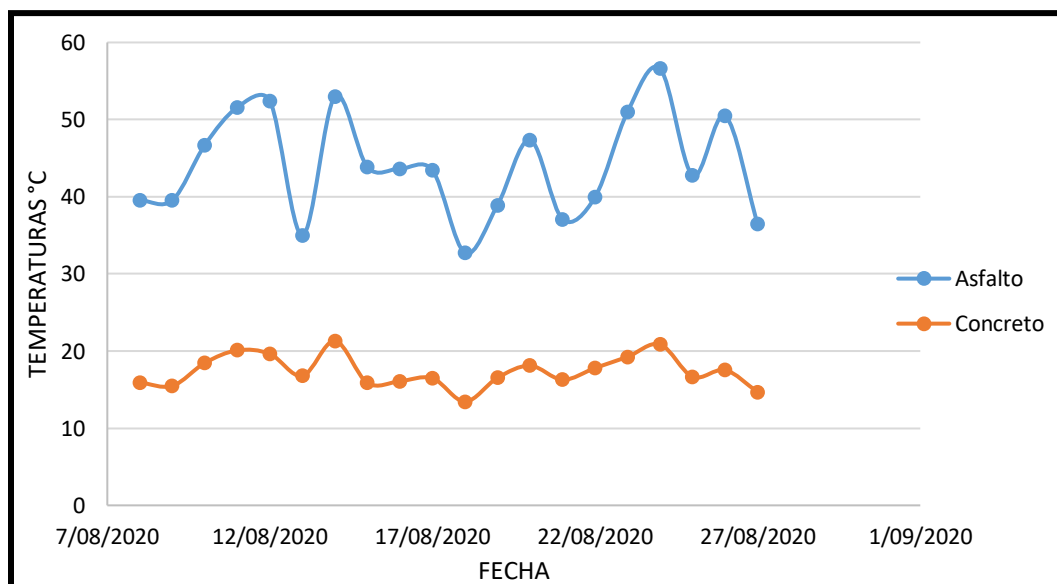


Figura 85. Temperaturas superficiales en el tablero para el horario de la tarde. Fuente: elaboración propia.

Las temperaturas para el horario de la mañana en su mayoría de días, es prácticamente la misma y su variación es muy mínima. Esto ocurre porque el concreto (parte inferior del puente)

acumula una cantidad de energía en forma de calor que fue transferida desde la parte superior del tablero a través del día.

Caso contrario pasa para el horario de la tarde donde las temperaturas tienen una mayor variación, debido a que en esta franja horaria (12:00 a 1:00 pm) se recibe la mayor cantidad de radiación solar. Radiación que es proyectada directamente a la parte superior del tablero del puente, razón por la cual presenta temperaturas más elevadas que la parte inferior de este. El mismo comportamiento presente el puente No1.

7.4. Análisis comparativo

En este punto se procedió a realizar una comparación de temperaturas. Se eligieron las temperaturas promedio registradas en la parte superior del tablero del puente No. 1 en el horario de la tarde con las temperaturas promedios arrojadas por la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional el Dorado de Bogotá (ver Figura 86).

En la Figura 86 se observa que las temperaturas registradas en campo durante el periodo de estudio son mucho más elevadas que las registradas por la estación meteorológica. Las temperaturas registradas in situ están en un rango de 19°C a 45°C mientras que las temperaturas registradas por la estación se encuentran en un rango de 17°C a 24°C. Esto se debe a que la temperatura brindada por la estación es una temperatura general para toda la ciudad. En cambio, las registradas en campo son temperaturas que se dan en un sitio específico y su variación es inevitable, ya que se presentan por diversos factores estacionarios. Se eligieron las temperaturas promedio de uno de los puntos de análisis en la tarde para el puente No.2 y las promedio brindada por la estación.

