

# UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Química

***Diseño, construcción y puesta en marcha de una cámara para la oxidación del asfalto por meteorización con base en la norma ASTM D4799 y factores climáticos costarricenses***

Proyecto de graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química

Presenta:

Stanlyn Itzcoatl Viana Guzmán

B57770

Directora de Proyecto de Graduación:

Alejandra Baldi Sevilla

San Pedro Montes de Oca, 2022

Proyecto final de graduación sometido a consideración de la Escuela de Ingeniería Química como requisito final para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química

**Sustentante**



Stanlyn Itzcoatl Viana Guzmán

**Aprobado por**

Presidente del tribunal



**Mag. Adolfo Ulate Brenes**

Escuela de Ingeniería Química, UCR

Directora del proyecto



**Quím. Alejandra Baldi Sevilla, M.Sc.**

Escuela de Química, UCR

Lector del proyecto



**Dr. Benito A. Stradi Granados**

Escuela de Ingeniería Química, UCR

Lectora del proyecto

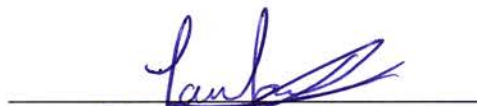


**Ingª. Ellen Rodríguez Castro, Licda.**

Laboratorio de Materiales y Modelos

Estructurales, UCR

Lector de objetivos



**Dr. Lautaro Ramírez Varas**

Escuela de Ingeniería Química, UCR

## DEDICATORIA

*A Dios y a la Virgen María a quienes siempre consagro mi vida y cada proyecto que empiezo, siempre me dan fuerza y ánimo para superar los obstáculos y los valles más oscuros.*

*A mi papito amado Romeo, quien, aunque no esté físicamente, tengo la certeza que me acompañó cada madrugada de esfuerzo para completar la carrera y que me acompaña siempre. Nadie ha creído tanto en mí como mi papito amado. Te regalo este esfuerzo.*

*A mi mamita amada Ana, tú me enseña con tu ejemplo, a luchar y nunca rendirme. Te lo dedico por cada mañana atenderme con amor y buscar mi bien, por ser indispensable para terminar este proyecto. Te amo demasiado.*

*A mi amadísima esposita Joseline, vos siempre me apoyas con amor incondicional y atención sin igual. Este triunfo es nuestro, porque, aunque no te necesite, no imagino mi vida sin vos. Te amo, para mí no hay título que supere el de ser tu esposo.*

*A mi amadísima hija Julianita, mi reinecita. Papá te dedica este esfuerzo, pues eres un motorcito que me impulsa a ser mejor cada día. Siempre me llenas de orgullo y ternura. Espero perdones las noches que no estuve ahí terminando este proyecto por vos, mi dulce niña.*

*A mis amados hermanos Max y Alonso, sin su compañía y cuidados, no habría llegado tan lejos. Les dedico este esfuerzo, pues son una promesa en mi vida que nunca estaré solo porque son mis mejores amigos y el apoyo que me brindan es indispensable en mi vida.*

*Quiero dedicar este esfuerzo a mis abuelitos Jorge y Graciela, los amo y aunque están desde otro plano de la existencia, no dudo que acompañaron este esfuerzo, los amo.*

*Finalmente, me quiero dedicar este esfuerzo, por tanto arduo trabajo y sacrificios. Mereces ser feliz, Stanlyn.*



## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a Dios y a la Virgen María, por siempre acompañarme en cada paso de mi vida y darme todas las fuerzas necesarias para no rendirme nunca. Por su amorosa alianza y compañía, sin ustedes no habría podido cumplir ni siquiera el primer paso de esta meta.

Gracias a mis padres Romeo y Ana, los amo profundamente, gracias por levantarme cada mañana, por cada ida y venida a la escuela, por cada “cinquito” para merendar, por cada atención, por cada segundo de sus vidas invertido en mi crianza. Los honro y les regalo este esfuerzo en gratitud, los amo y no puedo haberle pedido a Dios mejorar padres que ustedes.

Gracias a mi esposa Joseline Leitón Flores. Gracias por llegar a mi vida cuando menos lo esperaba, sos promesa de Dios. Te amo y te agradezco que siempre has estado a mi lado apoyándome en todos mis proyectos, por ser sabia consejera en mi vida, por la paciencia y la ternura, por cada cafecito en la madrugada y por tu compañía en mis días oscuros.

Gracias a mi hija Juliana Camila Viana Leitón. Gracias pequeña mía, porque con tu amor y compañía, con tus abrazitos tiernos, me das la inspiración necesaria para ser un mejor hombre cada día. Gracias por enseñarme a vivir mejor, por cada mirada y ocurrencia. Eres una bendición de Dios en mi vida, porque tu llegada solo me dio mucha más fuerzas y motivos para salir adelante. Te amo.

Gracias a mis hermanos Max y Alonso, porque siempre me acompañan en cada paso y aunque hemos pasado por altos y bajos, siempre me brindan amor fraterno, incondicional y que buscan siempre mi bien. Gracias por cada vez que me cuidaron, que me invitaron a comer, gracias por cada sacrificio que hicieron por mis estudios, espero hacerlos sentir orgullosos, los amo.

Quiero agradecer a mis suegras Elizabeth y Anavita, y a Nelson y Nazareth. Gracias por cada consejo, viaje y “gallito”, doy gracias a Dios porque son parte de mi familia y me brindan aliento para ser una mejor persona.

Gracias a mis abuelitos Jorge y Graciela, por cada consejo, abrazo y beso. Los amo demasiado y les agradezco cada “gallito” y consejo que me tiene hoy aquí.

Gracias a mis mejores amigas de la U, Jazmín, Teresita y Andrea. Doy gracias a Dios el momento en el que me retrasé al retirar un par de cursos, pues si no hubiera sido así, no me habría dado cuenta de sus existencias. Gracias por cada risa, por cada “matoneo” por “amansar” mis locuras, las amo. Siempre podrán contar con el viejo tío Stan.

Quiero agradecer especialmente a mi directora Alejandra Baldi. Gracias por ir más allá de ser solo una directora, gracias por involucrarse y sufrir y alegrarse conmigo en cada etapa del proyecto, gracias por los sabios consejos, por las porras, por creer en mí y atesorar mi trabajo con tanta autenticidad.

Quiero agradecer especialmente a mi asesor Benito Stradi. Gracias por ser como un “papá”, que de hecho, me recordaba el mío, pues mi viejo se cargaba un carácter y sabiduría similar. Gracias por sus prácticos consejos, por cerrar el “chinamo” tarde, por enrollarse las mangas e involucrarse tanto. Gracias por creer en mí.

Quiero agradecer a mi asesora Ellen Rodríguez, por facilitarme un espacio en el laboratorio y poner todas las cosas a su disposición de la forma más ágil posible para que pudiera finalizar este proyecto. Muchas gracias por el apoyo.

Quiero agradecer al personal de mantenimiento técnico del LanammeUCR, especialmente a Eduard y a Jeremy, sin sus esfuerzos, trabajos y consejos, este proyecto no habría llegado a ser lo que es. Son personas increíbles y de gran conocimiento, fue un orgullo y un honor trabajar con ustedes.

Quiero agradecer a Paula Calderón por su profesionalismo y valiosísima ayuda en el proyecto. La admiro mucho y fue un honor contar con su cooperación en este proyecto. La universidad sería mucho mejor con más profesionales como usted.

Quiero agradecer a Renato Murillo por su profesionalismo y valiosa ayuda. Gracias por ser un docente de puertas abiertas y atento a las dudas de los estudiantes, pese a lo ajetreado de su agenda. El país necesita más profesionales como usted.

Quiero agradecer a Cindy Zúñiga por su profesionalismo y paciencia al ayudarme con mi proyecto. Gracias por los consejos, sus esfuerzos y sus enseñanzas.

Quiero agradecer especialmente a Carlos Arias, un profesor a quien le tomé alta estima. Gracias por brindarme trabajo como asistente desde el 2018 y confiar en mi labor. Gracias por ser un profesor de puertas abiertas, gracias por demostrarme que en este mundo existen personas con las que puedes no estar de acuerdo, conversarlo y aun así, fuera del contexto de desacuerdo, seguir tan dispuesto a colaborar. Gracias por ayudarme con mis problemas “porcinos” y por las haladas de orejas.

Quiero agradecer especialmente a Laura Vega por su colaboración en mi primer trabajo y por escuchar con tanta autenticidad mis luchas para completar este proyecto. Gracias por contribuir de forma tan importante a mi desarrollo profesional.

Quiero agradecer muy especialmente a mis exprofesores José Rafael Arquín y Grettel Rojas, ustedes me inspiran siempre a que se puede ser mejor, a que siempre se puede hacer lo correcto y a que el esfuerzo tiene su recompensa.

Quiero agradecer a mis amigas de colegio Mariana y Raquel, que, aunque de largo y de vez en cuando, pérdidas, siempre han creído en lo que soy capaz de dar.

También agradezco a mi amigo Daniel, que, aunque no esté más, siempre estuvo cuando más lo necesite para escucharme, hacerme reír y saber acompañarme.







## RESUMEN

Para el desarrollo de la cámara para la oxidación de los asfaltos por meteorización (conocida a partir de ahora como Equipo para el Envejecimiento por Meteorización Acelerada, EEMA) con base en la norma ASTM D4799 y factores climáticos costarricenses, se empleó como base para modificar, un horno convectivo del LanammeUCR de la Universidad de Costa Rica, Sede Rodrigo Facio, San Pedro Montes de Oca, San José.

El desarrollo del EEMA se ejecutó en tres etapas: diseño, construcción y evaluación del funcionamiento mediante un experimento con muestras asfálticas reales.

La etapa de diseño consistió en la investigación de datos de temperatura, días con lluvia, volumen de precipitaciones, radiación solar y temperaturas máximas de los pavimentos asfálticos en servicio para las 16 regiones costarricenses con climas distintos, según el índice de humedad (IH). Con base en ello, se compararon dispositivos de aspersión y radiación UV de la oferta comercial mediante cálculos de capacidad, compatibilidad de instalación en el horno convectivo base y el presupuesto del proyecto.

Como resultado de la etapa de diseño se obtuvieron los planos constructivos del EEMA y los parámetros teóricos de tiempos requeridos de aspersión y radiación UV para simular de forma acelerada la variabilidad climática costarricense mediante 10 ciclos de ensayo propuestos.

La etapa de construcción se ejecutó en el taller de mantenimiento del LanammeUCR mediante trabajo asistencial para las instalaciones eléctricas, e independiente para el montaje del sistema de aspersión.

Como resultado, se completó la construcción del EEMA y, mediante una comprobación térmica y la evaluación del sistema de aspersión, se determinó la operabilidad capaz y segura del EEMA. Adicionalmente, a través de las pruebas de funcionamiento del EEMA, se recalcularon los parámetros de los ciclos de ensayo propuestos.

La etapa de la evaluación del efecto de envejecimiento sobre muestras asfálticas en el EEMA se realizó al someter seis muestras de asfalto 0925-14 al ciclo B (que equipara el clima del Valle Central) para tiempos equivalentes de tres, seis y doce meses. Adicionalmente, se aplicaron las técnicas de análisis cuantitativo EDX, FT-IR y de temperatura de entrecruzamiento (CXT) a las muestras originales y envejecidas, y las técnicas de análisis cualitativo SEM, RMN-H, RMN-C<sup>13</sup> y la inspección visual.

Seguidamente, se compararon las mediciones de FT-IR y CXT de las muestras del EEMA con muestras de asfalto del mismo tipo envejecido a la intemperie durante tres, seis y doce meses por Baldi *et al.* (2017) de las que se concluye que el EEMA es capaz de equiparar el envejecimiento a la intemperie para los índices de carbonilo e hidroxilo. De las imágenes SEM se propuso que el mecanismo físico de envejecimiento es desplazamiento y acumulación de asfalto envejecido. Del proceso evaluativo se recomendó emplear muestras de menor espesor para evitar mezclas con asfalto sin envejecer que puedan sesgar los resultados.

Finalmente, se logró el desarrollo del EEMA con base en factores climáticos costarricenses y la norma ASTM D4799 con una eficacia de simulación parcial para el clima del Valle Central y con puntos de mejora que permiten explorar mejor los alcances que el EEMA puede tener en la simulación de la intemperie.





# ÍNDICE DE CONTENIDOS

## Capítulo 1

|  |    |
|--|----|
| <b>1.1. MARCO TEÓRICO</b> .....  | 1  |
| <b>1.1.1. Clasificación de las zonas climáticas costarricenses</b> .....                       | 1  |
| a. Clasificación meteorológica neta .....  | 1  |
| b. Clasificación meteorológica para gestión vial.....  | 2  |
| c. Clasificación por temperatura del asfalto y grado de desempeño .....                        | 3  |
| d. Datos meteorológicos de la regionalización climática costarricense .....                    | 4  |
| <b>1.1.2. El fenómeno de envejecimiento de asfaltos: fundamentos teóricos y de diseño</b> .... | 5  |
| a. El envejecimiento de los asfaltos .....   | 6  |
| b. Fundamentos de diseño de una cámara de envejecimiento por meteorización                     | 7  |
| <b>1.1.3. Ensayos de envejecimiento por meteorización</b> .....                                | 9  |
| a. Ensayos con base en la norma ASTM D4799 .....   | 9  |
| b. Ensayos de meteorización a escala real.....   | 10 |
| <b>1.2. METODOLOGÍA</b> .....  | 13 |
| <b>1.2.1. Recopilación y tratamiento de los datos meteorológicos</b> .....                     | 13 |
| a. Temperatura mínima .....  | 15 |
| b. Precipitaciones.....  | 18 |
| c. Radiación solar acumulada .....   | 19 |
| d. Temperatura máxima .....  | 21 |
| <b>1.2.2. Escalamiento de la radiación solar</b> .....   | 21 |
| a. Obtención del flux de fotones y la irradiancia espectral .....                              | 22 |
| b. Obtención de los valores de radiación por escalar .....                                     | 23 |
| c. Escogencia de bombillos UV para el escalamiento.....  | 24 |
| <b>1.2.3. Escalamiento de las precipitaciones</b> .....  | 26 |
| a. Obtención de los valores de precipitaciones por escalar .....                               | 26 |
| b. Escalamiento geométrico .....   | 27 |
| c. Escogencia de la bomba para el sistema de aspersion .....                                   | 28 |
| <b>1.2.4. Diseño del EEMA</b> .....  | 32 |
| a. Generalidades del sistema de radiación .....  | 33 |

|  |           |
|--|-----------|
| b. Generalidades del sistema de aspersión .....                          | 34        |
| c. Generalidades del sistema de temperatura .....                        | 35        |
| <b>1.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>                                  | <b>37</b> |
| <b>1.3.1. Suposiciones del diseño.....</b>                               | <b>37</b> |
| <b>1.3.2. Tratamiento estadístico de la temperatura mínima .....</b>     | <b>38</b> |
| <b>1.3.3. Temperatura máxima.....</b>                                    | <b>41</b> |
| <b>1.3.4. Escalamiento de la radiación .....</b>                         | <b>42</b> |
| a. Sobre el IRS propuesto .....  | 43        |
| b. El acumulado de radiación solar .....                                 | 43        |
| c. Sobre el estudio técnico de la oferta comercial de bombillos UV ..... | 45        |
| d. Resultados del escalamiento .....                                     | 50        |
| <b>1.3.5. Escalamiento de precipitaciones.....</b>                       | <b>50</b> |
| a. Sobre el diseño del sistema de aspersión .....                        | 52        |
| b. Simulación de capacidad de aspersión .....                            | 53        |
| c. Resultados del escalamiento de precipitaciones .....                  | 56        |
| <b>1.3.7. Diseño del EEMA.....</b>                                       | <b>57</b> |
| a. Definición de ciclos de ensayo y detalles de diseño.....              | 57        |
| b. Diseño del programa del EEMA .....                                    | 60        |
| <b>1.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>                          | <b>63</b> |
| <b>1.5. NOMENCLATURA .....</b>   | <b>67</b> |
| <b>1.6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>   | <b>73</b> |
| <b>1.7. APÉNDICES .....</b>  | <b>77</b> |
| <b>Apéndice A: Datos meteorológicos recopilados .....</b>                | <b>77</b> |
| <b>Apéndice B: Resultados intermedios.....</b>                           | <b>86</b> |

## Capítulo 2

|   |     |
|---|-----|
| <b>2.1. MARCO TEÓRICO</b> .....   | 100 |
| <b>2.1.1. Equipos tradicionales para el envejecimiento de los asfaltos</b> .....        | 100 |
| a. Norma ASTM D2872-04 (sobre el RTFO) .....  | 100 |
| b. Norma ASTM D6521-19a (sobre el PAV) .....  | 101 |
| <b>2.1.2. Equipos de envejecimiento de los asfaltos por meteorización</b> .....         | 102 |
| a. <i>Accelerated Weathering Machine</i> (AWM) .....                                    | 102 |
| b. <i>Heavy Vehicle Simulator</i> (HVS).....  | 104 |
| c. <i>QUV accelerated weathering tester</i> .....                                       | 104 |
| <b>2.1.3. Normas y guías para los equipos de envejecimiento por meteorización</b> ..... | 105 |
| <b>2.1.4. Análisis del Modo de Fallos y Efectos en Diseños (DFMEA)</b> .....            | 107 |
| <b>2.1.5. Señalamiento de seguridad</b> .....   | 109 |
| <b>2.1.5. Conceptos metrológicos en equipos</b> .....                                   | 110 |
| a. Comprobación .....   | 110 |
| b. Homogeneidad .....   | 111 |
| c. Estabilidad .....  | 111 |
| d. Fluctuación.....   | 111 |
| e. Tiempo de estabilización.....  | 111 |
| <b>2.1.6. Generalidades de la programación de PLC</b> .....                             | 112 |
| a. Esquema de contactos (KOP).....  | 112 |
| b. Diagrama de funciones (FUP) .....  | 112 |
| c. Función personalizada (UDF) .....  | 112 |
| <b>2.2. METODOLOGÍA</b> .....   | 114 |
| <b>2.2.1. Proceso financiero</b> .....  | 114 |
| <b>2.2.2. Proceso técnico</b> .....   | 116 |
| <b>2.2.3. Comprobación térmica</b> .....  | 118 |
| <b>2.2.4. Programación del PLC LOGO! 230 RCE</b> .....                                  | 120 |
| <b>2.2.5. DFMEA del EEMA</b> .....  | 121 |
| <b>2.2.6. Ajustes en parámetros de ensayo</b> .....                                     | 123 |

|  |            |
|--|------------|
| <b>2.2.7. Manual de equipo EEMA.....</b>                               | <b>124</b> |
| <b>2.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>                                | <b>126</b> |
| <b>2.3.1. Costos finales para la elaboración del EEMA.....</b>         | <b>126</b> |
| <b>2.3.2. Proceso técnico-constructivo del EEMA.....</b>               | <b>127</b> |
| <b>a. Construcción del sistema de aspersión.....</b>                   | <b>127</b> |
| <b>b. Ensamblaje e instalación del sistema de radiación.....</b>       | <b>130</b> |
| <b>c. Sistema de alimentación complementaria.....</b>                  | <b>132</b> |
| <b>d. Ensamblajes de protección eléctrica.....</b>                     | <b>132</b> |
| <b>2.3.3. Análisis a la comprobación térmica del EEMA.....</b>         | <b>134</b> |
| <b>2.3.4. Programa para ejecución automática del EEMA.....</b>         | <b>140</b> |
| <b>2.3.5. Análisis del DFMEA del EEMA.....</b>                         | <b>146</b> |
| <b>2.3.6. Ajustes en los sistemas de radiación y aspersión.....</b>    | <b>148</b> |
| <b>a. Ajustes al sistema de radiación.....</b>                         | <b>148</b> |
| <b>b. Ajustes al sistema de aspersión.....</b>                         | <b>151</b> |
| <b>2.3.7. Alcances operacionales del EEMA.....</b>                     | <b>153</b> |
| <b>2.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>                        | <b>155</b> |
| <b>2.5. NOMENCLATURA.....</b>  | <b>157</b> |
| <b>2.6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>  | <b>159</b> |
| <b>2.7. APÉNDICES.....</b>   | <b>161</b> |
| <b>Apéndice C: Presupuesto para la construcción del EEMA.....</b>      | <b>161</b> |
| <b>Apéndice D: Datos de comprobación térmica.....</b>                  | <b>164</b> |
| <b>Apéndice E: Resultados de simulación en LOGO! Soft Comfort.....</b> | <b>167</b> |

## Capítulo 3

|   |     |
|---|-----|
| <b>3.1. MARCO TEÓRICO</b> .....   | 174 |
| <b>3.1.1. Composición química del asfalto</b> .....                             | 174 |
| <b>3.1.2. Indicadores químicos de envejecimiento en asfaltos</b> .....          | 176 |
| <b>3.1.3. Indicadores físicos de envejecimiento en asfaltos</b> .....           | 176 |
| <b>3.1.4. Técnicas para el estudio del envejecimiento de los asfaltos</b> ..... | 178 |
| a. FT-IR .....  | 178 |
| b. DSR .....  | 179 |
| c. EDX y SEM .....  | 180 |
| d. RMN-C <sup>13</sup> y RMN-H .....  | 182 |
| <b>3.2. METODOLOGÍA</b> .....   | 184 |
| <b>3.2.1. Rutas experimentales para evaluar el desempeño del EEMA</b> .....     | 184 |
| <b>3.2.2. Características del asfalto 0925-14</b> .....                         | 185 |
| <b>3.2.3. Preparación de muestras</b> .....                                     | 185 |
| <b>3.2.4. Ejecución del Ciclo B del EEMA</b> .....                              | 187 |
| <b>3.2.5. Análisis cuantitativo de muestras envejecidas</b> .....               | 188 |
| <b>3.2.6. Medición y tratamiento de datos EDX</b> .....                         | 188 |
| <b>3.2.7. Medición de espectros FT-IR</b> .....                                 | 190 |
| a. Fase de preparación del espectroscopio infrarrojo .....                      | 190 |
| b. Fase de muestreo y medición en el espectroscopio infrarrojo .....            | 190 |
| c. Fase de limpieza del espectroscopio infrarrojo .....                         | 192 |
| <b>3.2.8. Medición y tratamiento de datos FT-IR</b> .....                       | 192 |
| <b>3.2.9. Muestreo y parámetros para mediciones CXT</b> .....                   | 195 |
| <b>3.2.10. Tratamiento de datos CXT</b> .....                                   | 196 |
| <b>3.2.11. Análisis cualitativo de muestras envejecidas</b> .....               | 196 |
| <b>3.2.12. Muestreo y análisis de mediciones RMN</b> .....                      | 196 |
| <b>3.2.13. Muestreo y análisis de mediciones SEM</b> .....                      | 198 |
| <b>3.2.14. Inspección visual de muestras envejecidas</b> .....                  | 198 |



|   |     |
|---|-----|
| <b>3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....                                  | 200 |
| <b>3.3.1. Evaluación visual de muestras envejecidas</b> .....             | 200 |
| <b>3.3.2. Análisis SEM de muestras envejecidas en el EEMA</b> .....       | 202 |
| <b>3.3.3. Análisis de espectros RMN</b> .....                             | 204 |
| <b>a. Análisis de espectros RMN-H</b> .....                               | 204 |
| <b>b. Análisis de espectros RMN-C<sup>13</sup></b> .....                  | 206 |
| <b>3.3.4. Análisis de datos EDX</b> .....                                 | 207 |
| <b>3.3.5. Análisis de datos FT-IR</b> .....                               | 209 |
| <b>a. Análisis del índice de carbonilo</b> .....                          | 211 |
| <b>b. Análisis del índice de hidroxilo</b> .....                          | 214 |
| <b>c. Análisis del índice de insaturaciones</b> .....                     | 217 |
| <b>d. Análisis del índice de sulfóxido</b> .....                          | 220 |
| <b>3.3.6. Análisis de datos CXT</b> .....                                 | 223 |
| <b>3.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....                          | 228 |
| <b>3.5. NOMENCLATURA</b> .....  | 230 |
| <b>3.6. BIBLIOGRAFÍA</b> .....  | 234 |
| <b>3.7. APÉNDICES</b> .....   | 238 |
| <b>Apéndice F: Datos experimentales de evaluación del EEMA</b> .....      | 238 |
| <b>Apéndice G: Resultados intermedios de la evaluación del EEMA</b> ..... | 247 |
| <b>ANEXOS DE LOS CAPÍTULOS</b> .....                                      | 253 |
| <b>X. ANEXOS DEL CAPÍTULO 1</b> .....                                     | 253 |
| <b>Y. ANEXOS DEL CAPÍTULO 2</b> .....                                     | 261 |