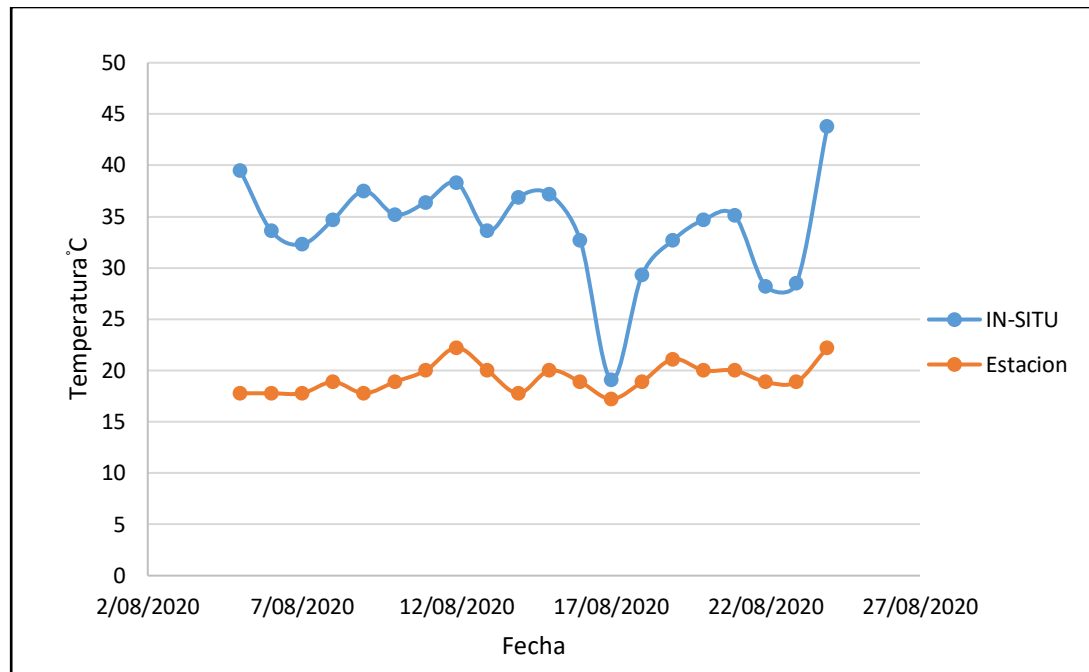


Figura 86. Comparación de temperaturas registradas in situ y las registradas por la estación meteorológica del aeropuerto internacional El Dorado. Fuente propia.

Por último, se hace una comparación entre los datos obtenidos mediante el balance numérico y lo establecido en la normativa colombiana, para lo cual se utilizan los datos de las Tablas No 1 y 2 (ver Tabla 1 y 2).

En la Figura 87 se hace una comparación de los datos de temperatura obtenidos a partir del análisis numérico o balance térmico y los establecidos en las especificaciones de la normativa colombiana para el diseño de puentes en clima moderado con temperatura uniforme y un gradiente térmico para la zona 1. Se observa que para la parte inferior del tablero son menores a las especificadas, con un promedio de (17°C) de diferencia y para la superficie del tablero presentan una aproximación respecto a las máximas medidas en esta parte.

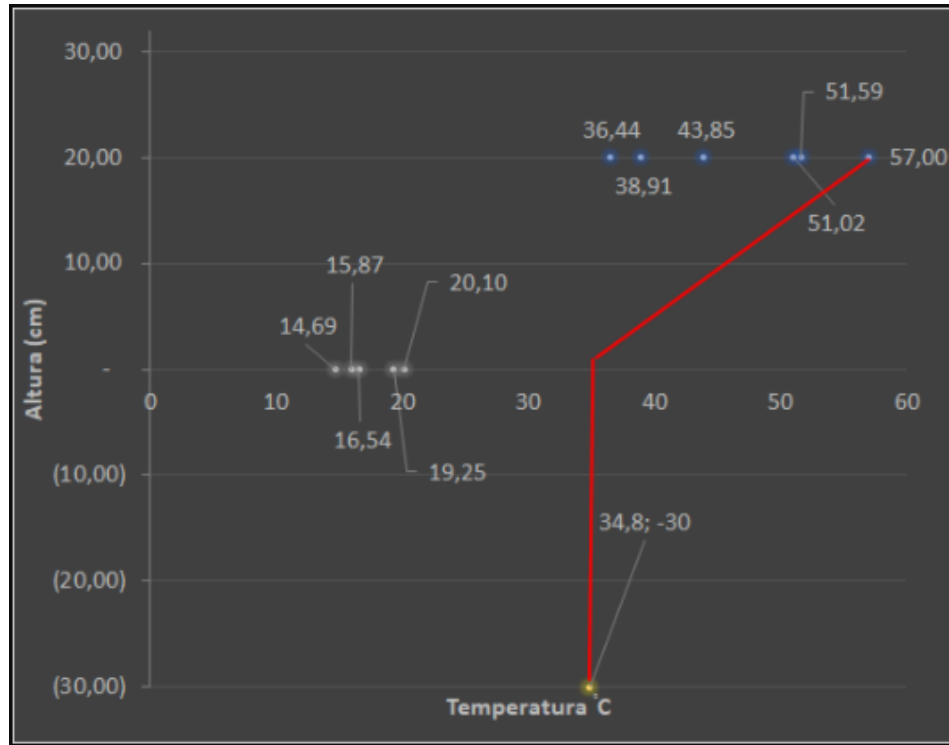


Figura 87. Comparación Norma CCP 14 Vs balance numérico.

7.5. Efectos térmicos en la estructura

Deformaciones por Δt

$$\varepsilon \Delta t = \alpha t * \Delta T \quad (17)$$

Según (Ghali, A. Favre, 2002)

$$\alpha t = 8 \times 10^{-6} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$$

$$\varepsilon \Delta t = 8 \times 10^{-6} \frac{1}{^{\circ}\text{C}} * (50^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C})$$

$$\varepsilon \Delta t = 0,00028$$

Donde

Δt : Cambio de temperatura

$8 \times 10^{-6} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$: Coeficiente de dilatación térmica

(50 °C – 15°C): Promedio de temperaturas obtenidas in situ

Resistencia a tracción del concreto

Se calcula la fricción mediante la siguiente ecuación.

$$f_r = 0,62 * \sqrt{f_c} \quad (18)$$

Resolviendo la ecuación:

$$f_r = 0,62 * \sqrt{21}$$

$$f_r = 2,84 \text{ Mpa}$$

Se calcula el esfuerzo por medio de la siguiente ecuación:

$$E = 3900 * \sqrt{f_c} \quad (19)$$

Resolviendo:

$$E = 3900 * \sqrt{21}$$

$$E = 17872 \text{ Mpa}$$

Deformación a tracción por fr

$$\epsilon_r = \frac{f_r}{E} \quad (20)$$

Resolviendo:

$$\epsilon_r = \frac{2,84 \text{ Mpa}}{17872 \text{ Mpa}}$$

$$\epsilon_r = 1,6 \times 10^{-4}$$

Entonces se tiene como resultado que

$$\varepsilon_{\Delta t} = 0,00028 > \varepsilon_r = 1,6 \times 10^{-4}$$

La deformación por Δt supera la deformación de la resistencia a tracción de concreto y considerando que es una deformación diferencial a las vigas del puente, se podría esperar que el tablero se agriete por estos cambios térmicos.

Conclusiones

Dentro de las imágenes elegidas para realizar el análisis de temperaturas presentadas en los puentes vehiculares, se eligieron fotografías correspondientes a partes de la estructura del puente como las vigas, voladizo, apoyos. Donde se pudo evidenciar a partir de las gráficas, que las temperaturas que registraban para ambos horarios (mañana y tarde) eran similares y no tenían mayor variación. Esto se debe a que estas partes de la estructura no tenían afectación directa del sol.

Al identificar las temperaturas máximas a las cuales se vieron sometidas las estructuras durante el horario de 12:00 pm a 1:00 pm, se evidencio que en el puente vehicular General Santander alcanzo una temperatura de 48.3 °C y el puente vehicular Matatigres registro una temperatura de 46.2°C, estas temperaturas máximas se presentaron el día 24/08/2020 para el tablero en cada uno de los puentes.

Las temperaturas en el horario de la tarde en ambos puentes registraron un rango de temperatura entre los 25°C y 46°C excepto el día 17/08/20, donde su temperatura mínima para este horario estuvo por debajo de los 20°C. Esto se debido a que este día presento precipitaciones con fuertes vientos.

Comparando las temperaturas presentes en la parte superior del tablero correspondiente al asfalto, con las temperaturas de la parte inferior del tablero correspondiente al concreto, se puede concluir que los comportamientos son diferentes para cada horario (mañana y tarde). En la mañana se observa que las temperaturas del concreto son iguales y en algunos casos superan las temperaturas del asfalto, debido a que el concreto almacena el calor transferido a través del día. En la tarde las temperaturas del asfalto son siempre superiores a las del concreto, alcanzando una variación de 13°C de diferencia. Esto se debe a que en el horario de 12:00 a 1:00 pm los puentes reciben una mayor cantidad de radiación solar.

Se estableció también, que las temperaturas halladas por medio del análisis numérico con respecto a las establecidas mediante el procedimiento A del código de diseño de puentes, son menores para la parte inferior del puente con una variación de 17°C, caso contrario para la superficie del tablero donde se presenta una aproximación respecto a las máximas medidas en esta parte.