# ÍNDICE DE CUADROS

## Cuadros del Capítulo 1

|  |    |
|--|----|
| <b>Cuadro 1.1.</b> Datos de temperaturas máximas de asfaltos y grados de desempeño para la clasificación meteorológica por temperatura máxima y grado de desempeño.....  | 4  |
| <b>Cuadro 1.2.</b> Datos meteorológicos de temperatura media anual, total de precipitación anual, radiación solar directa acumulada anual (RSDA), días con lluvia anuales (DLA), índice de humedad (IH) y áreas de las regiones según la clasificación meteorológica para la gestión vial..... | 5  |
| <b>Cuadro 1.3.</b> Ciclos de ensayo para el envejecimiento acelerado del asfalto por medio de meteorización según la norma ASTM D4799.....   | 10 |
| <b>Cuadro 1.4.</b> Rangos de clasificación cualitativa para zonas climáticas con base en el índice de humedad.....   | 19 |
| <b>Cuadro 1.5.</b> Rangos de clasificación cualitativa para zonas de la CMGV según el índice de radiación solar.....   | 21 |
| <b>Cuadro 1.6.</b> Valores de irradiancia por escalar según cada categoría del IRS aplicado a cada una de las regiones según la CMGV.....  | 24 |
| <b>Cuadro 1.7.</b> Criterios: económico (CE), técnico (CT), de disponibilidad (CD), de capacidad (CC) y geométrico (CG) aplicados a los modelos de bombillos UV preseleccionados.....  | 25 |
| <b>Cuadro 1.8.</b> Valores de precipitaciones totales anuales por escalar, según cada categoría del IH aplicado a cada una de las regiones según la CMGV. ....   | 27 |
| <b>Cuadro 1.9.</b> Especificaciones y supuesto considerados en el estudio técnico de los bombillos UV: Philips TL 20 W/01 RS SLV/25, OSRAM HNS 15 W G13 y UV disinfection Lamp, para el cálculo de la irradiancia y la irradiancia espectral.....  | 45 |
| <b>Cuadro 1.10.</b> Valores de irradiancia e irradiancia espectral a un radio de 46.5 cm calculados con base en los rangos de longitud de onda y potencias nominales.....  | 49 |
| <b>Cuadro 1.11.</b> Tiempos de exposición requeridos para alcanzar el acumulado de radiación UV anual mediante la emisión de tres bombillos OSRAM HNS 15 W G13. ....   | 50 |
| <b>Cuadro 1.12.</b> Detalle de las especificaciones técnicas de los componentes de diseño del sistema de aspersión del EEMA. ....  | 53 |
| <b>Cuadro 1.13.</b> Valores de presión en los nodos del sistema de aspersión obtenidos mediante el simulador de EPANET.....  | 56 |
| <b>Cuadro 1.14.</b> Tiempos de funcionamiento del sistema de aspersión requeridos para alcanzar el acumulado anual de precipitaciones por región. ....   | 57 |
| <b>Cuadro 1.15.</b> Notación de las siglas del tipo de ciclo según radiación, precipitaciones y temperatura. ....  | 58 |
| <b>Cuadro 1.16.</b> Notación y asociación de los ciclos de ensayos de envejecimiento acelerado por meteorización con base en factores meteorológicos costarricenses. ....  | 58 |
| <b>Cuadro 1.17.</b> Ciclos de ensayos de envejecimiento acelerado por meteorización con base en factores meteorológicos costarricenses escalados a un año de exposición a la intemperie. ....  | 59 |
| <b>Cuadro 1.18.</b> Asociación entre las entradas y salidas del PLC LOGO! 230 RCE y las señales de diseño del EEMA. ....   | 60 |

## Cuadros de apéndices del Capítulo 1

|   |    |
|---|----|
| <b>Cuadro A.1.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Valle Central (VC).....                           | 77 |
| <b>Cuadro A.2.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones (PM), humedad relativa (HR), días de precipitaciones (DMP), temperaturas (TMM) y radiación solar (RSM) en las estaciones climáticas de la región Caribe (C). ....      | 78 |
| <b>Cuadro A.3.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Caribe Alta (CA).....                             | 78 |
| <b>Cuadro A.4.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Caribe Sur (CS).....                              | 79 |
| <b>Cuadro A.5.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Cordillera de Guanacaste y Tilarán (CGT). ....    | 79 |
| <b>Cuadro A.6.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Golfo de Nicoya y Llanura Guanacasteca (GNG)..... | 80 |
| <b>Cuadro A.7.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Los Santos (LS).....                              | 80 |
| <b>Cuadro A.8.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Norte (N). ....                                   | 81 |
| <b>Cuadro A.9.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Norte Alta (NA). ....                             | 81 |
| <b>Cuadro A.10.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Pacífico Central (PC). ....                      | 82 |
| <b>Cuadro A.11.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Pacífico Sur (PS). ....                          | 82 |
| <b>Cuadro A.12.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Península de Nicoya (PN). ....                   | 83 |
| <b>Cuadro A.13.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Talamanca (T). ....                              | 83 |
| <b>Cuadro A.14.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Upala y Los Chiles (UC). ....                    | 84 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Cuadro A.15.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Valle del General (VG).....             | 84 |
| <b>Cuadro A.16.</b> Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Volcánica Central Pacífico (VCP). ..... | 85 |
| <b>Cuadro B.1.</b> Valores del índice de radiación para cada una de las 16 regiones de la CMGV y su clasificación según el nivel de radiación.....   | 86 |
| <b>Cuadro B.2.</b> Valores del índice de humedad para cada una de las 16 regiones de la CMGV y su clasificación según el nivel de humedad.....   | 86 |
| <b>Cuadro B.3.</b> Resultado del método de comparaciones múltiples (Ecuación 1.9) para clasificar las regiones de la CMGV según la temperatura mínima. ....  | 87 |
| <b>Cuadro B.4.</b> Clasificación por temperatura mínima generada con base en el método de comparaciones múltiples aplicado a las regiones de la CMGV. ....   | 91 |
| <b>Cuadro B.5.</b> Valores de energía y flux de fotones, irradiancia e irradiancia espectral para cada longitud de onda de emisión de los bombillos OSRAM HNS 15 W, según la metodología del apartado 1.2.2.a.....                             | 92 |
| <b>Cuadro B.6.</b> Valores de energía y flux de fotones, irradiancia e irradiancia espectral para cada longitud de onda de emisión de los bombillos Phillips TL 20W/01 RS SLV/25, según la metodología del apartado 1.2.2.a. ....              | 95 |
| <b>Cuadro B.7.</b> Valores de energía y flux de fotones, irradiancia e irradiancia espectral para cada longitud de onda de emisión de los bombillos UVC desinfection lamp, según la metodología del apartado 1.2.2.a. ....                     | 96 |

## Cuadros del Capítulo 2

|   |     |
|---|-----|
| <b>Cuadro 2.1.</b> Normas y guías principales para el diseño y construcción de equipos para envejecimiento acelerado y la evaluación de su desempeño.....   | 106 |
| <b>Cuadro 2.2.</b> Lista de materiales, proveedores posibles y cantidades aproximadas requeridas para la construcción del EEMA.....   | 114 |
| <b>Cuadro 2.3.</b> Herramientas, aditivos y componentes adicionales empleados en la construcción del EEMA según la asesoría del personal técnico-industrial del LanammeUCR. ....  | 117 |
| <b>Cuadro 2.4.</b> Escala de severidad para la evaluación de los componentes del EEMA.....  | 122 |
| <b>Cuadro 2.5.</b> Escala de ocurrencia para la evaluación de los componentes del EEMA.....   | 122 |
| <b>Cuadro 2.6.</b> Escala de detección para la evaluación de los componentes del EEMA.....  | 123 |
| <b>Cuadro 2.7.</b> Tiempos de exposición corregidos para alcanzar el acumulado de radiación UV anual para las regiones de baja, media y alta irradiancias, mediante la emisión de tres bombillos OSRAM HNS 15 W G13. .... | 151 |
| <b>Cuadro 2.8.</b> Tiempos de llenado por portamuestra obtenidos durante la prueba de aspersion. ....   | 152 |
| <b>Cuadro 2.9.</b> Tiempos de funcionamiento del sistema de aspersion corregidos para alcanzar el acumulado anual de precipitaciones por región. ....   | 152 |
| <b>Cuadro 2.10.</b> Ciclos de ensayos corregidos para el envejecimiento acelerado con base en factores meteorológicos costarricenses escalados a un año de exposición a la intemperie. ....                               | 153 |

## Cuadros de apéndices del Capítulo 2

|  |     |
|--|-----|
| <b>Cuadro C.1.</b> Desglose de los costos en materiales para la construcción del EEMA. ....  | 161 |
| <b>Cuadro D. 1.</b> Datos de temperatura para la comprobación térmica del EEMA en el volumen de trabajo definido en la Figura 2.10. ....                           | 164 |
| <b>Cuadro E.1.</b> Resultados booleanos de simulación en LOGO! Soft Comfort de las funciones lógicas implementadas en el programa de automatización del EEMA. .... | 167 |
| <b>Cuadro E.2.</b> Descripción de las figuras de la simulación del programa del EEMA. ....   | 167 |

## Cuadros del Capítulo 3

|   |     |
|---|-----|
| <b>Cuadro 3. 1.</b> Propiedades físicas del asfalto 0925-14. ....   | 185 |
| <b>Cuadro 3. 2.</b> Orden de mediciones de los espectros FT-IR para las muestras asfálticas tipo 0925-14 envejecidas en el EEMA. .... | 192 |
| <b>Cuadro 3. 3.</b> Longitudes de onda de interés en el estudio de muestras asfálticas envejecidas. ....                              | 193 |
| <b>Cuadro 3. 4.</b> Parámetros del DSR para la medición de la CXT en muestras asfálticas. ....  | 195 |
| <b>Cuadro 3. 5.</b> Señales RMN de grupos orgánicos insaturados de interés. ....  | 198 |

## Cuadros de apéndices del Capítulo 3

|  |     |
|--|-----|
| <b>Cuadro F. 1.</b> Datos de composición elemental de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA obtenidos mediante EDX. ....                            | 238 |
| <b>Cuadro F. 2.</b> Datos reológicos experimentales del DSR para la temperatura de CXT del asfalto 0925-14 original previo al envejecimiento en el EEMA. ....    | 238 |
| <b>Cuadro F. 3.</b> Datos reológicos experimentales del DSR para la temperatura de CXT del asfalto 0925-14 envejecido en el EEMA a tres meses equivalentes. .... | 238 |
| <b>Cuadro F. 4.</b> Datos reológicos experimentales del DSR para la temperatura de CXT del asfalto 0925-14 envejecido en el EEMA a seis meses equivalentes. .... | 239 |
| <b>Cuadro F. 5.</b> Datos reológicos experimentales del DSR para la temperatura de CXT del asfalto 0925-14 envejecido en el EEMA a doce meses equivalentes. .... | 239 |
| <b>Cuadro F. 6.</b> Áreas de picos según la longitud de onda de los espectros IR de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA (Parte 1). ....           | 239 |
| <b>Cuadro F. 7.</b> Áreas de picos según la longitud de onda de los espectros IR de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA (Parte 2). ....           | 240 |
| <b>Cuadro F. 8.</b> Áreas de picos según la longitud de onda de los espectros IR de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a la intemperie (Parte 1). ....      | 241 |
| <b>Cuadro F. 9.</b> Áreas de picos según la longitud de onda de los espectros IR de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a la intemperie (Parte 2). ....      | 242 |
| <b>Cuadro G. 1.</b> Datos de composición elemental promedio de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA obtenidos mediante EDX. ....                   | 247 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Cuadro G. 2.</b> Valor de CXT interpolado de los datos reológicos del DSR para las muestras asfálticas 0925-14 previo al envejecimiento en el EEMA.....               | 247 |
| <b>Cuadro G. 3.</b> Valor de CXT interpolado de los datos reológicos del DSR para las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a tres meses equivalentes en el EEMA.....  | 247 |
| <b>Cuadro G. 4.</b> Valor de CXT interpolado de los datos reológicos del DSR para las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a seis meses equivalentes en el EEMA. .... | 248 |
| <b>Cuadro G. 5.</b> Valor de CXT interpolado de los datos reológicos del DSR para las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a doce meses equivalentes en el EEMA.....  | 248 |
| <b>Cuadro G. 6.</b> Índices de envejecimiento de muestras asfálticas 0925-14 del EEMA.....   | 248 |
| <b>Cuadro G. 7.</b> Índices de envejecimiento de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a la intemperie. ....   | 249 |
| <b>Cuadro G. 8.</b> Resultado del estadístico Tukey en la comparación de índices de carbonilo EEMA-Intemperie. ....  | 250 |
| <b>Cuadro G. 9.</b> Resultado del estadístico Tukey en la comparación de índices de hidroxilo EEMA-Intemperie. ....  | 251 |
| <b>Cuadro G. 10.</b> Resultado del estadístico Tukey en la comparación de índices de insaturaciones EEMA-Intemperie.....   | 251 |
| <b>Cuadro G. 11.</b> Resultado del estadístico Tukey en la comparación de índices de sulfóxido EEMA-Intemperie. ....   | 252 |

### **Cuadros de los Anexos**

|  |     |
|--|-----|
| <b>Cuadro X.1.</b> Descripción de las figuras que contienen las láminas del plano del EEMA. .... | 253 |
| <b>Cuadro Y.1.</b> Descripción global del Manual del EEMA. ....                                  | 261 |

# ÍNDICE DE FIGURAS

## Figuras del Capítulo 1

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.1.</b> Mapa de la regionalización del territorio costarricense, según la clasificación meteorológica para la gestión vial.....   | 2  |
| <b>Figura 1.2.</b> Mapa de la regionalización del territorio costarricense, según la clasificación meteorológica por temperatura máxima del grado de desempeño. ....   | 4  |
| <b>Figura 1. 3.</b> Esquema sobre los principales mecanismos que conforman el fenómeno de envejecimiento de los asfaltos.....  | 6  |
| <b>Figura 1.4.</b> Equipos para ensayos de envejecimiento acelerado por meteorización: a la izquierda una cámara hecha con base en la norma ASTM D4799; a la derecha el simulador de vehículos pesados (HVS). .... | 11 |
| <b>Figura 1.5.</b> Mapa de datos climáticos de Costa Rica con la distribución de las estaciones climáticas. ....   | 13 |
| <b>Figura 1.6.</b> Muestra de los mapas de radiación solar diaria promedio mensual. En este caso se expone para los meses de marzo y abril en Costa Rica. ....   | 14 |
| <b>Figura 1.7.</b> Tendencia anual de los valores de temperatura mínima promedio para cada una de las regiones de la CMGV con base en los registros del IMN para el periodo del año 2000 al 2018.....              | 15 |
| <b>Figura 1.8.</b> Resultado de la prueba de normalidad sobre los datos de temperatura mínima por regiones de la CMGV mediante el software Minitab® 18. ....   | 16 |
| <b>Figura 1.9.</b> Resultado de la prueba de independencia sobre los datos de temperatura mínima por regiones de la CMGV mediante el software Microsoft Excel®. ....   | 17 |
| <b>Figura 1.10.</b> Histograma de los datos de temperatura mínima por regiones de la CMGV elaborado mediante el software Minitab® 18.....  | 17 |
| <b>Figura 1.11.</b> Tendencia anual de los valores de precipitaciones para cada una de las regiones de la CMGV con base en los registros del IMN para el periodo del año 2000 al 2018.....                         | 18 |
| <b>Figura 1.12.</b> Tendencia anual de los valores de radiación solar mensual acumulada para cada una de las regiones de la CMGV con base en los estudios de Wright para el año 2008. ....                         | 20 |
| <b>Figura 1.13.</b> Horno convectivo sobre el que se realizó el montaje del EEMA. ....   | 25 |
| <b>Figura 1.14.</b> Detalle del porta muestras para los ensayos de envejecimiento de los asfaltos en el EEMA. ....   | 27 |
| <b>Figura 1.15.</b> Modelos de bombas preseleccionadas para el sistema de aspersión: a) Maute® WP120/2B612; b) FORAS® PM60, y c) Toolcraft® TC26666.....   | 30 |
| <b>Figura 1.16.</b> Ventana para configurar la curva característica de bombeo en el software EPANET. ....  | 31 |
| <b>Figura 1.17.</b> PLC Siemens LOGO! 230 RCE. ....  | 33 |
| <b>Figura 1.18.</b> Resultado de la Prueba de la Mediana de Mood brindado por el programa Minitab® 18 para la temperatura mínima promedio de cada mes de cada región de la CMGV. ....                              | 39 |
| <b>Figura 1.19.</b> Zonificación de Costa Rica según las temperaturas mínimas estadísticamente distintas. ....   | 41 |
| <b>Figura 1.20.</b> Modelos de bombillos preseleccionados para el estudio técnico: a) Philips TL 20 W/01 RS SLV/25; b) OSRAM HNS 15 W G13 y c) UV Disinfection Lamp. ....  | 45 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.21.</b> Espectro de irradiancia de la bombilla Q-Lab modelo UVA-340 en nivel típico y amplificado en comparación con el espectro de irradiancia de la luz solar. ....      | 46 |
| <b>Figura 1.22.</b> Espectro de emisión de los bombillos UV empleados en los primeros diseños de un horno UV en el LanammeUCR. ....  | 47 |
| <b>Figura 1.23.</b> Datos técnicos del modelo OSRAM HNS 15 W G13. En la figura se aprecia el rango de longitudes de onda considerado para el sobreestimado en el estudio técnico. .... | 48 |
| <b>Figura 1.24.</b> Sistema de aspersión diseñado para el prototipo EEMA. ....   | 51 |
| <b>Figura 1.25.</b> Planteamiento de la simulación de diseño para el sistema de aspersión del EEMA, elaborado mediante el software EPANET. ....  | 54 |
| <b>Figura 1.26.</b> Curva característica para la bomba Toolcraft® TC26666, según el modelo del software EPANET. ....   | 55 |
| <b>Figura 1.27.</b> Algoritmo de la programación del PLC LOGO! 230 RCE, para la ejecución de ensayos en el EEMA. ....  | 61 |

## Figuras del Capítulo 2

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 2.1.</b> Diagrama del dispositivo RTFO para los ensayos normados por la ASTM D2872-04: a) vista general del equipo; b) receptor de muestras. ....  | 101 |
| <b>Figura 2.2.</b> Diagrama del dispositivo para ensayos PAV: a) vista general; b) enfoque en el horno y recepción de muestras. ....   | 102 |
| <b>Figura 2.3.</b> Detalles constructivos de la AWM: a) Bombillos Ultra Vitalux 300 W OSRAM; b) Acero inoxidable de la carcasa; c) Base de hierro; d) Aspersores. ....   | 103 |
| <b>Figura 2.4.</b> Ejemplos de unidades HVS: a la izquierda la unidad del FDOT y a la derecha la unidad del LanammeUCR. ....   | 104 |
| <b>Figura 2.5.</b> Detalles de diseño de la QUV de Q-Lab. ....   | 105 |
| <b>Figura 2.6.</b> Ejemplo de un DFMEA aplicado al diseño de un vehículo impulsado por esfuerzo humano. ....   | 108 |
| <b>Figura 2.7.</b> Señalización de seguridad en los sitios de trabajo propuesta por el INS. ....   | 109 |
| <b>Figura 2.8.</b> Conceptos metrológicos de estabilidad, homogeneidad, fluctuación y tiempo de estabilización aplicados en tres puntos dentro de un volumen de trabajo para la comprobación térmica de un horno. .... | 111 |
| <b>Figura 2.9.</b> Sistema de radiación diseñado para el prototipo EEMA. ....  | 116 |
| <b>Figura 2.10.</b> Vista superior del volumen de trabajo del EEMA, con sus respectivos puntos de comprobación destacados. ....  | 119 |
| <b>Figura 2.11.</b> Termopares empleados en la comprobación térmica del EEMA. ....   | 120 |
| <b>Figura 2.12.</b> Distribución de los portamuestras en el volumen de trabajo para el ajuste del sistema de aspersión a capacidad real. ....  | 124 |
| <b>Figura 2. 13.</b> Proceso de restauración del tanque de agua para el sistema de aspersión del EEMA. ....  | 128 |
| <b>Figura 2.14.</b> Detalle de la sección del sistema de aspersión en PVC y hierro galvanizado. ....   | 129 |
| <b>Figura 2.15.</b> Detalle de la sección interna del sistema de aspersión. ....   | 130 |
| <b>Figura 2.16.</b> Detalle del sistema de radiación. A la izquierda las bases de contacto para los bombillos UV; al centro el sistema de acople rápido y, a la derecha, los balastos de regulación. ....              | 131 |



|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 2.17.</b> Detalle del sistema de alimentación complementaria: a) regleta para la admisión de los interruptores y los receptores de los bombillos y la bomba; b) interruptores de los bombillos y la bomba, instalados; c) Salida de receptores. ....   | 132 |
| <b>Figura 2.18.</b> Detalle de los ensamblajes diseñados para la prevención del contacto del agua con los circuitos internos del EEMA. ....  | 133 |
| <b>Figura 2.19.</b> Detalle de la protección para los aspersores. ....   | 134 |
| <b>Figura 2.20.</b> Portamuestras de aluminio colocados en la configuración de ensayo. ....  | 134 |
| <b>Figura 2.21.</b> Colocación de los sensores de los termopares en los puntos de comprobación. ....   | 135 |
| <b>Figura 2.22.</b> Curva térmica general de la operación del EEMA para el Ciclo B y cuatro puntos de comprobación. ....   | 136 |
| <b>Figura 2.23.</b> Curva de precalentamiento del EEMA para el Ciclo B y cuatro puntos de comprobación. ....   | 137 |
| <b>Figura 2.24.</b> Gráfico de control de los cuatro puntos de comprobación térmica respecto a la temperatura del subciclo de calor del Ciclo B del EEMA. ....   | 138 |
| <b>Figura 2.25.</b> Curva de ensayo a baja temperatura para cuatro puntos de comprobación del subciclo de precipitación del Ciclo B del EEMA. ....   | 139 |
| <b>Figura 2.26.</b> Bloques lógicos empleados en la programación del PLC LOGO! 230 RCE para la automatización del EEMA: a) Entrada analógica; b) Amplificador analógico; c) Conmutador analógico de valor umbral; d) Retardo a la conexión; e) Retardo a la desconexión; f) Entrada digital; g) Salida/ relé de los bombillos; h) Conector abierto; i) AND; j) NOT. .... | 140 |
| <b>Figura 2.27.</b> Proceso que realiza el amplificador analógico para interpretar la información recibida por un sensor y habilitar una señal comprensible para el PLC. ....  | 141 |
| <b>Figura 2.28.</b> Vista general del código de automatización del Ciclo B del EEMA para ensayos de envejecimiento de asfaltos. ....   | 142 |
| <b>Figura 2.29.</b> Algoritmo de introducción de base para el funcionamiento automático del EEMA. ....   | 143 |
| <b>Figura 2.30.</b> Algoritmo de ejecución para el funcionamiento automático del EEMA. ....  | 144 |
| <b>Figura 2.31.</b> Prioridades de Riesgo (PR) máximas obtenidas a partir del DFMEA del EEMA por componentes. ....   | 146 |
| <b>Figura 2.32.</b> Rotulación de seguridad y uso obligatorio de indumentaria para el uso del EEMA. ....   | 147 |
| <b>Figura 2.33.</b> Configuración de la herramienta UV-C Calculator utilizando el modelo de bombillo Osram HNS 15 W G13. ....  | 148 |
| <b>Figura 2.34.</b> Esfera de irradiancia y análisis gráfico de la intensidad de flujo de potencia aplicado en un par de áreas infinitesimales a distintas distancias del centro luminoso. ....  | 149 |
| <b>Figura 2.35.</b> Posición de las muestras asfálticas respecto a los bombillos UV en el EEMA para aproximar los tiempos de escalamiento propuestos en el Cuadro 1.11. ....   | 150 |

## Figuras de apéndices del Capítulo 2

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura E. 1.</b> Simulación del lazo introductorio de calor ..... | 168 |
| <b>Figura E. 2.</b> Simulación del lazo de radiación .....           | 169 |
| <b>Figura E. 3.</b> Simulación del lazo introductorio frío .....     | 170 |
| <b>Figura E. 4.</b> Simulación del ciclo de precipitación .....      | 171 |
| <b>Figura E. 5.</b> Simulación del lazo de seguridad. ....           | 172 |

## Figuras del Capítulo 3

|   |     |
|---|-----|
| <b>Figura 3. 1.</b> Ejemplos de estructuras moleculares de asfaltenos. ....   | 175 |
| <b>Figura 3. 2.</b> Grupos funcionales relacionados al envejecimiento de asfaltos: a) sulfóxidos; b) carbonilos; c) grupos aromáticos; d) grupos insaturados. ....  | 176 |
| <b>Figura 3. 3.</b> Resultados experimentales de indicadores físicos en asfaltos envejecidos: a) CXT de una muestra de asfalto envejecido a la intemperie; b) Imagen superficial SEM del asfalto original; c) Grado de opacidad; d) Imagen superficial SEM de un asfalto envejecido ..... | 177 |
| <b>Figura 3. 4.</b> Espectros infrarrojos del asfalto 925 original y envejecido a la intemperie a tres, seis y doce meses. ....   | 179 |
| <b>Figura 3. 5.</b> Reómetro de corte dinámico: a) Vista general del equipo; b) Diagrama de los platos paralelos; c) Ejemplo de colocación de una muestra asfáltica. ....   | 180 |
| <b>Figura 3. 6.</b> Proceso de la espectroscopía de energía dispersiva de rayos X: a) Detalle de los saltos de electrones excitados a orbitales energéticos; b) Esquema de procesamiento de la señal de los rayos X para la graficación del espectro elemental. ....                      | 181 |
| <b>Figura 3. 7.</b> Espectros RMN de una muestra de asfalto sometida a diferentes tiempos de inmersión en agua como tratamiento oxidativo acelerado: a) RMN-C; b) RMN-H. ....   | 182 |
| <b>Figura 3. 8.</b> Esquema de análisis para los datos experimentales de muestras envejecidas en el EEMA. ....  | 184 |
| <b>Figura 3. 9.</b> Proceso de preparación de muestras: a) Muestra original; b) Pesaje de muestra vertida; c) Muestras para ensayar. ....   | 187 |
| <b>Figura 3. 10.</b> Distribución y rotulación de muestras asfálticas para el ensayo de envejecimiento en el EEMA .....   | 187 |
| <b>Figura 3. 11.</b> Muestras asfálticas en proceso de envejecimiento en el EEMA: a) Muestras C y F durante el subciclo de radiación, y b) Muestras B, C, E y F durante el subciclo de precipitación. ....  | 188 |
| <b>Figura 3. 12.</b> Microscopio electrónico del CIEMIC. ....   | 189 |
| <b>Figura 3. 13.</b> Muestras preparadas para los análisis EDX y SEM. ....  | 189 |
| <b>Figura 3. 14.</b> Proceso de muestreo: a) Corte de placa de muestra; b) Extracción de la muestra; c) Centrado de la muestra en el cristal; d) Prensado de la muestra para análisis. ....   | 191 |
| <b>Figura 3. 15.</b> Proceso de muestreo de especímenes para RMN: a) Tubo Eppendorf; b) Balanza analítica; c) Colocación del Eppendorf para pesaje; d) Muestras listas para RMN. ....   | 197 |
| <b>Figura 3. 16.</b> Muestras asfálticas posterior a los ensayos en el EEMA: a) Originales; b) Equivalente a tres meses; c) Equivalente a seis meses; d) Equivalente a doce meses. ....   | 200 |
| <b>Figura 3. 17.</b> Imágenes SEM de muestras asfálticas envejecidas en el EEMA, aumentos de 300, 1000 y 5000 de izquierda a derecha: a) Tres meses equivalentes; b) Seis meses equivalentes; c) Un año equivalente. ....   | 202 |
| <b>Figura 3. 18.</b> Proceso físico de envejecimiento del asfalto 0925-14 en el EEMA .....  | 204 |
| <b>Figura 3. 19.</b> Espectros RMN-H de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA. ...   | 205 |
| <b>Figura 3.20.</b> Espectros RMN-C de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA.....  | 206 |
| <b>Figura 3.21.</b> Variación de la composición másica elemental de la superficie de muestras asfálticas 0925-14 contra el tiempo de envejecimiento en el EEMA. ....  | 207 |
| <b>Figura 3.22.</b> Comparación de espectros IR de muestras de asfalto 0925-14 envejecidas a la intemperie y en el EEMA contra el estado original del asfalto. ....   | 210 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura 3.23.</b> Comprobación de los supuestos de independencia, normalidad e igualdad de varianza para los datos de los índices de carbonilo de las muestras asfálticas envejecidas en el EEMA y a la intemperie.....      | 211 |
| <b>Figura 3.24.</b> Resultado del ANOVA aplicado a los índices de carbonilo de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie para tres meses, seis meses y doce meses.....                          | 212 |
| <b>Figura 3.25.</b> Prueba de Tukey para los índices de carbonilo de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie. ....  | 213 |
| <b>Figura 3.26.</b> Comprobación de los supuestos de independencia, normalidad e igualdad de varianza para los datos de los índices de hidroxilo de las muestras asfálticas envejecidas en el EEMA y a la intemperie.....      | 214 |
| <b>Figura 3.27.</b> Resultado del ANOVA aplicado a los índices de hidroxilo de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie para tres meses, seis meses y doce meses.....                          | 215 |
| <b>Figura 3.28.</b> Prueba de Tukey para los índices de hidroxilo de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie. ....  | 216 |
| <b>Figura 3.29.</b> Comprobación de los supuestos de independencia, normalidad e igualdad de varianza para los datos de los índices de insaturaciones de las muestras asfálticas envejecidas en el EEMA y a la intemperie..... | 218 |
| <b>Figura 3.30.</b> Resultado del ANOVA aplicado a los índices de insaturaciones de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie para tres meses, seis meses y doce meses.....                     | 218 |
| <b>Figura 3.31.</b> Prueba de Tukey para los índices de insaturaciones de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie. ....   | 219 |
| <b>Figura 3.32.</b> Comprobación de los supuestos de independencia, normalidad e igualdad de varianza para los datos de los índices de sulfóxido de las muestras asfálticas envejecidas en el EEMA y a la intemperie.....      | 221 |
| <b>Figura 3. 33.</b> Figura 3.30. Resultado del ANOVA aplicado a los índices de sulfóxido de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie para tres meses, seis meses y doce meses.....            | 221 |
| <b>Figura 3.34.</b> Prueba de Tukey para los índices de sulfóxido de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie. ....  | 222 |
| <b>Figura 3.35.</b> Curvas de las componentes elástica y viscosa contra temperatura para muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA.....   | 224 |

### **Figuras de apéndices del Capítulo 3**

|  |     |
|--|-----|
| <b>Figura F. 1.</b> Espectros IR del asfalto 0925-14 original previo al envejecimiento en el EEMA.....     | 243 |
| <b>Figura F. 2.</b> Espectros IR del asfalto 0925-14 envejecido en el EEMA a tres meses equivalentes. .... | 244 |
| <b>Figura F. 3.</b> Espectros IR del asfalto 0925-14 envejecido en el EEMA a seis meses equivalentes. .... | 244 |
| <b>Figura F. 4.</b> Espectros IR del asfalto 0925-14 envejecido en el EEMA a doce meses equivalentes. .... | 245 |
| <b>Figura F. 5.</b> Espectros IR del asfalto 0925-14 envejecido durante tres meses a la intemperie. ....   | 245 |
| <b>Figura F. 6.</b> Espectros IR del asfalto 0925-14 envejecido durante seis meses a la intemperie.....    | 246 |

**Figura F.7.** Espectros IR del asfalto 0925-14 envejecido durante doce meses a la intemperie. .... 246

# CAPÍTULO 1

## Diseño del equipo para el envejecimiento de los asfaltos a partir de factores climáticos costarricenses

### 1.1. MARCO TEÓRICO

Para el diseño de una cámara de envejecimiento de los asfaltos a partir de factores climáticos costarricenses se ejecutó una investigación alrededor de dos ejes temáticos: clasificaciones y mediciones de los climas costarricenses y el fenómeno del envejecimiento de los asfaltos por meteorización. Estas temáticas se trataron en las secciones siguientes.

#### 1.1.1. Clasificación de las zonas climáticas costarricenses

La regionalización climática en Costa Rica se conforma por siete regiones principales y un total de 27 subregiones con características definidas (Solano & Villalobos, 2000). Por otro lado, la regionalización con base en el clima para la gestión vial comprende 16 regiones distintas (Orozco, 2007).

Ambos estudios para el seccionamiento del territorio costarricense son coincidentes en los criterios de temperatura y cantidad de precipitaciones, como los factores determinantes en la regionalización (Orozco, 2007; Solano & Villalobos, 2000).

##### a. Clasificación meteorológica neta

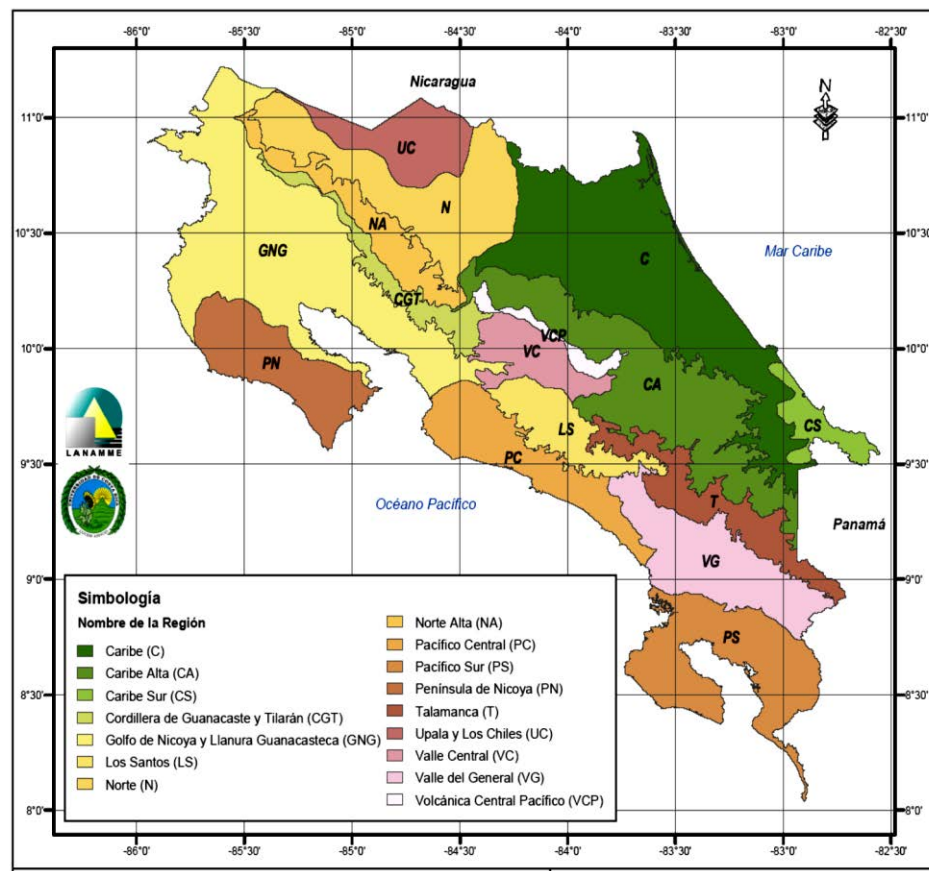
Según Solano & Villalobos (2000), con base en la temperatura media anual (TMA), se determinan las regiones como provincias térmicas, las cuales a su vez se dividen en zonas microtermales (de tierra fría) cuando la TMA es inferior a 10°C; zonas mesotermiales (templadas) cuando la TMA está entre los 10°C y los 22°C, y las zonas megatermales (de tierra caliente) cuando la TMA es superior a los 22°C.

Respecto a la clasificación por precipitaciones, se determinan las regiones como provincias pluviométricas, las cuales se dividen en tres grupos con base en el total de precipitaciones anual (TPA) como zonas moderadamente lluviosas (TPA entre 1000 mm y 2000 mm); zonas

lluviosas con TPA entre 2000 mm y 4000 mm, y zonas excesivamente lluviosas con TPA superiores a 4000 mm (Solano & Villalobos, 2000).

### b. Clasificación meteorológica para gestión vial

Adicionalmente a lo expuesto con antelación, para la regionalización con base en la gestión vial los estudios de Orozco (2007) incluyen aspectos como la densidad de tránsito, el criterio del grado de desempeño, el módulo resiliente, la expansividad de los suelos y un índice de humedad.



**Figura 1.1.** Mapa de la regionalización del territorio costarricense, según la clasificación meteorológica para la gestión vial.

Fuente: (Orozco, 2007).

El criterio del grado de desempeño (PG) corresponde a una prueba de cizalla dinámica a temperatura promedio de servicio de la mezcla asfáltica para determinar la falla por agrietamiento. La temperatura de servicio puede aproximarse a la TMA de una zona climática (RECOPE, 2005).

La relación entre el PG y las condiciones climáticas radica en que un asfalto de un PG definido brinda el rendimiento adecuado solo en las condiciones de servicio para las que fue diseñado, por ello es necesario conocer las condiciones climáticas a las cuales se determinó el PG de un asfalto.

El módulo resiliente consiste en un índice que indica la capacidad de un material para recibir energía sin deformarse permanentemente (Jiménez, 2009). Este valor depende de la humedad del suelo, sin embargo, en la metodología de diseño normalizada se emplea un único valor para este parámetro (AASHTO, 2017) debido a ello, los estudios de Orozco (2007) postulan un índice de humedad con base en las condiciones meteorológicas de una región específica para aproximar el estudio a condiciones reales.

Cabe destacar que la humedad del suelo se considera también para la pérdida de servicio por suelos expansivos. Este indicador considera, además, el tráfico vehicular, sin embargo, en vías de baja densidad vehicular, la contribución por expansividad es mayor por la humedad del suelo, la que a su vez se asocia a la precipitación anual (Orozco, 2007).

### **c. Clasificación por temperatura del asfalto y grado de desempeño**

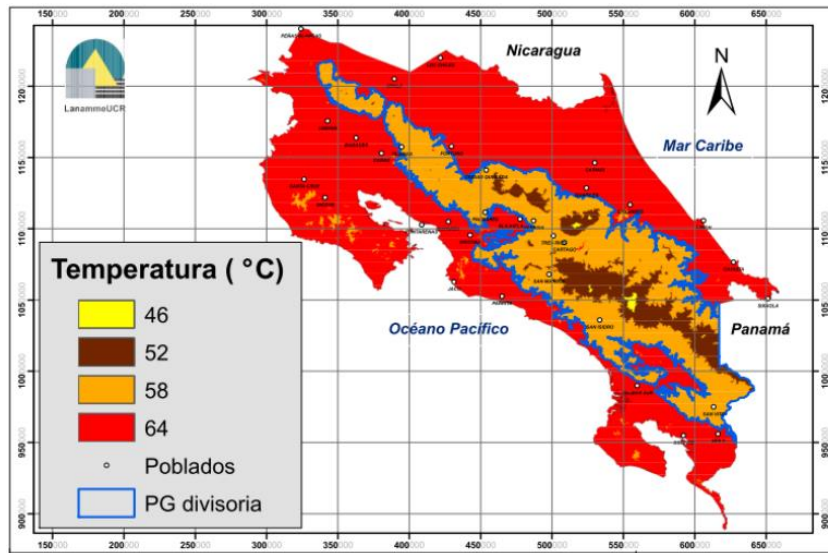
Los tipos de zonificaciones presentadas con antelación se restringen a parámetros externos de la zona donde se va a colocar el pavimento asfáltico. Sin embargo, la clasificación por temperatura del asfalto y grado de desempeño (que a partir de ahora se denotará como CTAPG) determina el comportamiento del ligante asfáltico a distintas temperaturas y acondicionamientos (Elizondo *et al.*, 2013).

En este caso, el grado de desempeño establece un rango de temperaturas dentro de las cuales el asfalto mantiene sus propiedades de desempeño adecuadas en servicio. Por otro lado, respecto a las temperaturas de zonificación, se establecieron tres regiones de temperaturas máximas estadísticamente significativas; para las temperaturas mínimas no se observaron diferencias significativas para regionalizar (Elizondo *et al.*, 2013).

Con base en la CTAPG, el territorio nacional se divide en las regiones Central, Caribe y Pacífica. Estas divisiones se pueden observar en la Figura 1.2. (Elizondo *et al.*, 2013).

#### d. Datos meteorológicos de la regionalización climática costarricense

En esta sección, se observan algunos datos de las regiones según la CTAPG (Cuadro 1.1) y las clasificaciones, meteorológica neta (CMN) y meteorológica para gestión vial (CMGV), ver Cuadro 1.2.



**Figura 1.2.** Mapa de la regionalización del territorio costarricense, según la clasificación meteorológica por temperatura máxima del grado de desempeño.  
Fuente: (Elizondo *et al.*, 2013).

Como se mencionó con antelación, la CTAPG es con base en el material ante los factores externos y la combinación CMN/CMGV es para factores externos.

**Cuadro 1.1.** Datos de temperaturas máximas de asfaltos y grados de desempeño para la clasificación meteorológica por temperatura máxima y grado de desempeño.

| Zona                  | Temperatura máxima <sup>1</sup> , T/ (°C) | Grado de desempeño <sup>2</sup> |
|-----------------------|---|---------------------------------|
| Caribe-Pacífico-Norte | 64  | PG 70-22                        |
| Central               | 58  | PG 64-22                        |
| Montaña               | 52  | PG 64-22                        |
| Alta Montaña          | 46  | PG 64-22                        |

1 Zonificación climática de Costa Rica para la determinación del tipo de ligante asfáltico clasificado por grado de desempeño (PG) (Elizondo *et al.*, 2013).

2 Valor para rutas de medio volumen de tránsito (entre 10 ESALS a 20 ESALS, es decir ejes equivalentes).



**Cuadro 1.2.** Datos meteorológicos de temperatura media anual, total de precipitación anual, radiación solar directa acumulada anual (RSDA), días con lluvia anuales (DLA), índice de humedad (IH) y áreas de las regiones según la clasificación meteorológica para la gestión vial.

| <b>Región</b>                          | <b>TMA<sup>3</sup>,<br/>(°C)</b> | <b>TPA<sup>1</sup>,<br/>(L/ m<sup>2</sup> año)</b> | <b>RSDA<sup>4</sup>,<br/>(kWh/ m<sup>2</sup>)</b> | <b>DLA<sup>1</sup>,<br/>(días)</b> | <b>IH<sup>5</sup>,<br/>(m)</b> | <b>Área<sup>3</sup><br/>(km<sup>2</sup>)</b> |
|--|----------------------------------|--|---|------------------------------------|--------------------------------|--|
| Caribe                                 | 25.3                             | 4138   | ~1461   | 207                                | 2.40                           | 8390   |
| Caribe Alta                            | 19.7                             | 3406   | ~1022   | 221                                | 2.36                           | 5775   |
| Caribe Sur                             | 26.0                             | 2470   | ~1168   | 166                                | 1.14                           | 834  |
| Cordillera de Guanacaste y Tilarán     | 21.0                             | 2462   | ~1680   | 173                                | 1.29                           | 1217   |
| Golfo de Nicoya y Llanura Guanacasteca | 26.8                             | 2219   | ~1899   | 104                                | 0.58                           | 8620   |
| Los Santos                             | 17.0                             | 2280   | ~1534   | 148                                | 1.44                           | 1665   |
| Norte                                  | 25.7                             | 3177   | ~1314   | 207                                | 1.98                           | 4212   |
| Norte Alta                             | 25.0                             | 3100   | ~1022   | 225                                | 2.08                           | 1713   |
| Pacífico Central                       | 25.3                             | 3578   | ~1607   | 150                                | 1.50                           | 2661   |
| Pacífico Sur                           | 27.0                             | 4271   | ~1607   | 195                                | 2.30                           | 3872   |
| Península de Nicoya                    | 28.0                             | 2385   | ~1899   | 99                                 | 0.72                           | 2679   |
| Talamanca                              | 20.0                             | 3320   | ~1095   | 211                                | 2.07                           | 2178   |
| Upala y Los Chiles                     | 26.0                             | 2871   | ~1168   | 194                                | 1.67                           | 1890   |
| Valle Central                          | 21.0                             | 1983   | ~1461   | 129                                | 0.87                           | 1478   |
| Valle del General                      | 23.0                             | 3050   | ~1607   | 175                                | 1.65                           | 3311   |
| Volcánica Central<br>Pacífico          | 15.0                             | 2820   | ~876  | 137                                | 1.25                           | 474  |

### 1.1.2. El fenómeno de envejecimiento de asfaltos: fundamentos teóricos y de diseño

Con el fin de establecer una base para el diseño de una cámara de envejecimiento de asfaltos basada en los factores climáticos costarricenses, en la presente sección se describen los fundamentos sobre el envejecimiento de los asfaltos y sobre el diseño de equipos de meteorización.

<sup>3</sup> Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica (Solano & Villalobos, 2000).

<sup>4</sup> Mapas de recursos solares de Costa Rica (Solargis, 2020).

<sup>5</sup> Zonificación climática de Costa Rica para la gestión de infraestructura vial (Orozco, 2007)

### a. El envejecimiento de los asfaltos

El envejecimiento en los asfaltos es un fenómeno complejo que implica cambios tanto químicos como físicos, ambos irreversibles que influyen la estructura del mismo y afectan su durabilidad en servicio (Vargas & Reyes, 2010).



**Figura 1. 3.** Esquema sobre los principales mecanismos que conforman el fenómeno de envejecimiento de los asfaltos.

A lo largo de más de cien años se han desarrollado diversos tipos de investigaciones con el fin de comprender mejor el fenómeno del envejecimiento en asfaltos. De ello, se han obtenido seis mecanismos principales en el envejecimiento de los asfaltos (Vargas & Reyes, 2010), los cuales son la pérdida de volátiles, la oxidación, la polimerización, la separación, la sinéresis y la tixotropía. Un esquema resumen sobre los mecanismos del envejecimiento de los asfaltos se observa en la Figura 1.3.

La pérdida de volátiles consiste en la disminución de peso de los asfaltos como efecto térmico y de la alta volatilidad de algunos constituyentes. Su influencia en el envejecimiento radica en que la mezcla aumenta la concentración debido a la ausencia de dichos componentes volatilizados, ello contribuye a un aumento en la rigidez del asfalto (Petersen, 1989; Vargas & Reyes, 2010).

La oxidación consiste en el cambio químico que se efectúa entre los grupos lábiles del asfalto con el oxígeno. Esto aumenta el grado de insaturaciones del material, además de una mayor cantidad de carbonilos y sulfóxidos. Por otra parte, la polimerización en los asfaltos se efectúa a través de dos mecanismos: por radicales libres y mediante condensación, ambos ligados a la radiación (Vargas & Reyes, 2010).

La separación se debe absorción de líquidos (generalmente agua) por sólidos y a la adsorción de componentes en la superficie, lo cual afecta las interacciones entre los componentes del material (Vargas & Reyes, 2010).

La sinéresis consiste en la exudación de parafinas, la cual es una separación de fases en la mezcla asfáltica. Por otro lado, la tixotropía es la formación de estructuras moleculares internas que causan endurecimiento estérico (Vargas & Reyes, 2010).

Cabe destacar que, el mecanismo de oxidación posee una influencia mayoritaria en el envejecimiento de los asfaltos (Vargas & Reyes, 2010). El proyecto en cuestión trata el envejecimiento en el asfalto (solo el fluido de color negro) y no sobre la mezcla asfáltica, la cual incluye agregados.

Finalmente, el envejecimiento aumenta la rigidez del asfalto y con ello su fragilidad. Lo anterior, disminuye la capacidad de disipar la energía de la carga vehicular sin sufrir una deformación permanente, por ello afecta la durabilidad del material en servicio (Villegas-Villegas *et al.*, 2018).

#### **b. Fundamentos de diseño de una cámara de envejecimiento por meteorización**

Para el diseño de equipos de meteorización es necesario correlacionar el deterioro simulado en laboratorio con el envejecimiento natural a las condiciones ambiente. Ello se realiza

mediante el estudio de una variable específica de respuesta como el brillo en recubrimientos o la viscosidad en el bitumen (Grossman, 1977).

Según Grossman (1977), los principales factores que inciden en el envejecimiento de los materiales expuestos a la intemperie son la radiación ultravioleta, los cambios de temperatura y los ciclos de rocío.

La radiación solar se clasifica en tres categorías (Grossman, 1977): UVA (400 nm – 315 nm) la cual incide en la superficie terrestre y representa entre 5% a 7% de la radiación solar (Sánchez, 2017); UVB (315 nm – 290 nm) este tipo de radiación representa un 0.2% de la radiación solar total que incide en la superficie en verano, y la UVC (< 290 nm), la cual no incide en la superficie terrestre debido a que es absorbida completamente por el ozono estratosférico.

En los equipos de meteorización se emplean únicamente las radiaciones de tipo UVA-340 y UVB-313 (Q-Lab, 2006). La primera, permite obtener resultados más realistas (una buena correlación entre los ensayos experimentales y datos de exposición a la intemperie) y la segunda permite resultados más rápidos aunque con la posibilidad de datos anómalos (Fedor & Brennan, 1993).

El nivel de radiación en los equipos de envejecimiento por meteorización se mide en irradiancia (potencia por unidad de área) o irradiancia espectral (potencia por unidad de área por longitud de onda) y se controla mediante un lazo retroalimentado que emplea sensores de irradiancia, un controlador y un regulador de potencia de lámpara. La irradiancia es la energía que aportan los fotones por unidad de área (Q-Lab, 2006).

En el diseño de equipos de envejecimiento por meteorización se emplean, de forma más convencional, ciclos de rocío debido a que los materiales expuestos a la intemperie presentan un contacto más prolongado con el rocío y no con la lluvia (Grossman, 1977).

Adicionalmente, según los estudios de Grossman (1977) los ciclos de rocío se emplean mediante aspersores y a una temperatura menor que la presente en ciclos de radiación, puesto que el rocío se presenta en partes del día donde la temperatura no es muy elevada. Además,

se debe considerar la calidad del agua de lluvias y rocío para una mayor aproximación, ya que los contaminantes influyen parámetros como el pH.