Finalmente se concluye que se podrían presentar grietas en el tablero de los puentes objeto de estudios debido a los cambios térmicos a los cuales se ven expuestos, ya que se pudo establecer que la deformación por Δt supera la deformación de la resistencia a tracción de concreto y considerando que es una deformación diferencial a las vigas del puente.

Recomendaciones

Es aconsejable que en dado caso que quisieran realizar un tipo de proyecto de investigación como este, se tomaran el trabajo de realizarlo durante más tiempo y se basaran en los puntos ideales de las estructuras como lo es el tablero debido a que este es el punto de interés para poder identificar la temperatura del concreto y del asfalto.

Referencias

Bing images. (2009). *Transferencia de calor*. - Bing images.

https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=517YRlt5&id=E4AD3B6FB58A5858FC059F458FD964F6B15A9408&thid=OIP.517YRlt585rWa1o8wMErMwAAAA&mediaurl=https%3A%2F%2Fupload.wikimedia.org%2Fwikipedia%2Fcommons%2Fthumb%2F1%2F1e%2FSistemas_Termicos.jpg%2F250

Browne, M. (2013). *Temperatura, calor y transferencia de calor* (Tercera). McGraw-Hill Education.

<https://ezproxy.uan.edu.co:2107/content/book/9780071810906/chapter/chapter17>

Castro C., B. (1989). Fundación Misión Colombia. Historia de Bogotá . Bogotá: Villegas Editores, 3 tomos, 1988. *Historia Crítica*, 2, 132–136.

<https://doi.org/10.7440/histcrit2.1989.11>

ÇENGEL, Y. A. (2007). *Transferencia de Calor y Masa Un enfoque práctico* (Tercera).

McGraw-Hill. <https://ezproxy.uan.edu.co:2830/es/lc/bibliouan/titulos/73734>

Colombia Weather History | Weather Underground. (2020). *Colombia Weather History | Weather Underground*.

<https://www.wunderground.com/history/monthly/co/bogotá/SKBO/date/2020-8>

Daniel, N. (2018). What Are Convection Currents? *Science Trends*.

<https://doi.org/10.31988/scitrends.9813>

Elsevier B.V. (2004). *Scopus preview - Scopus - Welcome to Scopus*. Welcome to Scopus Preview. <https://ezproxy.uan.edu.co:2063/standard/marketing.uri>

FLIR Tools | *FLIR Systems*. (n.d.). Retrieved November 1, 2020, from

<https://www.flir.com.mx/products/flir-tools/>

Flores, N. (2015). *Propagación del calor: formas y ejemplos*. EDUCAYCREA.COM.

<https://www.educaycrea.com/2014/04/propagacion-del-calor-formas-y-ejemplos/>

Ghali, A. Favre, R. E. M. (2002). *CONCRETE STRUCTURES* (Third, Vol. 4, Issue 1). Spon

Press is an imprint of the Taylor & Francis Group.

<http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=reference&D=psyc3&NEWS=N&AN=2000-03615-002>

Giovanni - NASA. (2020). *Giovanni*.

[https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=TmAvMp&starttime=&endtime=&variableFacets=dataFieldMeasurement%3AIncident Radiation%3B](https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/#service=TmAvMp&starttime=&endtime=&variableFacets=dataFieldMeasurement%3AIncident%20Radiation%3B)

Google Earth. (2020). *Google earth*. https://doi.org/10.1007/978-0-387-35973-1_542

Gottsäter, E., Larsson Ivanov, O., Molnár, M., & Plos, M. (2018). Validation of Temperature

Simulations in a Portal Frame Bridge. *Structures*, 15, 341–348.

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.07.007>

Instituto de Desarrollo Urbano. IDU. (2014). *Inventario de Puentes - Actualización 2014* (p. 32).

http://www.mep.go.cr/sites/default/files/barajas_fonologicas.pdf

Instituto de Desarrollo Urbano. IDU. (2019). *Boletín técnico: Evaluación del Riesgo sísmico de*

los puentes del Distrito.

[https://www.idu.gov.co/Archivos_Portal/SIIPVIALES/Innovacion/2019/10
Octubre/documentos Tecnicos/Puentes/Boletin_06_inventario_puentes.pdf](https://www.idu.gov.co/Archivos_Portal/SIIPVIALES/Innovacion/2019/10%20Octubre/documentos%20Tecnicos/Puentes/Boletin_06_inventario_puentes.pdf)

Instituto de Desarrollo Urbano. IDU - Inventario y estado de servicio de los puentes de la ciudad de Bogotá D.C. (2020). *Inventario y estado de servicio de los puentes de la ciudad de Bogotá D.C.* Junio.