Un escalamiento preciso del tiempo en ciclos de rocío es difícil debido a la variabilidad del tiempo atmosférico, sin embargo, es aconsejable el estudio de la climatología de las regiones que se desean simular para ensayos de envejecimiento (ASTM, 2017b).

La temperatura presenta un efecto en conjunto con la radiación (Wang *et al.*, 2012), el rocío y el oxígeno (Grossman, 1977) en el envejecimiento de los asfaltos. Los ensayos de envejecimiento por meteorización se realizan en dos ciclos de temperatura de forma alternada: el primero entre 60 °C y 80 °C, pues se estima que son temperaturas que el asfalto alcanza en servicio (este acompañado de radiación), y el segundo entre los 50 °C y 30 °C que además se suele acompañar de rocío (ASTM, 2017b; Fedor, G.; Brennan, 1993; Grossman, 1977).

### **1.1.3. Ensayos de envejecimiento por meteorización**

Los ensayos de envejecimiento acelerado en asfaltos con base en condiciones meteorológicas se han estado realizando desde mediados del siglo XX, para comprender el mecanismo natural mediante el cual los asfaltos se deterioran en su tiempo de servicio.

En la presente sección, se detallan algunos estudios sobre el envejecimiento de asfaltos por meteorización a pequeña escala y a gran escala, con el fin de brindar una perspectiva de las líneas de investigación sobre el fenómeno en cuestión.

#### **a. Ensayos con base en la norma ASTM D4799**

La norma ASTM D4799 llamada “*Standard practice for accelerated weathering test conditions and procedures for bituminous materials (fluorescent UV, water spray, and condensation method)*” brinda una guía para los parámetros en cámaras de meteorización y seis ciclos de ensayos con sus recomendaciones (ASTM, 2017b).

Los ensayos propuestos por la norma en cuestión emplean especímenes de entre 70 mm a 150 mm, por lo que son experimentos a pequeña escala aplicables tanto a pavimentos

asfálticos como al ligante asfáltico (ASTM, 2017b). Los ciclos propuestos por la norma ASTM D4799 se observan en el Cuadro 1.3.

**Cuadro 1.3.** Ciclos de ensayo para el envejecimiento acelerado del asfalto por medio de meteorización según la norma ASTM D4799.

| Parámetro  | Ciclo          |                |                |                |                |                |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|  | A              | B              | C              | D              | E              | F              |
| Tiempo del subciclo de calor y luz, $t_c$ / (h)        | 4              | 20             | 20             | 4              | 20             | 20             |
| Tipo de radiación                                      | UVA            | UVA            | UVA            | UVA            | UVA            | UVA            |
| Longitud de onda, $\lambda$ / (nm)                     | 340            | 340            | 340            | 340            | 340            | 340            |
| Temperatura del subciclo de calor, $T_c$ / (°C)        | $60.0 \pm 2.5$ | $60.0 \pm 2.5$ | $80.0 \pm 2.5$ | $60.0 \pm 2.5$ | $60.0 \pm 2.5$ | $80.0 \pm 2.5$ |
| Tiempo del subciclo de condensación, $t_s$ / (h)       | 4              | 4              | 4              | 3.75           | 3.75           | 3.75           |
| Temperatura del subciclo de condensación, $T_s$ / (°C) | $50.0 \pm 2.5$ | $50.0 \pm 2.5$ | $50.0 \pm 2.5$ | $50.0 \pm 2.5$ | $50.0 \pm 2.5$ | $50.0 \pm 2.5$ |

Algunos estudios han empleado metodologías basadas en la norma ASTM D4799, con resultados significativos en el envejecimiento del bitumen y en mezclas asfálticas, en los cuales el par condensación y radiación son altamente influyentes (Shi *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2012).

#### **b. Ensayos de meteorización a escala real**

Actualmente, otra área de interés en los ensayos de envejecimiento acelerado de los pavimentos asfálticos por meteorización es el planteamiento experimental a escala real. El

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), ha venido realizando ensayos de esta clase aproximadamente desde el año 2014, mediante un Simulador de Vehículos Pesados (HVS, por sus siglas en inglés), el cual combina factores de carga vehicular, radiación, lluvia y temperatura con lo que pretende simular deterioro de hasta 20 años entre tres a seis meses de ensayo (Leiva *et al.*, 2016).



**Figura 1.4.** Equipos para ensayos de envejecimiento acelerado por meteorización: a la izquierda una cámara hecha con base en la norma ASTM D4799; a la derecha el simulador de vehículos pesados (HVS).

Fuente: (Leiva *et al.*, 2016; Shi *et al.*, 2019).

Cabe destacar que el tipo de muestras que se implementan en los ensayos en HVS son pavimentos asfálticos, es decir, el conjunto entre el asfalto y los agregados colocados sobre una estructura diseñada bajo condiciones específicas de vacíos, granulometría, dosis de asfalto, entre otros. Este tipo de experimentos siguen en desarrollo y a diferencia de las cámaras basadas en la norma ASTM D4799, incluyen el factor vehicular, pero la muestra para ensayo es significativamente mayor, por lo que el desarrollo de cámaras de meteorización a pequeña escala rápidas y precisas es una necesidad experimental en la actualidad.



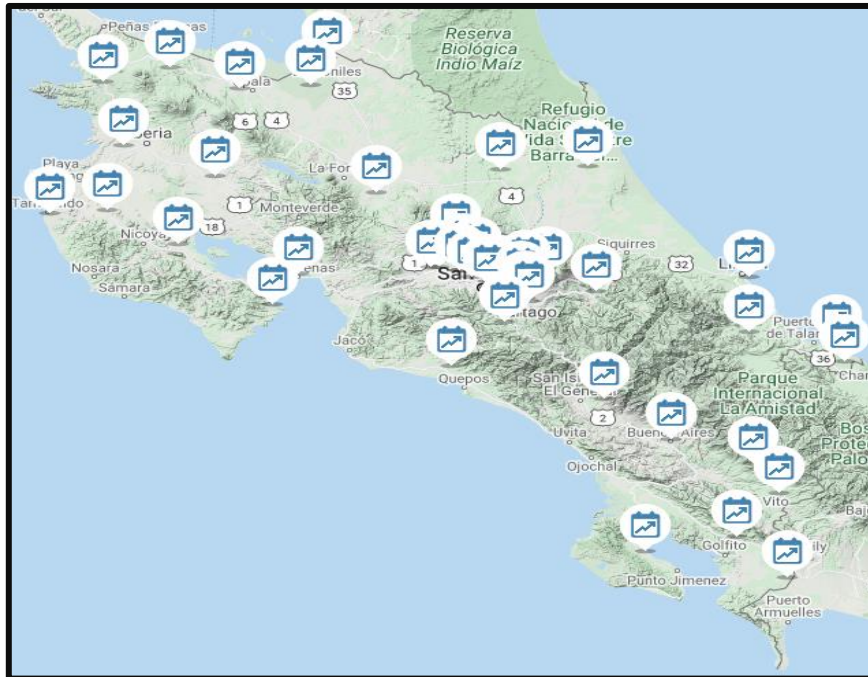


## 1.2. METODOLOGÍA

El primer capítulo del proyecto de investigación presente tiene por objetivo definir los parámetros de diseño para la cámara de envejecimiento por meteorización. Para lograr ello, se propuso la metodología como sigue.

### 1.2.1. Recopilación y tratamiento de los datos meteorológicos

Se definieron como parámetros meteorológicos regionales de interés a la cantidad de precipitaciones, la radiación solar y la temperatura mínima. Por otro lado, como parámetro directamente dependiente del material, se consideró la temperatura máxima del pavimento asfáltico según el PG por región según la clasificación CTAPG.



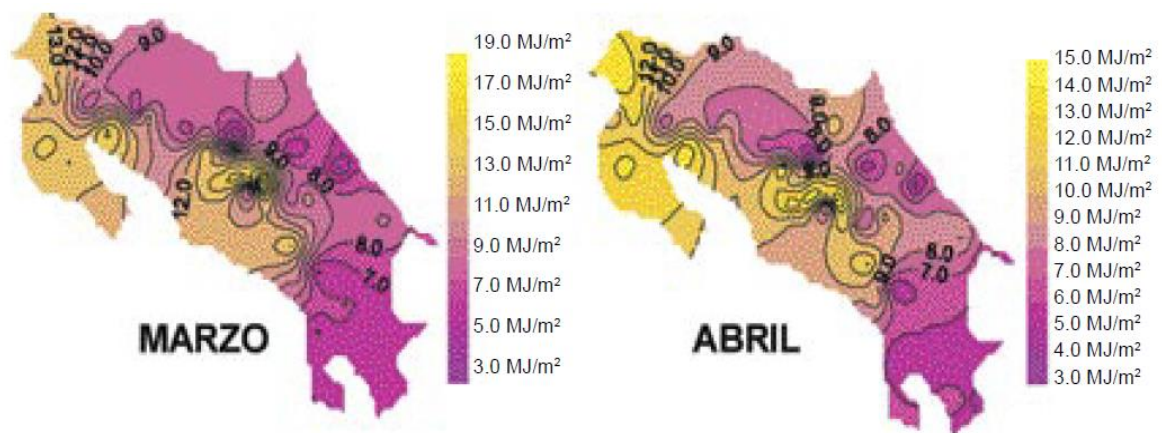
**Figura 1.5.** Mapa de datos climáticos de Costa Rica con la distribución de las estaciones climáticas.

Fuente: (IMN, 2021)

Los datos meteorológicos promedios por mes de precipitaciones, temperaturas mínimas, días con precipitaciones y humedad relativa se tomaron del Mapa de datos climáticos (IMN, 2021). La escogencia de las estaciones por región se realizó con base en los límites de la CMGV de Orozco (2007). Los datos de radiación solar directa se tomaron de los estudios realizados por Wright (2008).

Una vez recabados los datos meteorológicos de las 43 estaciones mostradas en la Figura 1.5 y agrupados según la CMGV se procedió a promediar dicha información, con lo cual se condensaron los datos de 43 grupos a 16 (un grupo de datos por región de la CMGV). Sin embargo, se requirió sintetizar más la información recabada a fin de diseñar los ciclos de funcionamiento del equipo por construir.

Por otro lado, respecto a los datos de radiación solar se aplicó un método de toma de datos visual, el cual consistió en promediar los valores de radiación por color para cada región de la CMGV mostrados en el mapa de la Figura 1.6 y se multiplicó por la cantidad de días del mes en cuestión. Cabe destacar que se consideraron los valores significativos a los cuales Wright (2008) dio énfasis por región.



**Figura 1.6.** Muestra de los mapas de radiación solar diaria promedio mensual. En este caso se expone para los meses de marzo y abril en Costa Rica.

Fuente: (Wright, 2008)

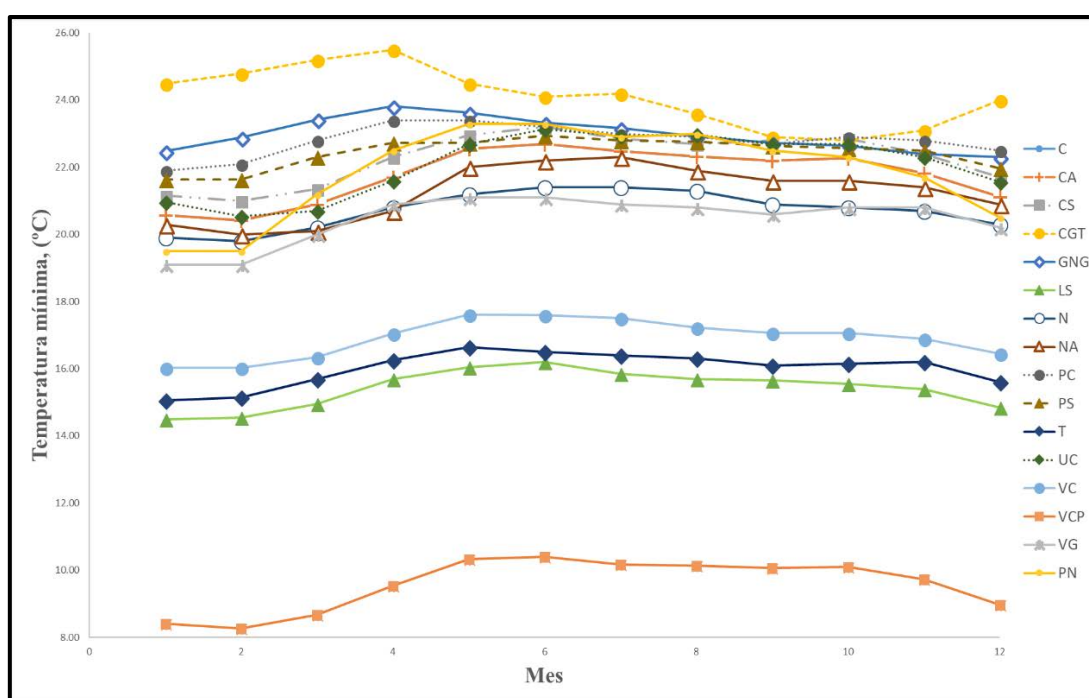
Se consideró la multiplicación del promedio diario por mes para cada región por el número de días del respectivo mes ya que, el promedio mensual indicado por Wright (2008) corresponde a la radiación solar de un día promediado entre todos los días del mes y no a la cantidad de radiación acumulada durante un mes determinado. Lo anterior se realizó con el fin de obtener valores de radiación acumulados por el asfalto en el transcurso del tiempo.

Con el fin de condensar la información meteorológica recabada para diseñar los ciclos de operación generales por regiones estadísticamente diferentes, se graficaron los valores de temperaturas mínimas, días con precipitaciones, volumen de precipitaciones, humedad

relativa y radiación solar. Con ello se analizaron las tendencias mostradas en las Figuras 1.7, 1.11 y 1.12 y se decidió si aplicar un análisis estadístico de comparación de medias o emplear un índice con rangos para clasificar la información.

### a. Temperatura mínima

Con base en lo expuesto en la Figura 1.7, se observaron tres tendencias diferentes, por lo que se decidió emplear un estadístico para evaluar las medias a fin de confirmar la objetividad de las diferencias evidenciadas visualmente.

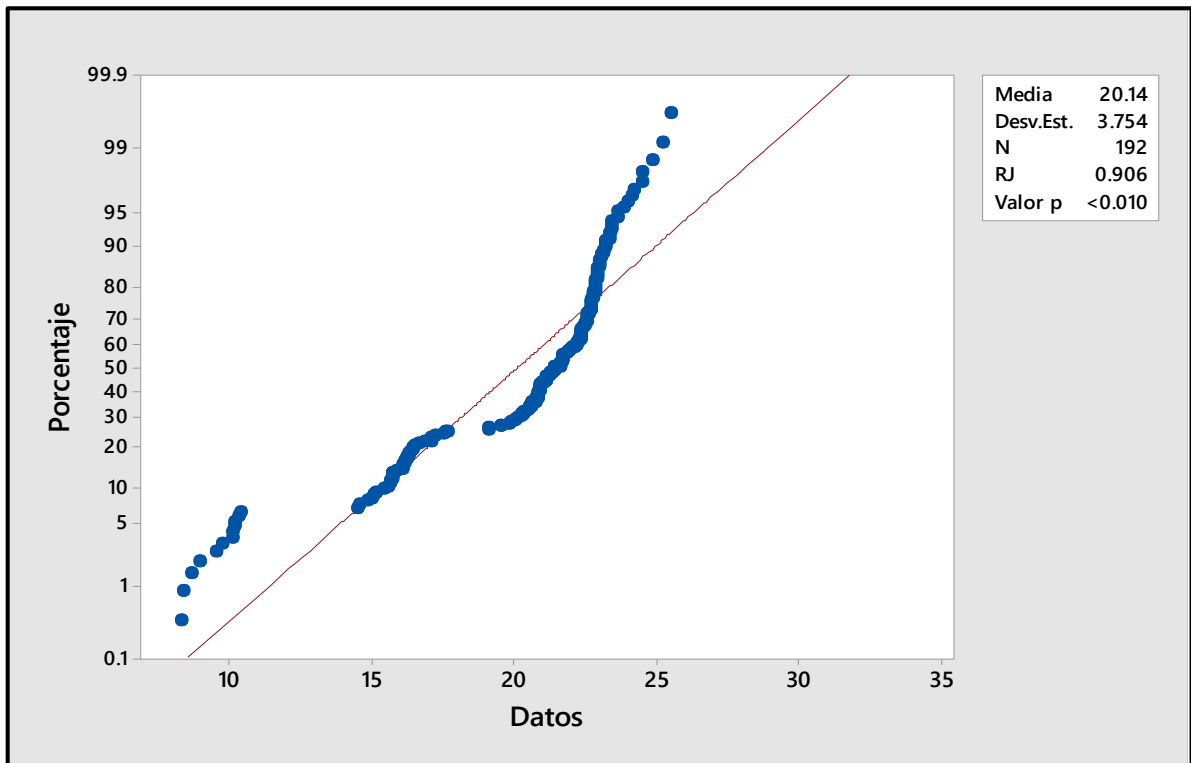


**Figura 1.7.** Tendencia anual de los valores de temperatura mínima promedio para cada una de las regiones de la CMGV con base en los registros del IMN para el periodo del año 2000 al 2018.

Primeramente, se comprobaron los datos para un análisis de varianza (ANOVA) mediante los softwares Microsoft Excel® y Minitab® 18, para verificar el cumplimiento de los supuestos de igualdad de varianza, independencia y normalidad (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Los resultados de la comprobación de supuestos se observan en las Figura 1.8 y 1.9. Con base en lo expuesto, los datos de temperaturas mínimas por regiones según la CMGV no

siguen una tendencia normal, la igualdad de varianzas es ambivalente según el estadístico que se emplee para la prueba (comparaciones múltiples acepta igualdad de varianzas; Levene rechaza dicha igualdad) y los datos mostraron independencia.

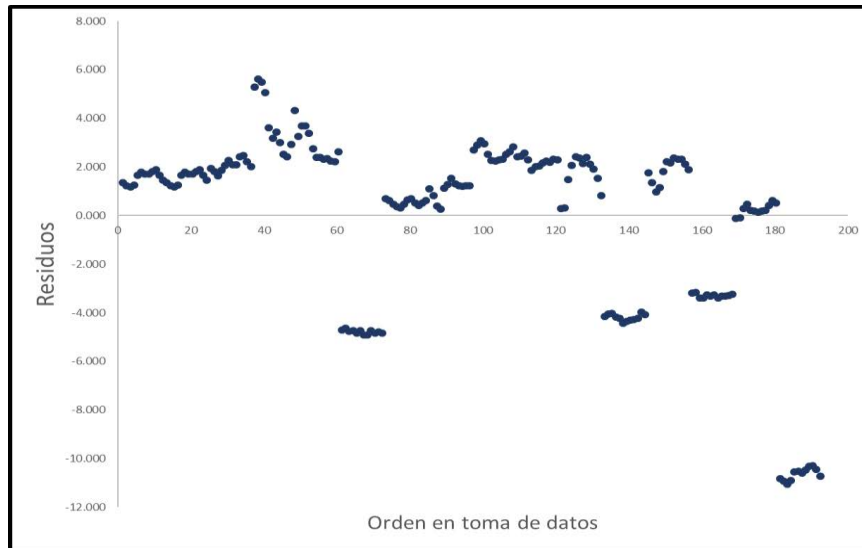


**Figura 1.8.** Resultado de la prueba de normalidad sobre los datos de temperatura mínima por regiones de la CMGV mediante el software Minitab® 18.

Como se observó en la Figura 1.8, el valor p (menor a 0.010) es inferior comparado a significancias del 5% y 1%, con lo cual los datos no siguen una tendencia normal.

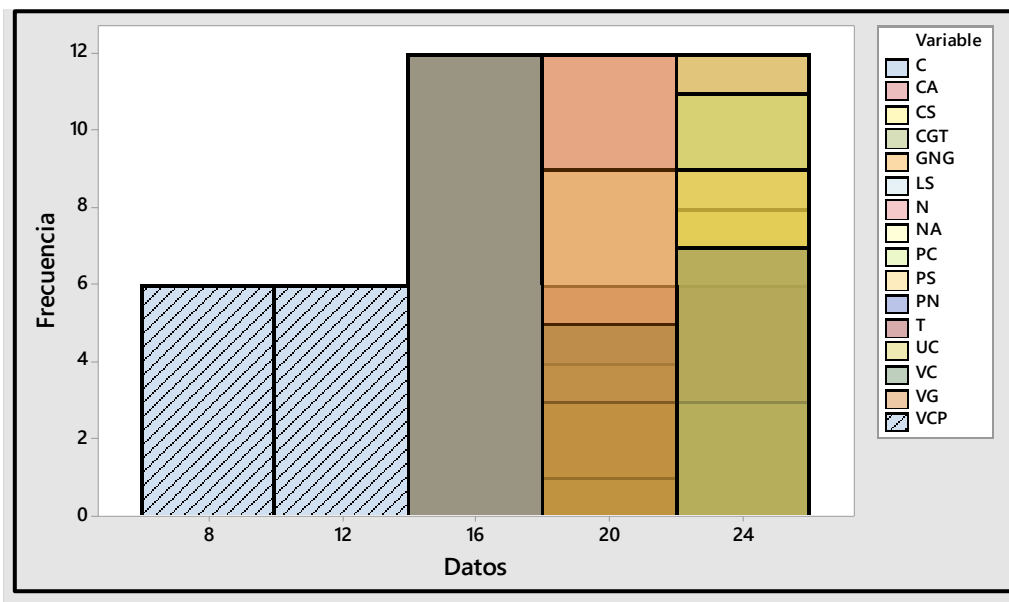
Por otro lado, los valores p reportados para la prueba de igualdad de varianzas fueron de 0.288 para el método de comparaciones múltiples y de 0.040 para la prueba de Levene. Los resultados se obtuvieron mediante Minitab® 18. Con base en los valores obtenidos si se comparan contra significancias del 5% y del 1%, existe igualdad de varianzas según el método de comparaciones múltiples al 5% de significancia, pero no para Levene; en contraste, para una significancia del 1% existe igualdad de varianzas en ambos casos.

La prueba de independencia se observó en la Figura 1.9. Debido a que no se detectan patrones en la graficación de los residuos respecto al orden la toma de datos, se determinó que los datos son independientes



**Figura 1.9.** Resultado de la prueba de independencia sobre los datos de temperatura mínima por regiones de la CMGV mediante el software Microsoft Excel®.

Con base en lo evidenciado con antelación, se concluye que no se puede aplicar estadística paramétrica para diferencias las temperaturas mínimas por región. Para ello se empleó la prueba de la mediana de Mood, un estadístico no paramétrico para procesar datos con distribuciones no similares (Minitab, 2019). Para observar la distribución de datos, se elaboró la Figura 1.10.

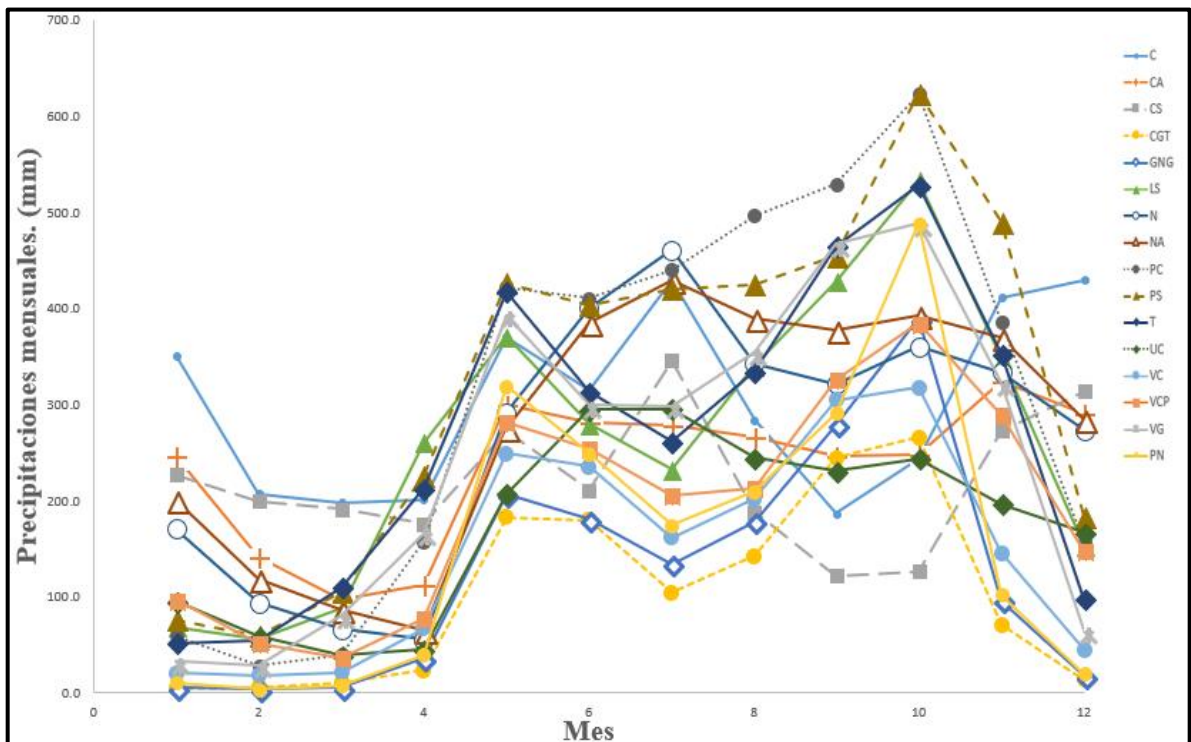


**Figura 1.10.** Histograma de los datos de temperatura mínima por regiones de la CMGV elaborado mediante el software Minitab® 18.

Como los datos no siguen una distribución similar, tal como se observa en la Figura 1.10, se aplicó la prueba de la mediana de Mood en conjunto con el método de comparaciones múltiples para agrupar específicamente las regiones con temperatura mínima estadísticamente diferente.

### b. Precipitaciones

A diferencia de los datos de temperaturas mínimas, la tendencia presentada en las regiones de la CMGV para las precipitaciones no permite establecer la posibilidad de un estudio estadístico de medias. Lo anterior, según se observó en la Figura 1.11.



**Figura 1.11.** Tendencia anual de los valores de precipitaciones para cada una de las regiones de la CMGV con base en los registros del IMN para el periodo del año 2000 al 2018.

Debido a lo anteriormente expuesto, se empleó el índice de humedad (IH) expuesto por Orozco (2007) para clasificar las precipitaciones por regiones. Una vez que se categorizaron las regiones de acuerdo con el IH, se tomaron los valores máximos de precipitación anual por categoría como parámetro para escalar los ciclos de precipitación.

El índice de humedad es un indicador para la humedad de los suelos (Orozco, 2007). Consiste en la conversión de la precipitación anual, ya sea dada en milímetros de lluvia<sup>6</sup> o L/ m<sup>2</sup>, en metros y permite identificar zonas propensas a inundación o sequías, además, se puede emplear en la gestión vial para el uso de los suelos. El cálculo del índice de humedad se puede realizar mediante la Ecuación 1.1.

$$IH = \frac{D_{lluvias} P_{anual}}{365000} \quad (1.1)$$

Donde,

IH: Índice de humedad, m.

D<sub>lluvia</sub>: Días con lluvia, días.

P<sub>anual</sub>: Precipitación anual, mm.

La clasificación por IH se realizó de acuerdo con lo mostrado en el Cuadro 1.4, en el cual se establecen las categorías de Seco, Húmedo Seco, Húmedo, Muy Húmedo y Extremadamente Húmedo.

**Cuadro 1.4.** Rangos de clasificación cualitativa para zonas climáticas con base en el índice de humedad.

| Rangos del índice de humedad, IH/ /(m) | Clasificación         |
|--|-----------------------|
| IH < 1.00                              | Seco                  |
| 1.00 ≤ IH < 1.75                       | Húmedo seco           |
| 1.75 ≤ IH < 2.40                       | Húmedo                |
| 2.40 ≤ IH ≤ 3.30                       | Muy húmedo            |
| IH > 3.30                              | Extremadamente húmedo |

### c. Radiación solar acumulada

La tendencia de los valores de radiación solar acumulados por región según la CMGV presentó inconvenientes similares a los observados para las tendencias de las precipitaciones, por lo que no se consideró adecuado plantear un tratamiento estadístico para diferenciar

<sup>6</sup> Un litro de lluvia sobre un plano de 1 m<sup>2</sup> produce un espesor de 1 mm, por ello son unidades equivalentes.

categorías. En su lugar, se propuso un índice de radiación solar (IRS). En la Ecuación 1.2 se observa la fórmula para el cálculo del IRS. Cabe destacar que la ecuación propuesta para el IRS es de elaboración propia.

$$IRS = \frac{D_{SLL}RAD_R}{365 * RAD_T} \quad (1.2)$$

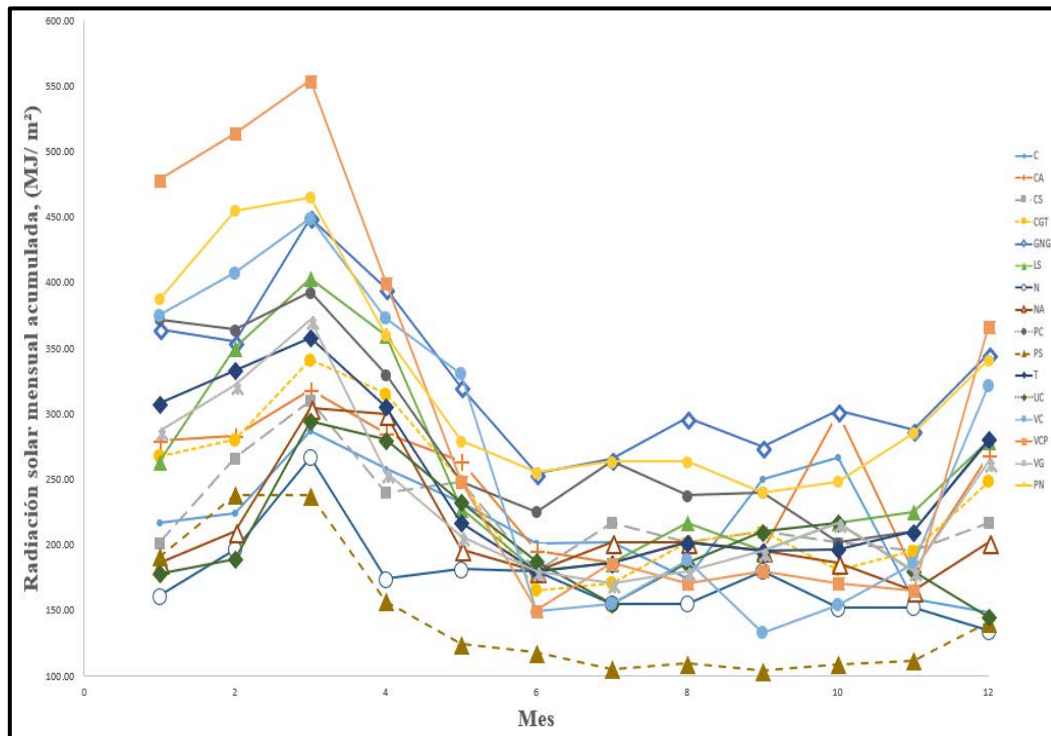
Donde,

IRS: Índice de radiación solar, adim.

D<sub>SLL</sub>: Días sin lluvia, días.

RAD<sub>T</sub>: Acumulado de radiación solar anual a nivel país, MJ/ m<sup>2</sup> año.

RAD<sub>R</sub>: Acumulado de radiación solar anual por región, MJ/ m<sup>2</sup> año.



**Figura 1.12.** Tendencia anual de los valores de radiación solar mensual acumulada para cada una de las regiones de la CMGV con base en los estudios de Wright para el año 2008.

La ecuación del IRS propuesta consiste en una expresión similar a un promedio ponderado, donde el criterio de ponderación por región son los días sin lluvia (D<sub>SLL</sub>) entre 365 días. Lo anterior se multiplica por la razón de la radiación solar anual acumulada por región entre el acumulado anual del país.



Se empleó la tasa de días sin lluvia por año (tomados de los datos del IMN) como criterio debido a que en dichos días la probabilidad de nubosidad es menor, por lo que la radiación solar tiende con mayor probabilidad, a ser más intensa ya que no se absorbe por la nubosidad. Con base en el IRS se establecieron las categorías de clasificación de las regiones de la CMGV, las cuales se muestran en el Cuadro 1.5.

**Cuadro 1.5.** Rangos de clasificación cualitativa para zonas de la CMGV según el índice de radiación solar.

| <b>Rangos del índice de radiación solar, IRS/ (adim)</b> | <b>Clasificación</b> |
|--|----------------------|
| $0.00 < \text{IRS} \leq 2.00$                            | Baja irradiancia     |
| $2.00 < \text{IRS} \leq 4.00$                            | Media irradiancia    |
| $4.00 < \text{IRS} \leq 6.00$                            | Alta Irradiancia     |

Se emplearon las categorías del IRS para seleccionar los máximos regionales por categoría con el fin de establecer los ciclos de radiación en el diseño del equipo de envejecimiento de los asfaltos.

#### **d. Temperatura máxima**

Los valores de temperatura máxima para los ciclos de envejecimiento se tomaron con base en la CTAPG propuesta por Elizondo et al (2013). Este valor está asociado al asfalto, pues este material alcanza temperaturas mayores al ambiente durante el servicio. Los datos de la CTAPG se observaron en la Figura 1.2 y en el Cuadro 1.1.

#### **1.2.2. Escalamiento de la radiación solar**

La norma ASTM D4799 emplea varias normas y guías de ensayo de referencia, una de ellas es la ASTM G151 (2019), la cual brinda una guía sobre los experimentos de exposición a fuentes luminosas artificiales en ensayos acelerados.

La norma anteriormente expuesta, indica que el cálculo de factores de aceleración que relacionan horas de exposición con radiación acumulada en fuentes artificiales no son recomendables a menos que se indaguen de forma estadística comparativa, ensayos de

laboratorio y ensayos a la intemperie, con datos meteorológicos procesados mediante herramientas estadísticas (ASTM, 2019a).

Con base en lo expuesto con antelación, se desarrolló en la sección presente un algoritmo para el escalamiento de los tiempos de exposición a las lámparas UV de la cámara de envejecimiento de los asfaltos.

El algoritmo en cuestión se fundamentó en la naturaleza de la física de partículas del fotón como la unidad que transmite la energía radiante al asfalto y lo expuesto en las tesis de Sánchez (2017) y Rojas (2020).

#### **a. Obtención del flux de fotones y la irradiancia espectral**

Para determinar el flux de fotones se deben conocer la potencia nominal del bulbo luminoso, la energía del fotón en función de la longitud de onda y el área de irradiancia de la fuente luminosa (Honsberg & Bowden, 2016d).

Para el cálculo de la energía del fotón se empleó la expresión matemática que se muestra en la ecuación 1.3 (Honsberg & Bowden, 2016b).

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.3)$$

Donde,

$E_f$ : Energía del fotón, J/ fotón.

$h$ : Constante de Planck, J·s.

$c$ : Velocidad de la luz, m/ s.

$\lambda$ : Longitud de onda, m.

El área de irradiancia corresponde a la de una esfera cuyo centro se ubica en la fuente luminosa. Con base en lo anteriormente expuesto, se puede formular la expresión observada en la ecuación 1.4 (Honsberg & Bowden, 2016d).

$$\Phi_f = \frac{P_o}{E_f A_e} \quad (1.4)$$

Donde,

$\Phi_f$ : Intensidad de flujo de fotones, fotón/ m<sup>2</sup> s.

$P_o$ : Potencia nominal de la bombilla, W.

$A_e$ : Área de irradiancia,  $m^2$ .

Seguidamente, se empleó el producto entre la energía del fotón (Ecuación 1.3) y el flux de fotones (Ecuación 1.4) para cada longitud de onda del espectro del bulbo luminoso con lo cual se obtuvo la densidad de potencia o irradiancia (Honsberg & Bowden, 2016a), la cual se observa el Ecuación 1.5.

$$I = \sum_{i=\lambda_{\min}}^{\lambda_i} E_f(\lambda_i)\Phi_f(\lambda_i) \quad (1.5)$$

Donde,

I: Irradiancia,  $W/m^2$ .

Por otro lado, la irradiancia espectral corresponde al cociente de cada densidad de potencia por unidad de longitud de onda entre la longitud de onda del fotón que produjo dicha densidad de potencia. Lo anterior se observa en la Ecuación 1.6 (Honsberg & Bowden, 2016c).

$$I_{esp} = \sum_{i=\lambda_{\min}}^{\lambda_i} \frac{E_f(\lambda_i)\Phi_f(\lambda_i)}{\lambda_i} \quad (1.6)$$

Donde,

$I_{esp}$ : Irradiancia espectral,  $W/m^2 \text{ nm}$ .

Como referencia, la irradiancia espectral en el ultravioleta para la luz solar natural de verano es aproximadamente  $0.68 W/m^2 \text{ nm}$  entre los 300 nm y los 400 nm (Q-Lab, 2005).

### **b. Obtención de los valores de radiación por escalar**

Con base en el Cuadro 1.5 se clasificaron, por nivel de irradiancia, cada una de las regiones según la CMGV. La distribución de los niveles de irradiancia se observó en el Cuadro B.1 de los anexos.

Seguidamente, se empleó el valor más alto de radiación anual de cada una de las categorías del IRS, con el fin de ensayar el valor más extremo al cual se verían expuestos los asfaltos de las regiones de una misma categoría.

Adicionalmente, los asfaltos envejecen con facilidad debido a la absorción de rayos UV del espectro solar. Los rayos tipo UVA son entre el 5% y el 7% del espectro solar, los rayos menos energéticos del ultravioleta (Rojas, 2020; Sánchez, 2017).

Con base en el porcentaje UVA expuesto por Rojas (2020) y Sánchez (2017), se aplicó un 7% a los valores extremos de las categorías del IRS, con el fin de estimar para los ensayos las condiciones de envejecimiento más severas dentro de un rango natural. Los valores extremos de radiación se observan en el Cuadro 1.6.

**Cuadro 1.6.** Valores de irradiancia por escalar según cada categoría del IRS aplicado a cada una de las regiones según la CMGV.

| <b>Nivel de Irradiancia</b> | <b>Irradiancia anual<br/>máxima, IAM/ (MJ/ m<sup>2</sup>)</b> | <b>Irradiancia UV anual<br/>máxima, UVM/ (MJ/ m<sup>2</sup>)</b> |
|-----------------------------|---|--|
| Baja Irradiancia            | 3102.83   | 217.20   |
| Media Irradiancia           | 3583.19   | 250.82   |
| Alta Irradiancia            | 3910.00   | 273.70   |

Los valores observados en el Cuadro 1.6 son los valores de irradiancia por escalar mediante el nivel de irradiancia de los bombillos UV por escoger, con el fin de determinar los tiempos de ensayo para la exposición de asfaltos a radiación UV.

### **c. Escogencia de bombillos UV para el escalamiento**

Para determinar los bombillos UV por emplear se tomaron en consideración los criterios: económico, técnico, de disponibilidad, de capacidad y geométrico. El primero refiere a que los bombillos UV sean asequibles en términos financieros para el desarrollo del proyecto, lo cual considera los siguientes aspectos de la naturaleza del proyecto:

- El equipo de envejecimiento por meteorización acelerada (EEMA) propuesto es un prototipo, debido a que es el primer diseño propuesto por los autores.
- Se persiguen satisfacer las funciones principales para el EEMA, con base en los equipos comerciales de la misma naturaleza (como ejemplo, la QUV de Q-Lab).
- El EEMA consiste en la modificación de un horno convectivo en desuso del LanammeUCR, por lo que existen restricciones geométricas (ver Figura 1.13).

- Dados los puntos anteriores, se persigue la compra de los bombillos UV de menor costo, pero que satisfagan todos los criterios mencionados con antelación.



**Figura 1.13.** Horno convectivo sobre el que se realizó el montaje del EEMA.

Con base en lo expuesto anteriormente, las opciones de proveedores de bombillos UV contempladas para el desarrollo del proyecto son Philips, OSRAM GmbH y Q-Lab.

En el Cuadro 1.7 se resumen los criterios de selección aplicados a los modelos preseleccionados de los proveedores contemplados.

**Cuadro 1.7.** Criterios: económico (CE), técnico (CT), de disponibilidad (CD), de capacidad (CC) y geométrico (CG) aplicados a los modelos de bombillos UV preseleccionados.

| Proveedor     | Modelo               | CE | CT | CD | CC | CG |
|---------------|----------------------|----|----|----|----|----|
| Philips       | TL 20W/01 RS SLV/25  | √  | √  | X  | √  | √  |
| OSRAM GmbH    | HNS 15 W G13         | √  | X  | √  | √  | √  |
| Q-Lab         | UVB-313              | X  | √  | √  | √  | X  |
| OSRAM GmbH    | Ultra Vitalux 300 W  | X  | √  | √  | √  | √  |
| TSDC WebStore | UV Disinfection Lamp | √  | X  | √  | √  | √  |

Con base en lo observado en el Cuadro 1.7, se escogieron los modelos de Philips, OSRAM y el de TSDC WebStore para aplicar la metodología descrita en el apartado 1.2.2.a. No se

consideró el modelo de Q-Lab debido a las restricciones geométricas para su instalación (no caben en el espacio disponible) y al alto costo de estos bombillos (orden mínima: una caja de 12 bombillos por 1,200.00 USD). Para el modelo Ultra Vitalux de OSRAM no se realizó el escalamiento debido a su elevado costo (orden mínima 10 bombillos por 395.40 EUR).

Cabe destacar que el horno de la Figura 1.13 fue previamente modificado por Sánchez (2017) y Rojas (2020), sin embargo, las lámparas UV empleadas por los autores son de baja intensidad y el diseño no considera aspersion.

Finalmente, en la sección de análisis de resultados se trató de forma más extensa los criterios aplicados a los modelos escogidos.

### **1.2.3. Escalamiento de las precipitaciones**

Para el tratamiento de las precipitaciones la norma ASTM D4799 (2017) permite dos mecanismos de aspersion: el *spray* (gotas de agua directas) o la niebla húmeda (suspensión de agua en aire). Para el diseño del EEMA se escogió el mecanismo de *spray* debido a razones de seguridad que se abordaron más adelante.

Por otro lado, la metodología para la inclusión de las precipitaciones a escala en el EEMA consistió en obtener los valores por escalar, la aplicación de una razón geométrica, la capacidad de bombeo requerida y la escogencia de la bomba adecuada para el proceso. Los puntos expuestos con antelación se desarrollan a continuación.

#### **a. Obtención de los valores de precipitaciones por escalar**

De modo similar al apartado 1.2.2.b y con base en el Cuadro 1.4 se clasificaron, mediante el IH, cada una de las regiones según la CMGV. La clasificación según el IH se observa en el Cuadro B.2 de los anexos.

Seguidamente, se empleó el valor más alto de precipitación anual de cada una de las categorías del IH, con el fin de ensayar el valor más extremo al cual se verían expuestos los asfaltos de las regiones de una misma categoría. Los valores mencionados anteriormente, se presentaron en el Cuadro 1.8.

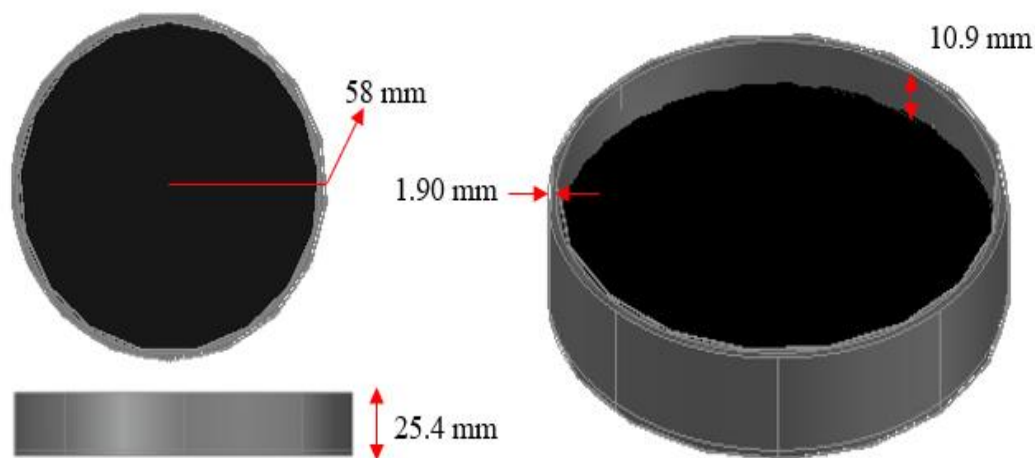
**Cuadro 1.8.** Valores de precipitaciones totales anuales por escalar, según cada categoría del IH aplicado a cada una de las regiones según la CMGV.

| Clasificación IH | Total de precipitación anual, TPA/ (L/ m <sup>2</sup> año) |
|------------------|--|
| Seca             | 1913.2   |
| Húmeda Seca      | 2828.6   |
| Húmeda           | 3747.2   |
| Muy Húmeda       | 3893.2   |

### b. Escalamiento geométrico

El escalamiento para simular las precipitaciones en el EEMA se basa en la geometría de los portamuestras. La norma ASTM D1669 indica que los portamuestras para asfaltos deben ser de aleaciones de aluminio como la 3003-H14. Además, se especifica que las dimensiones del portamuestra deben permitir un área mínima de 50 mm por 130 mm para la muestra de asfalto o ser de 70 mm por 150 mm. En ambos casos el valor de espesor admitido oscila entre los 0.64 mm a 1.90 mm (ASTM, 2019c).

En concordancia con las recomendaciones de la norma, para la elaboración del algoritmo de escalamiento se propone el uso de portamuestras cilíndricos huecos de 58 mm de radio (brindan un área equivalente a la que generan las dimensiones 70 mm por 150 mm) y un espesor igual al máximo de 1.90 mm. Además, se estimó una capa de asfalto de 1 cm para los ensayos. Los detalles de los porta muestras se observan en la Figura 1.14.



**Figura 1.14.** Detalle del porta muestras para los ensayos de envejecimiento de los asfaltos en el EEMA.

Para el escalamiento se requiere conocer el tiempo en el cual los aspersores pueden llenar el espacio sobre el asfalto en los portamuestras, además del volumen de dicho espacio y el área de la capa de asfalto. El valor conformado por las mediciones experimentales anteriormente postuladas se denominó intensidad de flujo de llenado o flux de llenado.

Seguidamente, el factor de escalamiento pluvial (FEP) es un valor que corresponde a la razón entre los TPA del Cuadro 1.6 y la intensidad de flujo de llenado, como se mostró en la ecuación 1.7.

$$FEP = \frac{TPA_R}{\dot{Q}_{LI}} \quad (1.7)$$

Donde,

FEP: Factor de escalamiento pluvial, min/ año.

TPA<sub>R</sub>: Total de precipitaciones anuales por región, L/ m<sup>2</sup> año.

$\dot{Q}_{LI}$ : Intensidad de flujo de llenado, L/ m<sup>2</sup> min.

La interpretación del FEP consiste en el tiempo requerido en minutos para escalar un año de lluvias de una región en una muestra de asfalto a una determinada intensidad de flujo de llenado. Finalmente, el flux de llenado implica el reemplazo del volumen de agua superficial sobre la muestra de asfalto por unidad de tiempo.

### c. Escogencia de la bomba para el sistema de aspersión

El criterio de escogencia de la bomba radica en dos aspectos esenciales para el funcionamiento del sistema de aspersión: que la presión en los aspersores sea la adecuada para generar rocío sin niebla y que la bomba cumpla requisitos técnicos y económicos mínimos, lo cual se trató más adelante.

Respecto al primer criterio sobre la presión de los aspersores, se consideró que la aspersión requerida fuera de tipo *spray* y no de niebla, puesto que para el diseño y escalamiento de las lluvias en el EEMA se contempló que toda la lluvia se presentó en fase líquida y no en fase coloidal (aerosol líquido).



Para que la aspersión sea tipo *spray* se requiere una presión entre 20 psi a 30 psi en el aspersor más lejano. Cabe destacar que la presión determina el tamaño de las gotas. El criterio para determinar la cantidad de aspersores a emplear es el área de riego (Kaune, 2010; NaaDanJain, 2018).

Se tiene en consideración que la bomba tenga suficiente potencia para el trasiego del agua, que alcance la presión requerida para suministrarla a los aspersores (pese a las pérdidas primarias y secundarias), pueda operar por ciclos definidos sin sobrecalentarse o sufrir daños eléctricos, que no tenga riesgo de cavitación evidente y que el costo se encuentre dentro del presupuesto del proyecto.

La bomba fue seleccionada usando software *EPANET* desarrollado por la *United States Environmental Protection Agency*, mediante el cual se pueden simular las pérdidas de presión en tuberías y el efecto de descarga del tanque de agua que alimenta al EEMA. El programa *EPANET* permite la simulación y el diseño de redes de tuberías para el suministro de agua potable y la construcción de un modelo de curva característica de bombeo a partir de datos de ficha técnica de las bombas (Rossman, 2006).

Los datos que se introdujeron al programa se clasifican en alguna de las siguientes categorías: valores geométricos, propiedades de los materiales y propiedades de los componentes del sistema de trasiego. Los valores geométricos se obtuvieron mediante mediciones del sistema de aspersión diseñado en AutoCAD®, en puntos clave para la simulación.

Por otro lado, las propiedades de los materiales del sistema de trasiego se obtuvieron de los textos de Mott (2006) y Welty *et al.* (2008) y las propiedades de los componentes del sistema de trasiego se obtuvieron de los datos proporcionados por los fabricantes.