<https://idu.maps.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.html#/eae74f19b3c44edfbee656148ec206f9>

Instituto de Desarrollo Urbano. IDU - Matatigres. (2017). *INSTRUMENTACIÓN DE PUENTES VEHICULARES DENTRO DEL SAP-IDU PARA BOGOTÁ FASE I Puente Vehicular Avenida NQS x Autopista Sur (Matatigres Eje E) INTRODUCCIÓN.*

Jiménez Bernal, J. A., & Gutiérrez Torres, C. del C. (2014). *Termodinámica.*

https://ezproxy.uan.edu.co:2830/es/lc/bibliouan/titulos/39466?prev=fs&fs_themes=482480&fs_themes_lb=Termodinámica

Lin, J., Briseghella, B., Xue, J., Tabatabai, H., Huang, F., & Chen, B. (2020). Temperature Monitoring and Response of Deck-Extension Side-by-Side Box Girder Bridges. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001399](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001399)

Muñoz Domínguez, M. Montes Pita, M. J. y de Antonio, A. R. (2014). *Ingeniería térmica.*

Universidad Nacional de Educación a Distancia.

<https://ezproxy.uan.edu.co:2830/es/lc/bibliouan/titulos/48799>

Patarroyo, L., & Meneses, H. (2020). *Temperatura superficial in situ en el puente vehicular de la Avenida Américas con Avenida Boyacá (Bogotá) y en el puente Intercambiador vial el Tizón (Neiva).*

Ramirez, C. (2012). *Tipologías de los Puentes.* <https://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99->

0053-02/contenido/9_clasificacion_puentes.htm

Resolución 108. (26 de 01 de 2015). NORMA COLOMBIANA DE DISEÑO DE PUENTES

CCP-14. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/3709-norma-colombiana-de-diseno-de-puentes-ccp14>

Rojas, J. A. (2019). *Temperatura superficial en el puente vehicular de sección mixta de la calle 80 con NQS en Bogotá Julian* (p. 88).

Rolle, K. C. (2006). *TERMODINÁMICA* (Sexta). PEARSON Educación.

<http://ezproxy.uan.edu.co:2071/?il=3536>

Scopus. (2020). *Scopus - Document search | Signed in.*

<https://ezproxy.uan.edu.co:2063/search/form.uri?display=basic>

Somenson, H. (2015). *Estudio y Proyecto de Puentes de Hormigón Armado.*

<https://ezproxy.uan.edu.co:2830/es/lc/bibliouan/titulos/57478>

Song, J., Shi, X. F., & Ruan, X. (2018). Analysis and Active Control of Time-Varying Convection Influences of Concrete Pylon in Early Age Phase. *Bridge Construction*, 48(3),

23–28. [https://ezproxy.uan.edu.co:2063/record/display.uri?eid=2-s2.0-](https://ezproxy.uan.edu.co:2063/record/display.uri?eid=2-s2.0-85052826163&origin=resultslist&zone=contextBox)

[85052826163&origin=resultslist&zone=contextBox](https://ezproxy.uan.edu.co:2063/record/display.uri?eid=2-s2.0-85052826163&origin=resultslist&zone=contextBox)

Tang, Y., Wang, Y., Niu, Y., Chen, H., & Pingming, H. (2018). Monitoring of Daily

Temperature Effect on Deck Deformation of Concrete Arch Bridge. *MATEC Web of*

Conferences, 206. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201820601011>

Theodore L. Bergman; Adrienne S. Lavine; Frank P. Incropera; David P. (2011).

FUNDAMENTALS OF HEAT and MASS TRANSFER (SEVENTH). John Wiley & Sons.

Torres, A. (2010). *File:Calor00102022200002.png - Wikimedia Commons.*

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Calor00102022200002.png>

Veracruz, E. (2012). *CLASIFICACIÓN DE LOS PUENTES.*

<https://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0053->

[02/contenido/9_clasificacion_puentes.htm](https://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0053-02/contenido/9_clasificacion_puentes.htm)

Warren M. Rohsenow; James P. Hartnett; Young I. Cho. (1998). *Handbook of Heat Transfer.*

McGraw-Hill Education.

[https://ezproxy.uan.edu.co:2107/content/book/9780070535558/chapter/chapter1?implicit-](https://ezproxy.uan.edu.co:2107/content/book/9780070535558/chapter/chapter1?implicit-login=true)

[login=true](https://ezproxy.uan.edu.co:2107/content/book/9780070535558/chapter/chapter1?implicit-login=true)