Los planos de los diseños del EEMA y los materiales para su construcción se analizan y presentan de forma explícita en la sección 1.3 de Análisis de Resultados del Capítulo 1. La metodología proporcionada en esta sección permite validar y estudiar el diseño final, el cual es el producto del capítulo en curso.

Respecto a las configuraciones generales para la ejecución de la simulación en EPANET se establecieron como unidades de ensayo los litros por segundo; para la ecuación de pérdidas en la tubería se empleó el modelo de Darcy-Weisbach (Ecuación 1.8), se configuraron la viscosidad relativa y el peso específico con valor 1, lo cual implica que el fluido de trasiego es agua (Rossman, 2006).

$$R = \frac{8fL}{g\pi^2 D^5} \quad (1.8)$$

Donde,

R: Coeficiente de resistencia,  $s^2/m^5$ .

f: Factor de fricción de Darcy, adim.

L: Longitud del tramo de tubería, m.

g: Gravedad,  $m/s^2$ .

D: Diámetro de tubería, m.

Con base en lo anteriormente expuesto y para determinar el modelo de bomba a emplear en el EEMA se estudiaron las bombas: FORAS® (modelo PM60, centrífuga), Maute® (modelo WP120/2B612, periférica) y Toolcraft® (modelo TC2666, periférica), las cuales se observan en la Figura 1.15.



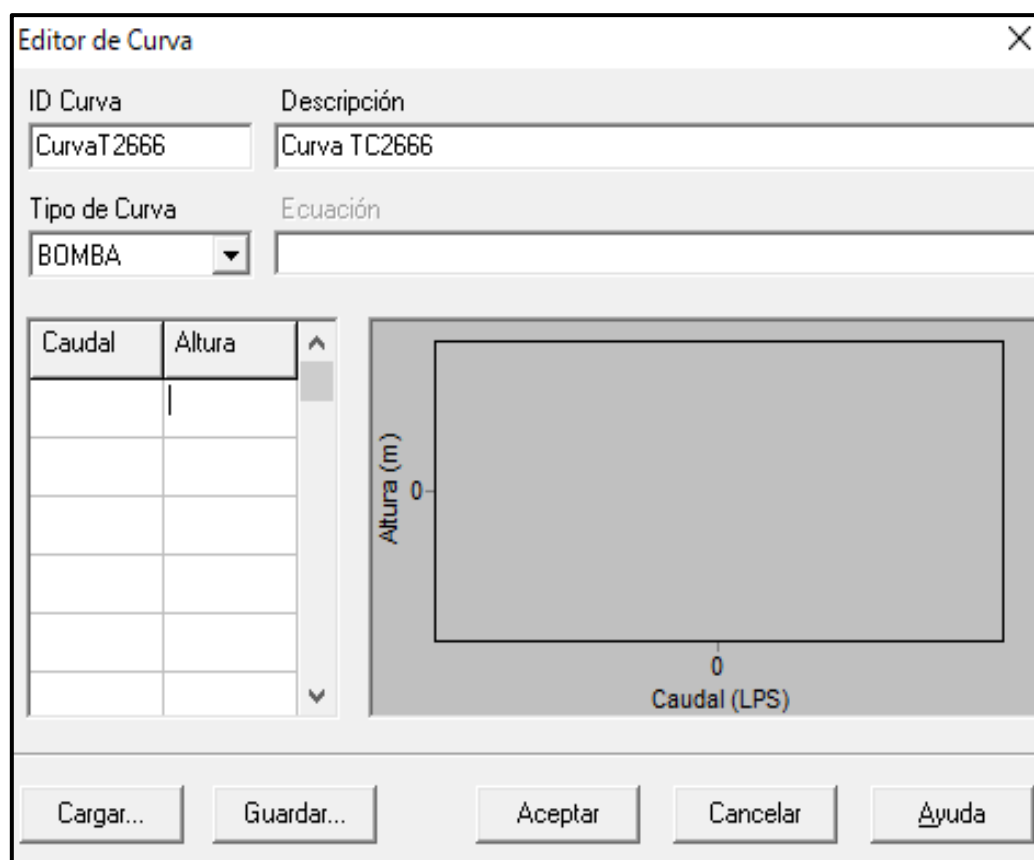
**Figura 1.15.** Modelos de bombas preseleccionadas para el sistema de aspersión: a) Maute® WP120/2B612; b) FORAS® PM60, y c) Toolcraft® TC2666.

Fuente: (EPA, 2021b, 2021c, 2021a).

Los datos de las fichas técnicas de los modelos de bombas de la Figura 1.15 empleados para estudiar mediante EPANET la selección del modelo fueron la cabeza y el caudal máximos de bombeo.

Estos valores se introducen en la configuración de curva característica de bombeo de EPANET como un par ordenado (caudal, cabeza de bombeo) y el programa añade dos puntos más, que corresponden a las intersecciones con el eje de la cabeza y con el eje de caudal. Dichas intersecciones corresponden a la cabeza máxima (es decir a caudal cero) y al caudal máximo (cabeza cero), respectivamente. Las aproximaciones que EPANET realiza son el 133 % de la cabeza introducida en el par ordenado y el doble del caudal establecido en dicho par (Rossman, 2006).

Seguidamente, la curva característica se elabora mediante la introducción de un par ordenado (caudal, cabeza de bombeo) tal que el modelo generado por EPANET coincida con las características técnicas del modelo de bomba evaluado. En la Figura 1.16 se observa el menú para establecer la curva de característica.



**Figura 1.16.** Ventana para configurar la curva característica de bombeo en el software EPANET.

Fuente: (Rossman, 2006).

El modelo que determina EPANET obedece a la forma de la Ecuación 1.9.

$$H = H_{m\acute{a}x} - A \cdot Q^2 \quad (1.9)$$

Donde,

$H$ : Cabeza de bombeo, m.

$H_{m\acute{a}x}$ : Cabeza de bombeo máxima, m.

$A$ : Coeficiente del modelo,  $m \cdot s^2 / L^2$ .

$Q$ : Caudal de bombeo, L/ s.

Finalmente, el criterio de selección de la bomba consiste en un cumplimiento conjunto de los requisitos técnicos y económicos. Para satisfacer el criterio técnico se requiere que la bomba sea capaz de trasegar el agua hasta los aspersores y alcanzar una presión de al menos 30 psi, lo cual se verifica al dibujar el diseño en EPANET, introducir las configuraciones expuestas con antelación y evaluar la presión en los puntos establecidos como los aspersores en el modelo de simulación.

#### 1.2.4. Diseño del EEMA

Como se mencionó en el apartado 1.2.2.c el EEMA corresponde a un prototipo basado en dos aspectos. El primero respecto a los requerimientos básicos de cámaras de envejecimiento acelerado comerciales como la QUV y, segundo, en aspectos fundamentales de las normas y guías ASTM D1669, ASTM D1670, ASTM G113, ASTM G141, ASTM G147, ASTM G151, ASTM G154 y, especialmente, la norma ASTM D4799.

Además, como el EEMA consiste en la modificación de un horno convectivo en desuso, un relé programable marca SIEMENS modelo LOGO! 230 RCE 0BA7, el cual se pretende aprovechar para accionar los ciclos y controlar aspectos de seguridad desde la interfaz de dicho PLC. En la Figura 1.17 se aprecia el PLC mencionado. La programación se trata en el capítulo 2, pero en el capítulo en curso se detalla el diseño del algoritmo del código.

En el diseño 3D del EEMA se empleó el software AutoCAD®. Las especificaciones consideradas para el diseño de cada uno de los sistemas se detallan en las secciones siguientes.



**Figura 1.17.** PLC Siemens LOGO! 230 RCE.

#### **a. Conceptos fundamentales del sistema de radiación**

Para el sistema de radiación lo recomendado según las guías ASTM G151 y G154 consiste en un sistema de control compuesto de los siguientes componentes a saber: varios radiómetros (la cantidad depende de la superficie donde se colocan las muestras de ensayo), un controlador de radiación con un valor predeterminado de irradiancia (*set point*) y bombillos UV fluorescentes de un único tipo (sin mezclar proveedores o distintas longitudes de onda) con regulador de potencia (ASTM, 2016a, 2019b).

El sistema anteriormente expuesto permite cumplir la premisa de la guía ASTM G151, la cual consiste en que las muestras deben estar expuestas a al menos un 70% de la irradiancia medible en el área de la cámara de ensayo y, además, que si esta es de al menos un 90% no se requiere el reposicionamiento de las muestras de ensayo (ASTM, 2019b).

Lo anterior aplicado al sistema de radiación del EEMA redujo la selección de bombillos UV según los criterios expuestos en el apartado 1.2.2.c debido a limitantes logísticas, ya que, de la oferta comercial, solamente los bombillos UV de Q-Lab poseen regulador de potencia, además de ser muy costosos para el proyecto. Por otro lado, los radiómetros encontrados de forma comercial no son programables en un sistema de control.

Todos los aspectos mencionados, además de la pérdida de potencia por envejecimiento de los bombillos, fueron factores que se consideraron a la hora de diseñar el sistema de irradiación del EEMA.

Como una disposición preliminar para el diseño del sistema de radiación, se requiere de cableado que tolere las temperaturas del horno durante los ensayos de envejecimiento de los asfaltos.

### **b. Conceptos fundamentales del sistema de aspersión**

Respecto al sistema de aspersión, la norma ASTM D4799 indica que las precipitaciones se pueden simular mediante ciclos de *spray* y/o condensado (aspersión tipo niebla). En cualquier caso, cuando se pasa del ciclo de precipitaciones al de radiación existe un efecto de evaporación que puede ser total (vaporización) al pasar al ciclo de radiación (ASTM, 2017b).

Como se mencionó en el apartado 1.2.3.c, se diseñó para el EEMA el sistema de aspersión de tipo *spray*, para el cual se aplicaron los criterios de escogencia de la bomba expuestos en el apartado mencionado.

Adicional a lo expuesto en el párrafo anterior, el sistema contempló para el tramo de descarga una válvula reguladora de presión (controla el tamaño de gota), un manómetro de glicerina y los aspersores seleccionados de la oferta comercial con base en los criterios de cobertura y funcionalidad a 30 psi o más para *spray* y no niebla.

Con base en la oferta comercial consultada y debido al riesgo de cavitación en la bomba, se consideró para el diseño un tanque de 208.2 L (55 galones), reciclar el agua que proviene del ensayo y operar el ciclo de precipitación durante un tiempo tal que el tanque no disminuya el nivel de agua hasta la línea de succión con el fin de prevenir que la bomba aspire aire y potenciales daños al equipo. Cabe destacar que el sistema de reciclo consideró que la caída de agua de retorno al tanque no genere espuma que pueda aspirar la bomba y cavitarse.

Por otro lado, la norma ASTM D4799 y la guía ASTM G151 indican que el agua por emplear debe cumplir con una conductividad menor a 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , poseer menos de 1 ppm en sólidos y

0.1 ppm en sílice, además el pH debe reportarse (ASTM, 2017b, 2019a). Con el fin de facilitar ese tipo de mediciones al analista, el diseño incluye amplia accesibilidad al agua del ensayo.

### **c. Conceptos fundamentales del sistema de temperatura**

Debido a que el prototipo EEMA es una modificación del horno convectivo observado en la Figura 1.13, el sistema para aumentar temperatura ya viene incorporado. Sin embargo, el funcionamiento de este sistema en conjunto con los sistemas de precipitación y radiación se evaluó en el capítulo dos, como parte de las pruebas de operabilidad.





### **1.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Con base en el desarrollo de la metodología de diseño, se definieron los siguientes aspectos que, integrados, establecen el diseño del EEMA.

#### **1.3.1. Suposiciones del diseño**

Los supuestos de diseño empleados se pueden organizar en tres categorías: clasificación regional, acumulación y base temporal para escalamiento. Cada una de estas se aborda a continuación.

Como primer aspecto, la metodología de la toma de datos meteorológicos difiere a las empleadas en los trabajos de Sánchez (2017) y Rojas (2020) debido a que se partió de la regionalización con base en la CMGV propuesta por Orozco (2007), la cual se fundamenta el IH, que se asocia a las precipitaciones.

Con base en lo anteriormente expuesto, se desarrolló el primer supuesto de diseño (clasificación regional), el cual consistió para el desarrollo de los escalamientos por región con base en las precipitaciones, debido a que su mayor o menor incidencia influye en la radiación que llega a la superficie, la temperatura superficial y en la cantidad de humedad a la que se exponen los asfaltos.

Por otro lado, a diferencia de lo expuesto por Sánchez (2017) y Rojas (2020), se consideró el valor diario promedio de radiación de cada mes por región, según las correspondencias entre los mapas de radiación de Wright (2008) con las regiones de la CMGV, los cuales fueron multiplicados por el número de días del respectivo mes para obtener un valor de radiación promedio mensual acumulado y no el valor diario promedio. En el Apéndice A se muestran los valores acumulados de cada mes por región y el acumulado anual.

Según lo planteado en el párrafo anterior, el segundo supuesto de diseño (acumulación) es el escalamiento con base en parámetros meteorológicos promedios acumulados, con el fin de considerar la tendencia central de los datos por región para cada mes, ya que los asfaltos en servicio envejecen como el resultado de una exposición continua a los diversos factores de la intemperie.

Finalmente, el tercer supuesto de diseño (base temporal para escalamiento), consistió en emplear acumulados anuales, por lo que los ciclos que se propusieron más adelante son para simular un año de exposición a la intemperie en determinada región con base en la tendencia central de los datos meteorológicos disponibles.

### 1.3.2. Tratamiento estadístico de la temperatura mínima

Como se mostró en el apartado 1.2.1.a, se demostró que no se pudo aplicar un análisis de varianza (ANOVA) clásico, para clasificar grupos de regiones meteorológicas con temperaturas mínimas estadísticamente distintas. Lo anterior debido a que las temperaturas mínimas recabadas para cada región por mes (ver los cuadros del Apéndice A), no siguen una distribución normal y la igualdad de varianzas es ambivalente según los dos métodos de comprobación de Minitab® 18.

Ante lo anteriormente expuesto se planteó una prueba no paramétrica de igualdad de medias llamada Prueba de la Mediana de Mood en conjunto con el método de comparaciones múltiples para clasificar las regiones de la CMGV, según la temperatura mínima.

Las hipótesis que se plantearon de previo a la Prueba de la Mediana de Mood se muestra en la Ecuación 1.10:

$$\begin{aligned} H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n \\ H_1: \mu_i \neq \mu_j; \text{para algún grupo } i \neq j \end{aligned} \quad (1.10)$$

Donde,

$H_0$ : Hipótesis nula.

$H_1$ : Hipótesis alternativa.

$\mu$ : Media de un conjunto de datos.

La Ecuación 1.10 indica que el resultado de la Prueba de la Mediana de Mood puede indicar que todas las temperaturas mínimas promedio de cada una de las regiones de la CMGV son estadísticamente iguales a un nivel de significancia dado. Para efectos del diseño del EEMA se empleó una significancia del 5% y se introdujeron los datos de la columna 8 de todos los cuadros del Apéndice A en el programa Minitab® 18.

| Prueba de la mediana de Mood: Datos en función de Región |         |                         |                        |         |                         |  |
|--|---------|-------------------------|------------------------|---------|-------------------------|--|
| Estadísticas descriptivas                                |         |                         |                        |         |                         |  |
| Región   | Mediana | Mediana general de N <= | Mediana general de N > | Q3 - Q1 | IC de la mediana de 95% |  |
| C  | 22.0125 | 4                       | 8                      | 1.48125 | (20.9592; 22.4355)      |  |
| CA   | 22.0125 | 4                       | 8                      | 1.48125 | (20.9592; 22.4355)      |  |
| CGT  | 24.1500 | 0                       | 12                     | 1.50000 | (23.2316; 24.7211)      |  |
| CS   | 22.5500 | 3                       | 9                      | 1.41250 | (21.4421; 22.85)        |  |
| GNG  | 22.9000 | 0                       | 12                     | 0.87500 | (22.5221; 23.3937)      |  |
| LS   | 15.6000 | 12                      | 0                      | 0.93750 | (14.8763; 15.8105)      |  |
| N  | 20.8000 | 12                      | 0                      | 1.05000 | (20.2263; 21.2737)      |  |
| NA   | 21.5000 | 6                       | 6                      | 1.57500 | (20.4052; 21.9737)      |  |
| PC   | 22.8500 | 0                       | 12                     | 0.60000 | (22.5526; 23.1474)      |  |
| PN   | 22.4000 | 4                       | 8                      | 2.30000 | (20.6842; 22.9737)      |  |
| PS   | 22.6000 | 0                       | 12                     | 0.70833 | (22.0544; 22.7579)      |  |
| T  | 16.1750 | 12                      | 0                      | 0.75000 | (15.6263; 16.3737)      |  |
| UC   | 22.5000 | 3                       | 9                      | 1.75833 | (21.1245; 22.8719)      |  |
| VC   | 17.0583 | 12                      | 0                      | 1.06458 | (16.3680; 17.4276)      |  |
| VCP  | 9.9000  | 12                      | 0                      | 1.41667 | (8.74560; 10.1579)      |  |
| VG   | 20.8000 | 12                      | 0                      | 0.85000 | (20.0526; 20.9)         |  |
| Largo plazo  | 21.4833 |                         |                        |         |                         |  |

| Prueba            |   |         |
|-------------------|---|---------|
| Hipótesis nula    | H <sub>0</sub> : Las medianas de población son todas iguales    |         |
| Hipótesis alterna | H <sub>1</sub> : Las medianas de población no son todas iguales |         |
| GL                | Chi-cuadrada  | Valor p |
| 15                | 130.00  | 0.000   |

**Figura 1.18.** Resultado de la Prueba de la Mediana de Mood brindado por el programa Minitab® 18 para la temperatura mínima promedio de cada mes de cada región de la CMGV.

Con base en el valor-p observado en la Figura 1.18, se determinó que al menos un par de regiones de la CMGV difieren estadísticamente por la media de sus temperaturas mínimas con una significancia del 5%.

Debido al rechazo de la hipótesis nula, se procedió a emplear el método de comparaciones múltiples, que se observa en la Ecuación 1.11, para identificar y clasificar las diferencias detectadas.

$$\overbrace{\left| \frac{R_j}{n_j} - \frac{R_i}{n_i} \right|}^A > Z_{1-\alpha/2} \overbrace{\sqrt{\frac{N_T (N_T + 1)}{12} \left( \frac{1}{n_j} + \frac{1}{n_i} \right)}}^B, \text{ con: } i \neq j \quad (1.11)$$

Donde,

$R_i$ : Sumatoria de temperaturas mínimas mensuales para la  $i$ -ésima región, °C.

$R_j$ : Sumatoria de temperaturas mínimas mensuales para la  $j$ -ésima región, °C.

$n_i$ : Número de datos de temperatura mínima de la  $i$ -ésima región, adim.

$n_j$ : Número de datos de temperatura mínima de la  $j$ -ésima región, adim.

$Z_{1-\alpha/2}$ : Valor del estadístico normal  $Z$  para un 5% de significancia, adim.

$N_T$ : Número total de datos de temperaturas mínimas en estudio, adim.

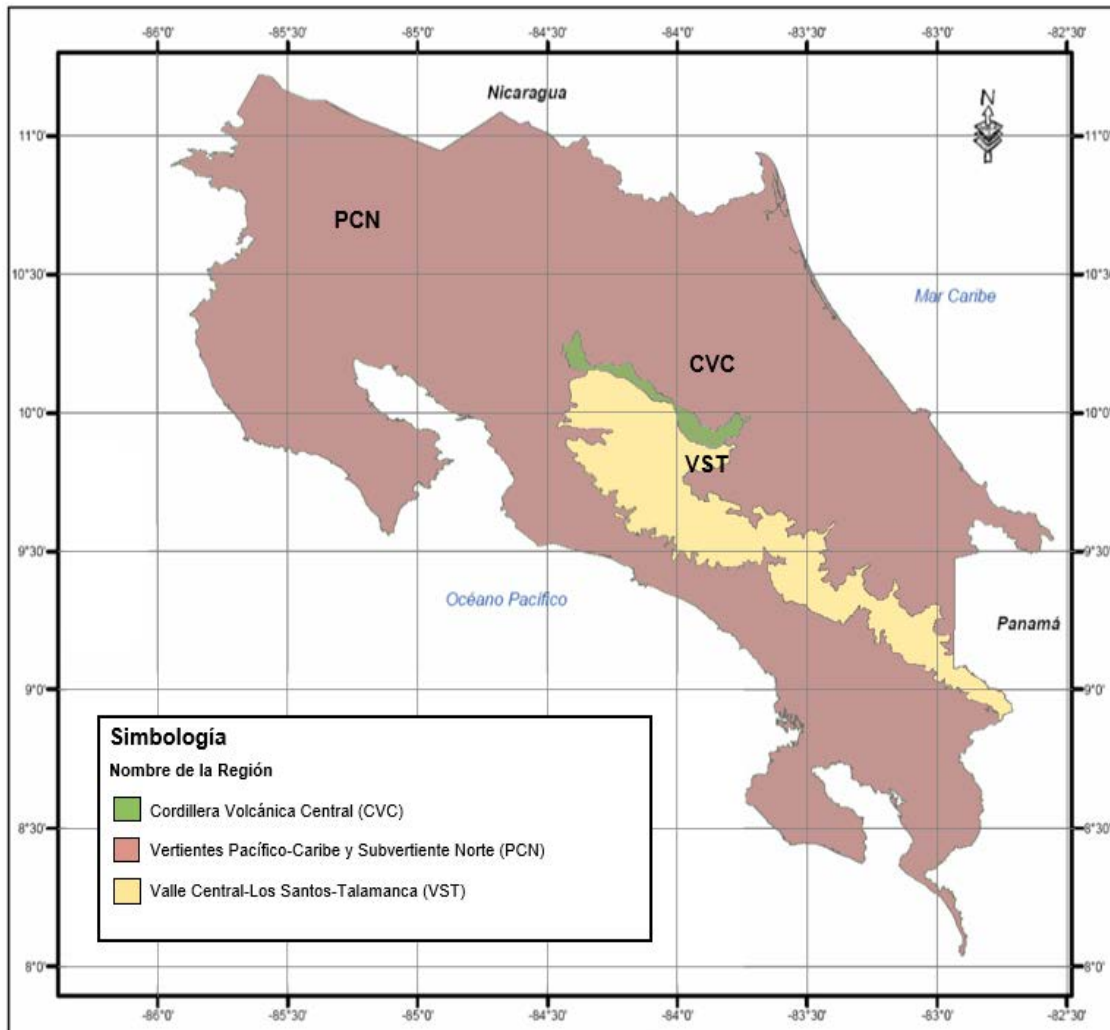
El resultado del estadístico de la expresión 1.11, se observa en el Cuadro B.3 del Apéndice B, en el cual se evidenciaron las parejas de regiones con una temperatura mínima promedio estadísticamente diferente al 5% de significancia, cuando el valor de A es estrictamente mayor al valor de B.

Con base en las diferencias identificadas en el Cuadro B.3, se agruparon las regiones estadísticamente iguales y se determinaron, como valores de temperaturas mínimas representativas para cada región, el menor valor de temperatura para cada categoría.

Lo mencionado con antelación se observa en el Cuadro B.4, que se implementó para el desarrollo de la Figura 1.19, la cual muestra las regiones en las que se divide Costa Rica, según las temperaturas mínimas estadísticamente distintas.

Cabe destacar que los datos obtenidos de temperaturas mínimas se tomaron como los valores mínimos de temperatura para los ensayos en el EEMA, según sea el clima que se requiera simular para envejecer el asfalto de forma similar a las condiciones de servicio.

Por otro lado, como se observa en el Cuadro B.4, la temperatura menor de ensayo corresponde a 8.27 °C (correspondiente a la zona Volcánica Central Pacífico), lo cual requiere que se contemple para el diseño del EEMA, un sistema de refrigeración, que debido a los alcances del proyecto y a las capacidades del equipo de la Figura 1.13, no se desarrolló.



**Figura 1.19.** Zonificación de Costa Rica según las temperaturas mínimas estadísticamente distintas.

Finalmente, a modo de diferenciar la regionalización según la CMGV, se nombraron las regiones de Temperatura Mínima Alta ( $T_a$ ), Temperatura Mínima Media ( $T_i$ ) y Temperatura Mínima Baja ( $T_b$ ) como Vertientes Pacífico-Caribe y Subvertiente Norte (PCN), Valle Central-Los Santos-Talamanca (VST) y Cordillera Volcánica Central (CVC), respectivamente.

### 1.3.3. Temperatura máxima

El parámetro de temperatura máxima para el diseño de ensayos del EEMA se realizó con base en lo expuesto por Elizondo *et al.* (2013), ya que se contemplaron los valores de temperaturas

máximas en los asfaltos por región (en la Figura 1.2 se observó la CTAPG), lo cual brinda una perspectiva más aproximada a las condiciones de servicio de los asfaltos.

Cabe destacar que el criterio de selección de temperaturas máximas (relativo al material) difiere al de las temperaturas mínimas (criterio meteorológico) debido a que, durante la noche (usualmente temperaturas menores), no existe una influencia solar, lo cual facilita que el asfalto alcance equilibrio térmico con el ambiente (Welty *et al.*, 2008).

Lo anteriormente expuesto no aplica a las temperaturas máximas, pues durante el día, factores como la radiación, la nubosidad entre otros, influyen de forma significativa en la temperatura del asfalto, por lo que suponer equilibrio térmico con el ambiente no es una buena aproximación a las condiciones de servicio de los asfaltos.

En el Cuadro 1.1, se observan que las temperaturas máximas del asfalto para la CTAPG propuesta por Elizondo *et al.* (2013), las cuales se emplearon en el diseño de los ciclos de ensayo y como parámetros para la selección de materiales.

#### **1.3.4. Escalamiento de la radiación**

Para el escalamiento de la radiación se emplearon los procedimientos descritos en las secciones 1.2.1.c y 1.2.2. Lo expuesto en la sección 1.2.1 se utilizó para establecer la clasificación regional según el IRS (ecuación 1.2) que se muestra en el apéndice B, Cuadro B.1.

Por otro lado, la sección 1.2.2 se enfocó en dos aspectos: el primero, en el algoritmo para tratar los datos de los fabricantes de los bombillos en estudio, con el fin de obtener parámetros de irradiancia e irradiancia espectral; el segundo, para obtener los valores de radiación a escalar, según el supuesto proporcionado por Rojas (2020) y Sánchez (2017).

Seguidamente, se trataron aspectos particulares asociados al escalamiento de la radiación en el EEMA, como son el IRS propuesto para las regiones de la CMGV, el uso de valores acumulados de radiación, el estudio de la oferta comercial de bombillos UV y los resultados obtenidos sobre los tiempos equivalentes en el escalamiento de la radiación solar como parte de los ciclos operativos de diseño para los ensayos de envejecimiento acelerado de los asfaltos en el EEMA.

### **a. Sobre el IRS propuesto**

Durante la investigación y procesamiento de los datos meteorológicos de radiación solar directa<sup>7</sup> en Costa Rica se postuló el IRS (índice de radiación solar), mediante la ecuación 1.2, con el fin de facilitar la clasificación regional.

Para la composición de la ecuación 1.2, como se indicó en la sección 1.2.1.c, se consideró que durante los días sin lluvia es más probable una mayor incidencia de la radiación directa. Además, como el nivel de radiación solar de una región se afecta por la nubosidad, los días sin lluvia se consideraron como un valor de intensidad y multiplicador a la radiación solar medida por Wright (2008) para cada región.

El producto entre los días sin lluvia y la radiación solar por región se pondera entre la radiación solar total del país multiplicada por 365 días. El resultado de la ecuación 1.2 brinda un valor adimensional que se interpretó con el Cuadro 1.5, para clasificar cada región por baja, media o alta irradiancia.

Por otro lado, se consideró para los días sin lluvia, que toda la radiación medida por Wright (2008) corresponde a radiación directa, pues es más energética y como suposición teórica, contribuye mejor a vencer la energía de activación en las reacciones de envejecimiento de los asfaltos.

### **b. El acumulado de radiación solar**

Como se explicó en la sección 1.3.1, se empleó el supuesto de valores acumulados. Esto se aplicó para la radiación solar, puesto que en metodologías como las de Rojas (2020) y Sánchez (2017), se consideraron para los escalamientos un valor puntual de radiación solar que es equivalente a promediar los valores de radiación solar diarios de un mes e indicar que ese valor es representativo para escalar, según el tiempo de ensayo, días, meses o años.

Sin embargo, los pavimentos asfálticos en servicio durante un determinado tiempo se ven expuestos a un flujo continuo de fotones, los cuales están cargados energéticamente. La

---

<sup>7</sup> La que proviene directamente del Sol, sin haber sido dispersada por las partículas de la atmósfera (Hernández, 2014).

energía que estas partículas acarrean se disipa durante la colisión en la superficie; parte de dicha energía es absorbida por el asfalto y otra es reflejada (radiación reflejada). La consideración de un valor acumulado de radiación solar se debe a que los fotones que impactan al pavimento en un determinado tiempo no son los mismos que cederán parte de su energía en otro instante posterior a la acción de los primeros.

Lo anteriormente expuesto, sugiere que los pavimentos asfálticos absorben una cantidad continua de energía durante un tiempo determinado, es decir, un valor acumulado. Una analogía que puede facilitar la comprensión del fenómeno de acumulación de la radiación, es aplicar el mismo principio a la piel: si se expone la piel a la luz solar de medio día por un breve instante, no ocurre una afectación grave sobre el biomaterial (piel), pero una exposición continua (acumulado de radiación), propicia daños como quemaduras o comportamientos anómalos en las células como el cáncer, en otras palabras, el biomaterial sufre daños por efectos acumulados en la exposición prolongada.

Para incluir el efecto de acumulación en el diseño de los ciclos de radiación del EEMA, se consideró el valor de radiación solar diario promedio para cada mes por región y se multiplicó dicho valor por el número de días del mes en cuestión (datos de los Cuadros del apéndice A, columna 10) y se efectuó una sumatoria de la radiación acumulada promedio mensual por región, con lo cual se obtuvieron los valores de radiación acumulada anual para el escalamiento (supuesto de escalamiento respecto a un año, expuesto en la sección 1.3.1).

Cabe destacar que, al considerarse los valores de radiación diaria promedio por mes, existe un sesgo a la naturaleza de la radiación solar como fenómeno meteorológico, puesto que hay días de menor o mayor radiación para un mismo mes.

Sin embargo, al emplearse el promedio se pretende un equilibrio, puesto que la radiación diaria promedio es mayor que la radiación en días de baja irradiancia, pero menor a la presente en días de alta irradiancia.

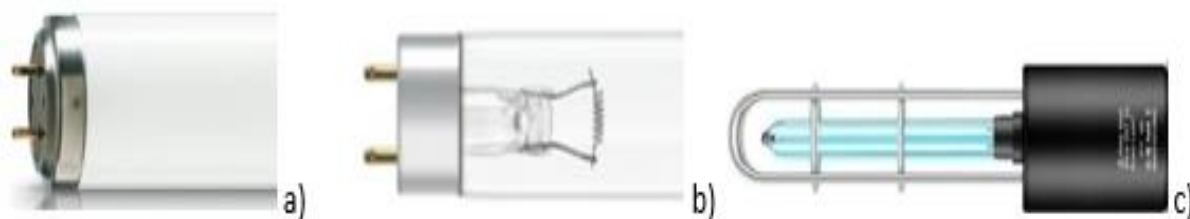


Finalmente, no es viable (a nivel prototipo) conseguir un ajuste fiel a la gran variabilidad del tiempo meteorológico o predecir con alta precisión dicha variabilidad en un equipo de laboratorio.

### c. Sobre el estudio técnico de la oferta comercial de bombillos UV

Para el estudio de la oferta comercial de los bombillos UV mostrados en el Cuadro 1.7, se aplicaron, a modo de preselección, los criterios expuestos, también, en el Cuadro 1.7. Con ello se descartaron del estudio técnico los bombillos Ultra Vitalux 300 W de OSRAM (criterio económico) y los UVB-313 de Q-lab (criterios económico y geométrico).

Si bien los modelos Philips TL 20 W/01 RS SLV/25 (Figura 1.20.a), OSRAM HNS 15 W G13 (Figura 1.20.b) y UV Disinfection Lamp (Figura 1.20.c), no cumplen con todos los criterios, son opciones viables, ya que los aspectos de no conformidades son compensables.



**Figura 1.20.** Modelos de bombillos preseleccionados para el estudio técnico: a) Philips TL 20 W/01 RS SLV/25; b) OSRAM HNS 15 W G13 y c) UV Disinfection Lamp.

Los resultados de los estudios técnicos con base en la metodología de la sección 1.2.2, en la cual se aplicaron las ecuaciones 1.3, 1.4, 1.5 y 1.6, se observan en los Cuadros B.5, B.6 y B.7 del apéndice B.

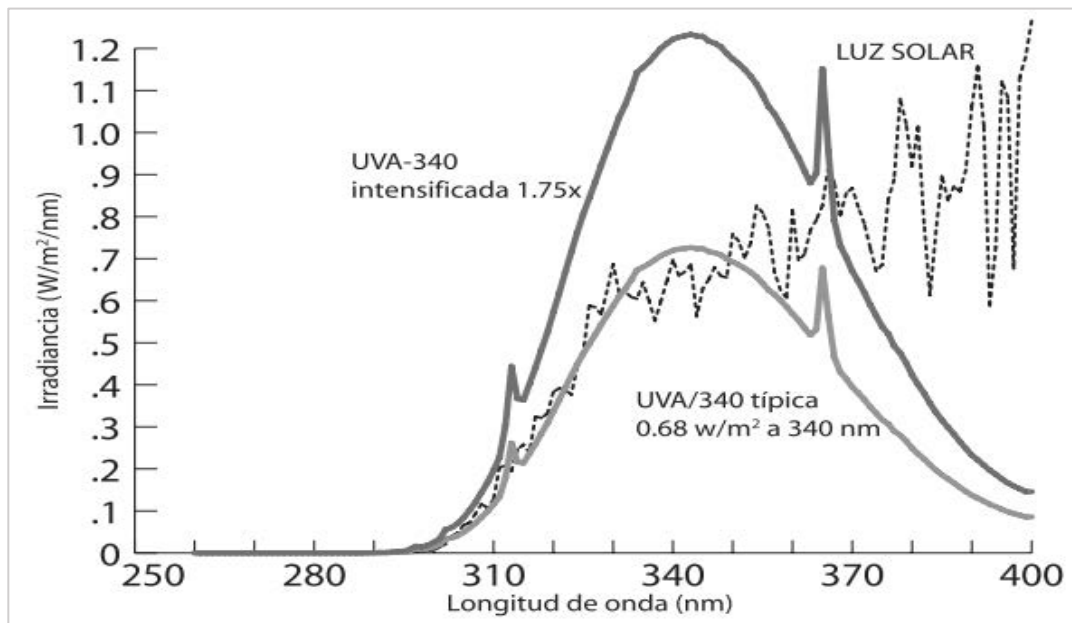
Para la ejecución de los estudios técnicos se consideraron las especificaciones y un supuesto expuestos en el Cuadro 1.9.

**Cuadro 1.9.** Especificaciones y supuesto considerados en el estudio técnico de los bombillos UV: Philips TL 20 W/01 RS SLV/25, OSRAM HNS 15 W G13 y UV disinfection Lamp, para el cálculo de la irradiancia y la irradiancia espectral.

| Supuesto               | Especificaciones                  | Valor                  |
|------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| Campana de irradiancia | Radio de irradiación, $R_d$ / (m) | 0.465                  |
|                        | Velocidad de la luz, $c$ / (m/ s) | $3.00 \times 10^8$     |
|                        | Constante de Plank, $h$ / (J·s)   | $6.63 \times 10^{-34}$ |

Durante la etapa de diseño y de previo a la compra de los bombillos UV, no se midieron los espectros de emisión de los modelos preseleccionados debido a limitaciones con los recursos disponibles para la ejecución del proyecto. Por ello, los estudios técnicos se llevaron a cabo con base en la información de la ficha técnica del proveedor.

El primer supuesto del Cuadro 1.9, refiere a la irradiancia como una curva con forma de campana. La irradiancia se grafica como dependiente de la longitud de onda y cuando presenta el comportamiento de una campana luce como la irradiancia de las lámparas Q-Lab de la Figura 1.21.



**Figura 1.21.** Espectro de irradiancia de la bombilla Q-Lab modelo UVA-340 en nivel típico y amplificado en comparación con el espectro de irradiancia de la luz solar.

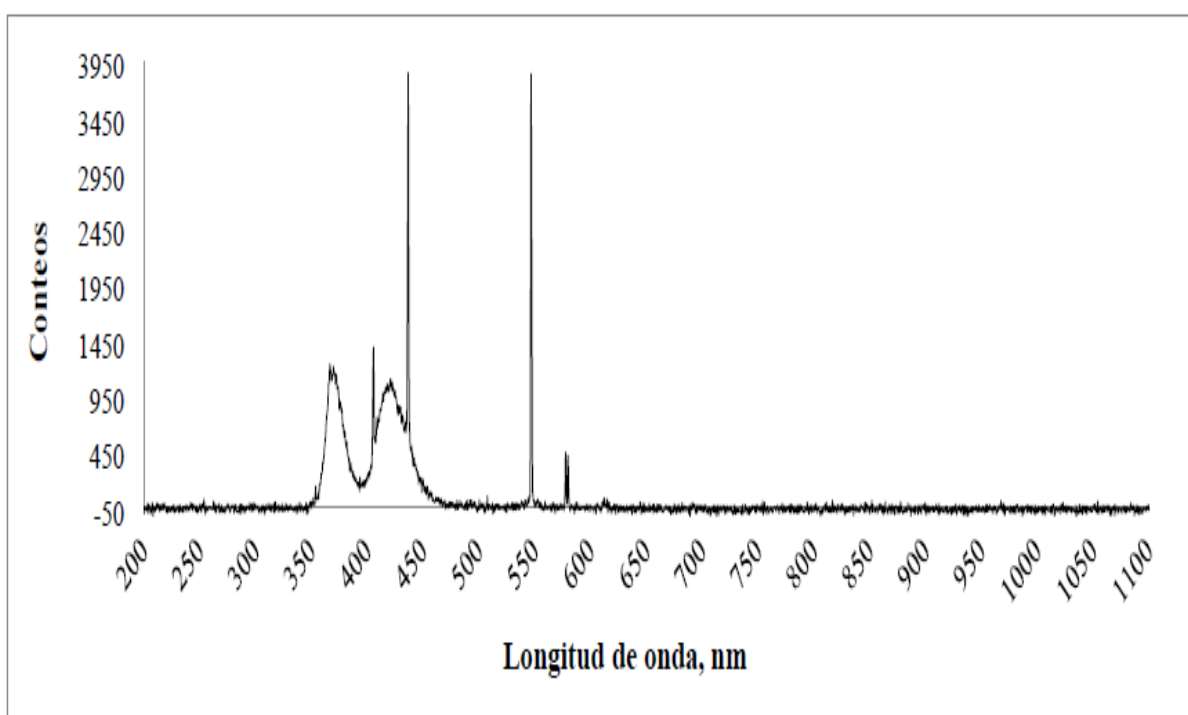
Fuente: (Q-Lab, 2006)

En la etapa de diseño del presente capítulo, se contempló, de forma empírica, que el supuesto de la campana de irradiancia no se cumple para ninguno de los modelos de la Figura 1.20, con una alta probabilidad. Lo anterior debido al bajo costo de los tres modelos (el OSRAM HNS 15W tiene un costo de 5.92 USD por unidad<sup>8</sup>) expuestos, debido a que un bombillo con alta irradiancia supone mayor complejidad técnica y, por ello, un mayor costo.

<sup>8</sup> Precio tomado del catálogo en línea de Bullbtronics Group (BTG, 2021).

Sin embargo, se consideró sobreestimar el diseño debido a que los fabricantes reportan en las fichas técnicas un rango de longitudes de onda, por ello no se puede especificar con criterio objetivo, las longitudes de onda que emite alguno de los modelos de bombillos preseleccionados de forma exacta.

Cuando el supuesto de campana de irradiancia no se cumple, el espectro de emisión (no de irradiancia) de un bombillo se observa como el que se muestra en la Figura 1.22, el cual pertenece a los bombillos empleados por Rojas (2020) y Sánchez (2017).



**Figura 1.22.** Espectro de emisión de los bombillos UV empleados en los primeros diseños de un horno UV en el LanammeUCR.

Fuente: (Rojas, 2020; Sánchez, 2017).

Debido a lo expuesto con antelación, las emisiones de los bombillos Q-Lab son más energéticas y garantizan alcanzar un acumulado de radiación con mayor rapidez respecto a los bombillos de Rojas (2020) y Sánchez (2017).

Todo lo anterior, permite inferir que los modelos preseleccionados poseen, con alta probabilidad, un espectro de emisión con un comportamiento similar al mostrado por los bombillos de la Figura 1.22.

En la Figura 1.23, se observa parte de la ficha técnica del modelo OSRAM HNS 15 W G13 y se indica el rango de longitudes de onda para el estudio técnico.

### Datos técnicos

#### Información de producto

|                        |             |
|------------------------|-------------|
| Referencia para pedido | HNS 15W G13 |
|------------------------|-------------|

#### Datos eléctricos

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| Tensión nominal           | 55,0 V  |
| Tensión de funcionamiento | 55 V    |
| Tensión de construcción   | 55,00 V |
| Corriente nominal         | 0,33 A  |
| Corriente de lámpara      | 0,33 A  |
| Potencia nominal          | 15,00 W |

#### Datos Fotométricos

|                            |         |
|----------------------------|---------|
| Intensidad luminosa        | 7800 cd |
| Radiación UVC 200...280 nm | 4.9 W   |

**Figura 1.23.** Datos técnicos del modelo OSRAM HNS 15 W G13. En la figura se aprecia el rango de longitudes de onda considerado para el sobreestimado en el estudio técnico.

Otro aspecto de diseño considerado en el EEMA a diferencia de los diseños propuestos por Rojas (2020) y Sánchez (2017), consiste en que la irradiancia se calculó considerando una esfera de emisión, cuyo radio es la distancia entre los bombillos y las muestras de asfalto, en los diseños previos al EEMA se consideró que la irradiancia corresponde a una razón entre la potencia nominal del bombillo y el área del plano en el cual están las muestras, lo cual es erróneo, ya que se ignora la relación inversamente proporcional entre la irradiancia y la proximidad al cuerpo emisor de dicha radiación.

Los resultados de aplicar los estudios técnicos a los modelos preseleccionados se observan en el Cuadro 1.10.

**Cuadro 1.10.** Valores de irradiancia e irradiancia espectral a un radio de 46.5 cm calculados con base en los rangos de longitud de onda y potencias nominales.

| <b>Modelo</b>        | <b>Rango de longitud de onda, (nm)</b> | <b>Potencia nominal, (W)</b> | <b>Irradiancia, (W/ m<sup>2</sup>)</b> | <b>Irradiancia espectral, (W/ m<sup>2</sup> nm)</b> |
|----------------------|--|------------------------------|--|---|
| TL 20W/01 RS SLV/25  | 290-315                                | 20                           | 191.38                                 | 0.633   |
| HNS 15 W G13         | 200-280                                | 15                           | 447.16                                 | 1.881   |
| UV Disinfection Lamp | 185-254                                | 5                            | 128.81                                 | 0.592   |

Cabe destacar que durante la posible ejecución de los ensayos de radiación los valores de irradiancia obtenidos para los bombillos permanecerían casi constantes. La variación sería levemente decreciente y debida a un deterioro paulatino de los bombillos, el cual se aborda en la sección 1.3.6.

Con base en lo anteriormente expuesto, el modelo de bombillo escogido para el diseño del EEMA fue el OSRAM HNS 15 W G13, debido a que su aporte energético teórico es mayor, se encuentra disponible para importación hacia Costa Rica, su precio es asequible y, a nivel geométrico, cabe dentro del horno convectivo base para el EEMA.

El único criterio que no satisface, según el Cuadro 1.7, es el técnico. Lo anterior se debe a que lo recomendable en ensayos de envejecimiento acelerado es la radiación UVA o UVB, mientras que el modelo OSRAM HNS 15 W G13 posee UVC. Sin embargo, en todos los estudios analizados y recopilados para el diseño del EEMA, no se evidenciaron datos o estudios concretos sobre el uso de UVC en el envejecimiento de los asfaltos.

Se tiene la hipótesis que al emplear UVC se puedan superar fácilmente las energías de activación de las reacciones de envejecimiento de los asfaltos sin incurrir en reacciones antinaturales al fenómeno en cuestión. De este modo, se podrían acelerar los ensayos de envejecimiento y comprender mejor el comportamiento de los asfaltos a lo largo de su vida útil.

Además de la hipótesis anteriormente planteada, se escogió el modelo OSRAM HNS 15 W G13 debido a que el modelo Philips TL 20W/01 RS SLV/25 no se encuentra disponible para importar a Costa Rica y, por otro lado, el modelo UV Disinfection Lamp se alimenta mediante

una batería integrada recargable, lo cual dificulta la manipulación electrónica para adecuarlo al diseño del EEMA.

Finalmente, cabe destacar que los valores obtenidos en el Cuadro 1.10 se encuentran dentro del rango de magnitud de los valores típicos de irradiancia espectral, pues según se puede apreciar en la Figura 1.19, el modelo UVA-340 de Q-Lab opera a  $0.68 \text{ W/ m}^2 \text{ nm}$ , un valor semejante a los  $0.633 \text{ W/ m}^2 \text{ nm}$  del modelo Philips.

#### d. Resultados del escalamiento

Para efectos del escalamiento, se consideró la instalación de tres bombillos OSRAM HNS 15W G13, con lo cual, al aplicar el cociente entre los valores del Cuadro 1.6, columna 3 y la irradiancia conjunta de los tres bombillos y convertir dicha razón de segundos a horas, se obtuvieron los tiempos de exposición requeridos para alcanzar el acumulado de radiación anual para las zonas de baja, media y alta irradiancias (ver Cuadro 1.11).

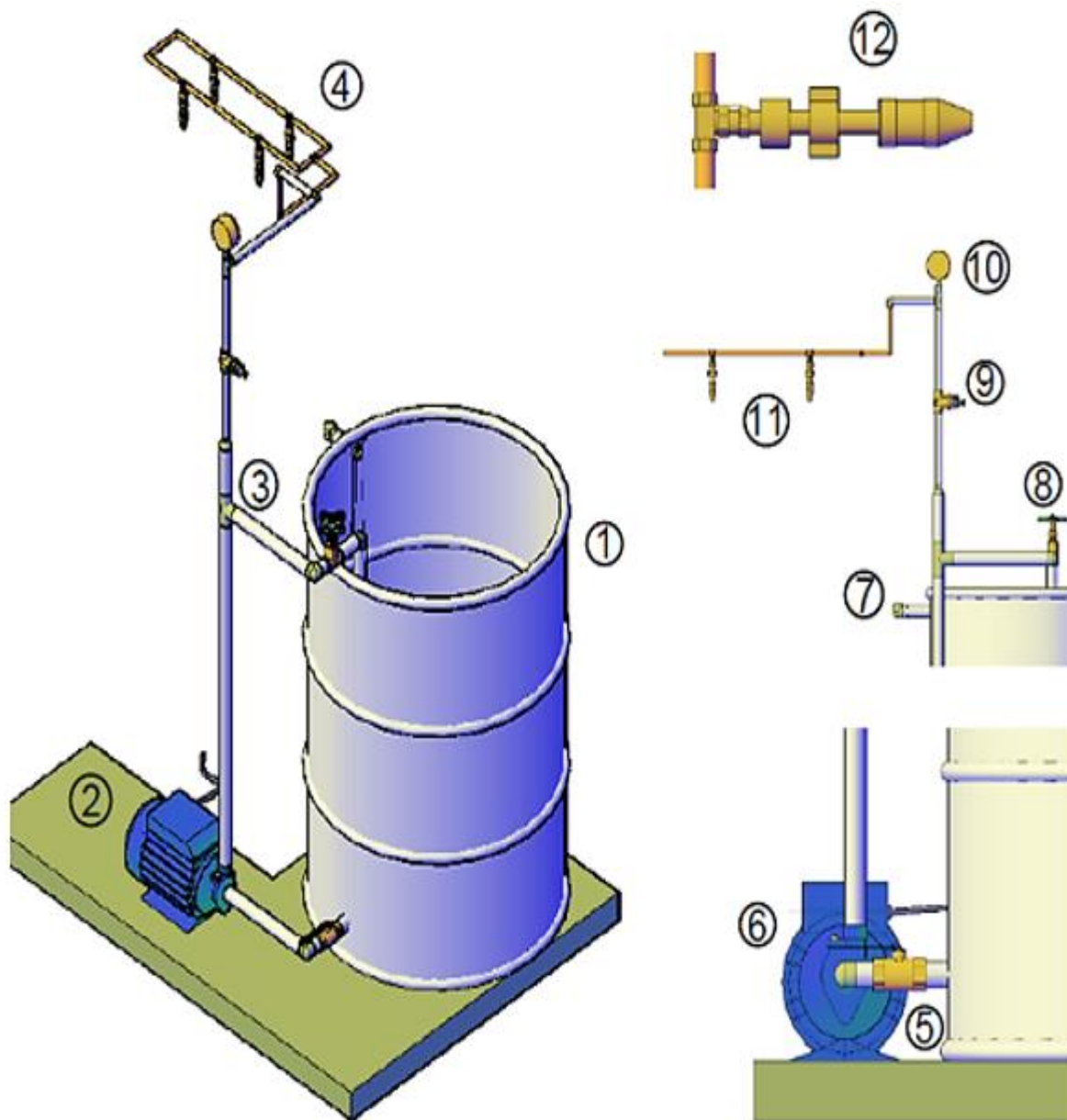
**Cuadro 1.11.** Tiempos de exposición requeridos para alcanzar el acumulado de radiación UV anual mediante la emisión de tres bombillos OSRAM HNS 15 W G13.

| Regiones generales según el<br>IRS | Tiempo de exposición,<br>$t_{EXP}$ (h) | Tiempo de exposición,<br>$t_{EXP}$ (días) |
|------------------------------------|--|---|
| Baja Irradiancia                   | 44.97                                  | 1.87                                      |
| Media Irradiancia                  | 51.94                                  | 2.16                                      |
| Alta Irradiancia                   | 56.67                                  | 2.36                                      |

Cabe destacar que los tiempos propuestos pueden variar si al realizar las mediciones de los espectros de irradiancia de los bombillos OSRAM HNS 15 W G13 no se cumple el supuesto de campana de irradiancia, en tal caso, se puede hacer uso de la relación inversamente proporcional entre el radio de la esfera de irradiancia y la irradiancia con el fin de compensar la falta de densidad de potencia.

### 1.3.5. Escalamiento de precipitaciones

Para un análisis integral al abordaje del escalamiento de precipitaciones en el EEMA se discutieron en la presente subsección, aspectos como el diseño del sistema de aspersion (ver Figura 1.24), los resultados de simulación, el cálculo de la intensidad de flujo de llenado teórica y los FEP obtenidos por región.



| IDEM | Descripción                               | IDEM | Descripción                          |
|------|---|------|--------------------------------------|
| 1    | Tanque de agua                            | 7    | Retorno                              |
| 2    | Zona de succión                           | 8    | Válvula de compuerta                 |
| 3    | Bypass regulador de caudal                | 9    | Válvula reguladora de presión 1/2 in |
| 4    | Zona de aspersión                         | 10   | Manómetro de glicerina               |
| 5    | Válvula de bola                           | 11   | Ramal de aspersión                   |
| 6    | Bomba periférica Toolcraft TC26666 1/2 Hp | 12   | Aspersor de bronce                   |

Figura 1.24. Sistema de aspersión diseñado para el prototipo EEMA.

### **a. Sobre el diseño del sistema de aspersión**

El escalamiento de las precipitaciones es dependiente al sistema de aspersión diseñado, el cual se observa en la Figura 1.24. El sistema consiste en un tanque de agua de 55 gal como se determinó en la subsección 1.2.4.b, esto con el fin de mantener un nivel de agua suficiente para evitar que la bomba succione aire, lo cual ocasionaría un daño por cavitación.

Por otro lado, para el sistema se escogió la bomba Toolcraft® TC26666 de 0.5 Hp de tipo periférica, debido a que satisface los criterios técnicos y económicos: posee una cabeza máxima superior a la requerida por los aspersores, lo cual permite las pérdidas de presión, y posee un costo medio respecto a los modelos Maute® WP120/2B612 (menor costo) y FORAS® PM60 (mayor costo).

Sin embargo, en términos de caudal, la bomba seleccionada se encuentra sobredimensionada, pues su modo normal de uso es el trasiego de agua para consumo doméstico. Debido a que el sistema de aspersión posee longitudes mucho menores a una red residencial y existe el riesgo de cavitación en la bomba por una rápida evacuación en el tanque, se incluyó en el diseño un sistema *bypass* regulador de caudal, el cual está compuesto por una desviación de la línea principal hacia un retorno al tanque de trasiego con flujo regulado por una válvula de compuerta. Con ello, el sistema de aspersión permite regular el nivel en el tanque de trasiego y restar al caudal de la línea principal.

Adicionalmente al *bypass* regulador de caudal, se diseñó una perforación en la base del EEMA para la instalación de un retorno al tanque de trasiego de las aguas de ensayo.

Con respecto a los materiales, las tuberías de trasiego de agua externas al equipo son de PVC debido a su tolerancia química al agua y a su bajo costo, las válvulas, como la reguladora de presión, la de bola y la de compuerta, son de bronce. Cabe destacar que la tubería de trasiego que circula dentro del EEMA es de cobre con accesorios de bronce y acoples mecánicos (rosca con sello de bronce por estrangulación); esto debido a las temperaturas en el interior del EEMA (hasta 70 °C), al tipo de unión de los aspersores (1/4" NPT hembra) y a los alcances del taller de construcción (soldadura de cobre no disponible). Las especificaciones técnicas de diseño se observan en el Cuadro 1.12.



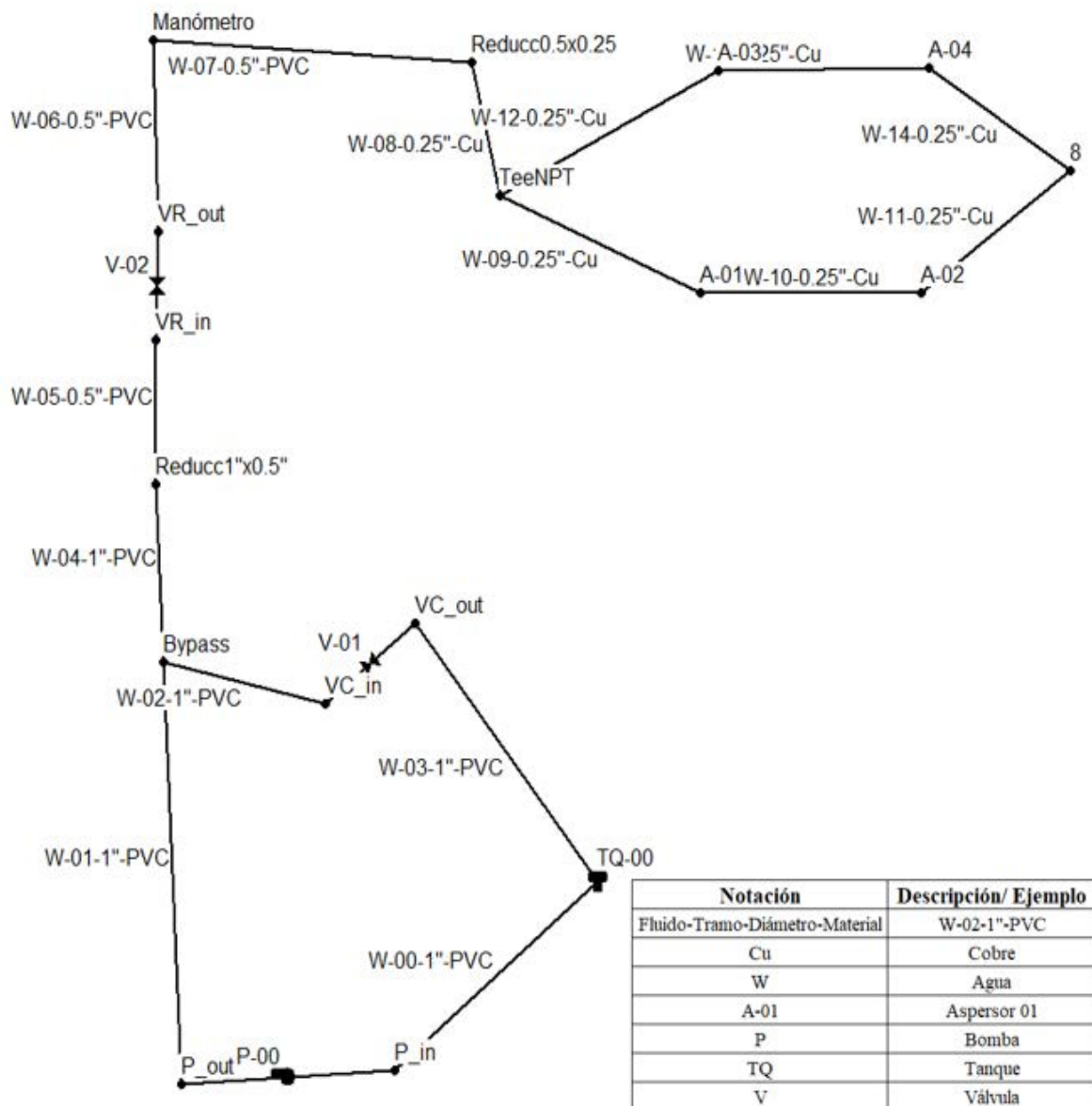
**Cuadro 1.12.** Detalle de las especificaciones técnicas de los componentes de diseño del sistema de aspersión del EEMA.

| Componente                    | Atributos                                  |                                   |                                       |                            |                                |
|-------------------------------|--|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
|                               | Modelo                                     | Potencia                          | Voltaje                               | Flujo máximo               | Máxima cabeza                  |
| Bomba periférica              | Toolcraft TC2666                           | 0.5 Hp                            | 120 V                                 | 35 L/ min                  | 30 m                           |
| Componente                    | Capacidad                                  | Material                          | Recubrimiento                         |                            |                                |
| Tanque de agua                | 55 gal                                     | Hierro                            | Blanco/ anticorrosivo                 |                            |                                |
| Componente                    | Tipo                                       | Rango de medición                 | Unión                                 | Material                   | Marca                          |
| Manómetro                     | Glicerina                                  | (0 – 100) psi                     | Macho ¼” NPT                          | SS 304                     | FTB                            |
| Componente                    | Marca                                      | Rango de regulación               | Unión                                 | Material                   |                                |
| Válvula reguladora de presión | Wilkins                                    | (15 – 75) psi                     | Hembra ½” Sch 40                      | Bronce                     |                                |
| Componente                    | Uso  | Descripción                       | Unión                                 | Material                   |                                |
| Aspersores                    | Agrícola                                   | Para bombas atomizadoras manuales | Hembra ¼” NPT                         | Bronce                     |                                |
| Componente                    | Materiales                                 | Diámetros nominales               | Uniones                               | Sellos                     | Curvas                         |
| Tubería                       | PVC (exterior al EEMA)                     | PVC:<br>1” Sch. 40<br>½” Sch. 40  | PVC:<br>Tubo/rosca macho.             | PVC-<br>Bronce:<br>Teflón. | PVC:<br>Codos de 90° estándar. |
|                               | Cobre (ramal dentro del EEMA)              | Cobre:<br>¾” Liso                 | Cobre:<br>Acople NPT rosca/sello/tubo |                            | Cobre:<br>Sello NPT            |
|                               | Bronce (accesorios en el ramal aspersores) | Bronce:<br>¼” NPT                 | Bronce:<br>Roscado hembra/macho       |                            |                                |

### b. Simulación de capacidad de aspersión

En el apartado 1.3.5.a se determinó como la bomba del sistema de aspersión al modelo Toolcraft® TC26666. En el presente apartado se presentan las evidencias que sustentan el cumplimiento de los requisitos técnicos de la bomba en cuestión.

En la Figura 1.25, se muestra el arreglo de tuberías del sistema de aspersión del EEMA adaptado al software EPANET. Los detalles longitudinales se tomaron de las mediciones realizadas para la elaboración del plano del EEMA, el cual se observa en los Anexos, en la Figura X.6.



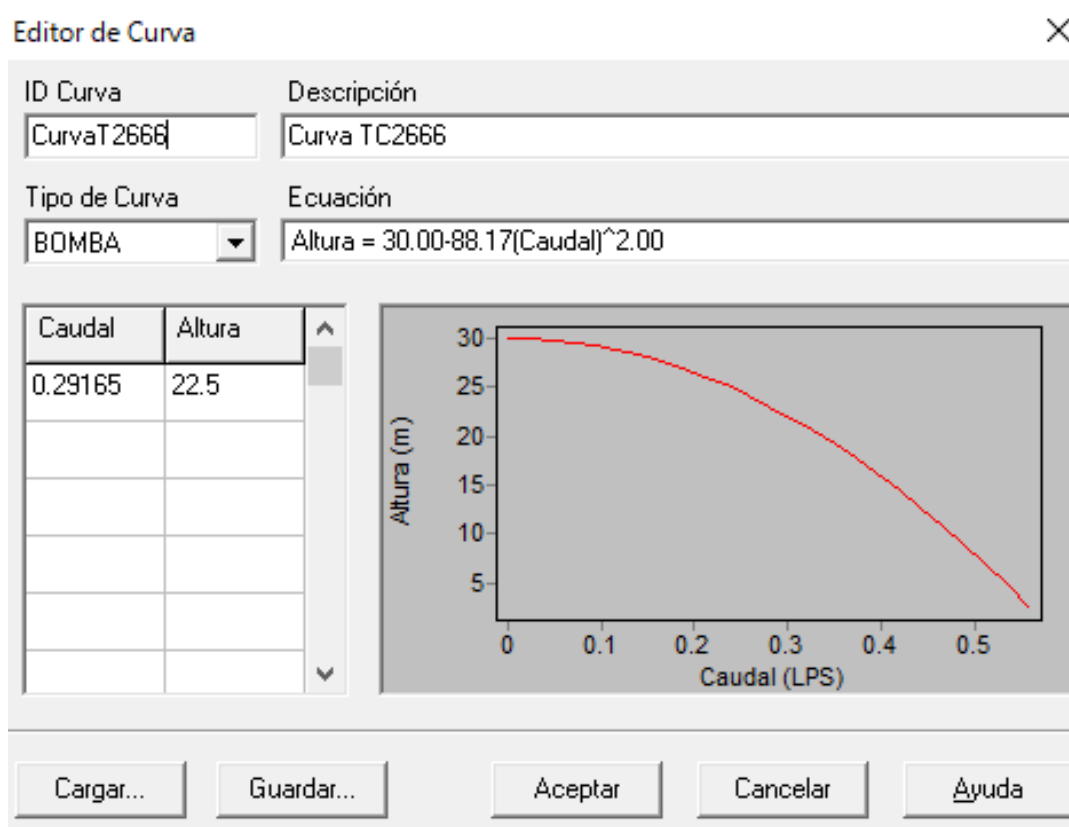
**Figura 1.25.** Planteamiento de la simulación de diseño para el sistema de aspersión del EEMA, elaborado mediante el software EPANET.

Para la incorporación de la bomba por probar, se empleó el método agregar bomba por curva característica en EPANET. Cuando se cuenta con la información de solo dos puntos de la curva

característica de una bomba, el software EPANET desarrolla una aproximación mediante el modelo descrito por la Ecuación 1.9 (del apartado 1.2.3.c).

$$H = H_{m\acute{a}x} - A \cdot Q^2 \quad (1.12)$$

Mediante la ecuación modelo de la curva característica y los datos de la ficha técnica de la bomba Toolcraft® TC26666 para flujo y cabeza máximos (ver Anexos, Figura X.7), se calculó el valor del Coeficiente del modelo “A”, el cual es aproximadamente  $88.17 \text{ m}\cdot\text{s}^2/\text{L}^2$ , con ello, se determinó la gráfica que se observa en la Figura 1.26 mediante EPANET.



**Figura 1.26.** Curva característica para la bomba Toolcraft® TC26666, según el modelo del software EPANET.

Finalmente, al introducir los materiales de las tuberías de trasiego, los datos geométricos y un valor de caudal dentro de la curva característica tal que genere una presión mayor a la requerida por los aspersores ( $0.29165 \text{ L/s}$ ) al simulador de EPANET, se obtuvieron los datos mostrados en el Cuadro 1.13, en los cuales se evidencia que la bomba Toolcraft® TC26666, transmite una presión de 31.19 psi, lo cual satisface la presión requerida por los aspersores. Los modelos

de FORAS® y Maute®, fueron descartados por costo económico y falta de capacidad técnica (una presión nominal máxima inferior a la requerida por los aspersores), respectivamente.

**Cuadro 1.13.** Valores de presión en los nodos del sistema de aspersión obtenidos mediante el simulador de EPANET.

| ID Nodo        | Altura, $z$ / (m) | Presión, $H$ / (m) | Presión, $P$ / (psi) |
|----------------|-------------------|--------------------|----------------------|
| $P_{in}$       | 0.0855            | 0.61               | 0.87                 |
| $P_{out}$      | 0.1355            | 30.53              | 43.42                |
| Bypass         | 0.9205            | 29.74              | 42.30                |
| $VC_{in}$      | 0.9205            | 29.74              | 42.30                |
| $VC_{out}$     | 0.9205            | -0.22              | -0.31                |
| Reducc1"x0.5"  | 1.0700            | 29.59              | 42.09                |
| $VR_{in}$      | 1.2300            | 29.43              | 41.86                |
| $VR_{out}$     | 1.2700            | 22.00              | 31.29                |
| Manómetro      | 1.4530            | 21.82              | 31.03                |
| Reducc0.5x0.25 | 1.4530            | 21.82              | 31.03                |
| TeeNPT         | 1.3450            | 21.93              | 31.19                |
| A-03           | 1.3450            | 21.93              | 31.19                |
| A-04           | 1.3450            | 21.93              | 31.19                |
| A-01           | 1.3450            | 21.93              | 31.19                |
| A-02           | 1.3450            | 21.93              | 31.19                |
| 8              | 1.3450            | 21.93              | 31.19                |
| TQ-00          | 0.0000            | 0.70               | 1.00                 |

### c. Resultados del escalamiento de precipitaciones

Para la obtención de los factores de escalamiento pluvial (FEP) preliminares, se determinó como supuesto que el caudal que aporta la bomba a los aspersores permite una intensidad de flujo de llenado de 10.9 L/ m<sup>2</sup> min. Este valor corresponde al volumen del cilindro de aire sobre las muestras de asfalto de la Figura 1.14, dividido entre el área superficial de la muestra, suponiendo que los aspersores llenan dicha altura en un minuto.

Es con base en lo anteriormente expuesto, se considera que los FEP obtenidos son valores preliminares, ya que los valores reales se obtienen mediante pruebas en el equipo construido, lo cual puede cambiar el tiempo de llenado y, con ello, afectar la intensidad de flujo de llenado. Sin embargo, con base en el supuesto considerado, la Ecuación 1.7 y los datos del Cuadro 1.8, se obtuvieron los valores de FEP observados en el Cuadro 1.14.

**Cuadro 1.14.** Tiempos de funcionamiento del sistema de aspersión requeridos para alcanzar el acumulado anual de precipitaciones por región.

| <b>Regiones generales según el IH</b> | <b>Factor de escalamiento pluvial, <i>FEP</i>/ (min/ año)</b> | <b>Factor de escalamiento pluvial, <i>FEP</i>/ (h/ año)</b> |
|---------------------------------------|---|---|
| Seca                                  | 175.5   | 2.93  |
| Húmeda Seca                           | 259.5   | 4.33  |
| Húmeda                                | 343.8   | 5.73  |
| Muy Húmeda                            | 357.2   | 5.95  |

### **1.3.7. Diseño del EEMA**

Con base en los aspectos de diseño mencionados con antelación, las modificaciones al horno convectivo de la Figura 1.13, que tienen como fin la creación del prototipo EEMA son mínimamente invasivas, ya que solo el sistema de captación de aguas de ensayo es la única intervención irreversible (perforación propuesta de una pulgada de diámetro en la base del horno). Los planos de detalle del EEMA se adjuntan en las Figuras X.1, X.2, X.3, X.4, X.5 y X.6 de los Anexos.

#### **a. Definición de ciclos de ensayo y detalles de diseño**

Por otro lado, en el diseño para la instalación del sistema de radiación y del sistema de aspersión, se aprovechó un ducto de monitoreo que el horno convectivo trae de forma original; además, como detalle a la operabilidad del sistema de radiación, debido a la temperatura de funcionamiento del horno, se determinó emplear cable térmico de fibra óptica.

En el mercado, se obtienen de forma común para temperaturas de 250 °C (más económico y determinado para la construcción) y 450 °C. La elección del cable de 250 °C se relaciona a costos y capacidad técnica, ya que el horno no opera a más de 70 °C, según los ciclos de ensayo diseñados, los cuales se denotan en el Cuadro 1.15 y el Cuadro 1.16 y se detallan sus parámetros en el Cuadro 1.17.

Los valores del Cuadro 1.17, se redondearon a números enteros en el caso de los tiempos y números de ciclos, con el fin de facilitar la operabilidad del EEMA.

**Cuadro 1.15.** Notación de las siglas del tipo de ciclo según radiación, precipitaciones y temperatura.

| <b>Descripción general de siglas</b> |
|--------------------------------------|
| S: seco                              |
| HS: húmedo seco                      |
| H: húmedo                            |
| MH: Muy húmedo                       |
| BI: Baja irradiancia                 |
| MI: Media irradiancia                |
| AI: Alta irradiancia                 |
| TB: temperatura máxima baja          |
| TI: Temperatura máxima media         |
| TA: temperatura máxima alta          |
| Tb: temperatura mínima baja          |
| Ti: temperatura mínima media         |
| Ta: temperatura mínima alta          |

**Cuadro 1.16.** Notación y asociación de los ciclos de ensayos de envejecimiento acelerado por meteorización con base en factores meteorológicos costarricenses.

| <b>Tipo de ciclo según radiación, precipitaciones y temperaturas</b> | <b>Identificador</b> | <b>Regiones según la CMGV descritas en la Figura 1.1 y en el Cuadro 1.2</b> |
|--|----------------------|---|
| S-MI-TA-Ta   | A                    | Cordillera de Guanacaste y Tilarán (CGT)                                    |
| S-MI-TI-Ti   | B                    | Valle Central (VC)  |
| S-AI-TA-Ta   | C                    | Golfo de Nicoya y Llanura Guanacasteca (GNG), Península de Nicoya (PN)      |
| HS-MI-TA-Ta  | D                    | Caribe Alta (CA), Caribe Sur (CS)   |
| HS-MI-TB-Tb  | E                    | Volcánica Central Pacífico (VCP)  |
| HS-BI-TA-Ta  | F                    | Upala y Los Chiles (UC)   |
| H-BI-TI-Ti   | G                    | Los Santos (LS), Talamanca (TM)   |
| H-BI-TA-Ta   | H                    | Norte (N), Norte Alta (NA)  |
| H-MI-TA-Ta   | I                    | Pacífico Central (PC), Valle del General (VG)                               |
| MH-BI-TA-Ta  | J                    | Caribe (C), Pacífico Sur (PS)   |

**Cuadro 1.17.** Ciclos de ensayos de envejecimiento acelerado por meteorización con base en factores meteorológicos costarricenses escalados a un año de exposición a la intemperie.

| Parámetro  | Ciclos |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | A      | B      | C      | D      | E      | F      | G      | H      | I      | J      |
| Tiempo del subciclo de calor y luz, $t_c$ / (h)        | 3      | 3      | 4      | 3      | 3      | 3      | 3      | 3      | 3      | 3      |
| Tipo de radiación                                      | UVC    | UVC    | UVC    | UVC    | UVC    | UVC    | UVC    | UVC    | UVC    | UVC    |
| Longitud de onda, $\lambda$ / (nm)                     | 240    | 240    | 240    | 240    | 240    | 240    | 240    | 240    | 240    | 240    |
| Temperatura del subciclo de calor, $T_c$ / (°C)        | 64±2.5 | 58±2.5 | 64±2.5 | 64±2.5 | 46±2.5 | 64±2.5 | 58±2.5 | 64±2.5 | 64±2.5 | 64±2.5 |
| Tiempo del subciclo de condensación, $t_s$ / (min)     | 11     | 11     | 12     | 16     | 16     | 18     | 23     | 23     | 21     | 25     |
| Temperatura del subciclo de condensación, $T_s$ / (°C) | 19±2.5 | 15±2.5 | 19±2.5 | 19±2.5 | 8±2.5  | 19±2.5 | 15±2.5 | 19±2.5 | 19±2.5 | 19±2.5 |
| Total de subciclos de radiación                        | 17     | 17     | 14     | 17     | 17     | 15     | 15     | 15     | 17     | 15     |
| Total de subciclos de precipitación                    | 17     | 17     | 14     | 17     | 17     | 15     | 15     | 15     | 17     | 15     |

Finalmente, se destaca que los ciclos propuestos permiten la ejecución de dos sub-ciclos de radiación y precipitación por día debido a que el equipo es un prototipo y se sugiere que su funcionamiento sea continuamente supervisado para estudios de mejora y prevención de accidentes.

### b. Diseño del programa del EEMA

De previo a la programación en el lenguaje de bloques lógicos que emplea el software LOGO! Soft Comfort V8.3, se realizó el diseño del algoritmo del programa (Figura 1.27). Lo anterior, con el fin de comprender la lógica del código por programar y mapear las entradas de información requeridas.

Los primeros ensayos del EEMA se determinaron de ejecución manual en el planeamiento experimental, ya que de previo a establecer un control automatizado, el funcionamiento manual es recomendable para la determinación de las condiciones de operación en estado estable y que son necesarias para la construcción del código final.

Como se aprecia en la Figura 1.17, el PLC LOGO! 230 RCE, posee en los pines superiores, las entradas de información mediante señales (desde I1 hasta I2), la alimentación (L1) y un neutro (N), además, en la parte inferior, posee las salidas de información mediante relés programables (desde Q1 hasta Q4).

Con base en lo anteriormente expuesto, en el Cuadro 1.18 se observan las asociaciones de las entradas y salidas del PLC con los parámetros (señales) diseñados del EEMA.

**Cuadro 1.18.** Asociación entre las entradas y salidas del PLC LOGO! 230 RCE y las señales de diseño del EEMA.

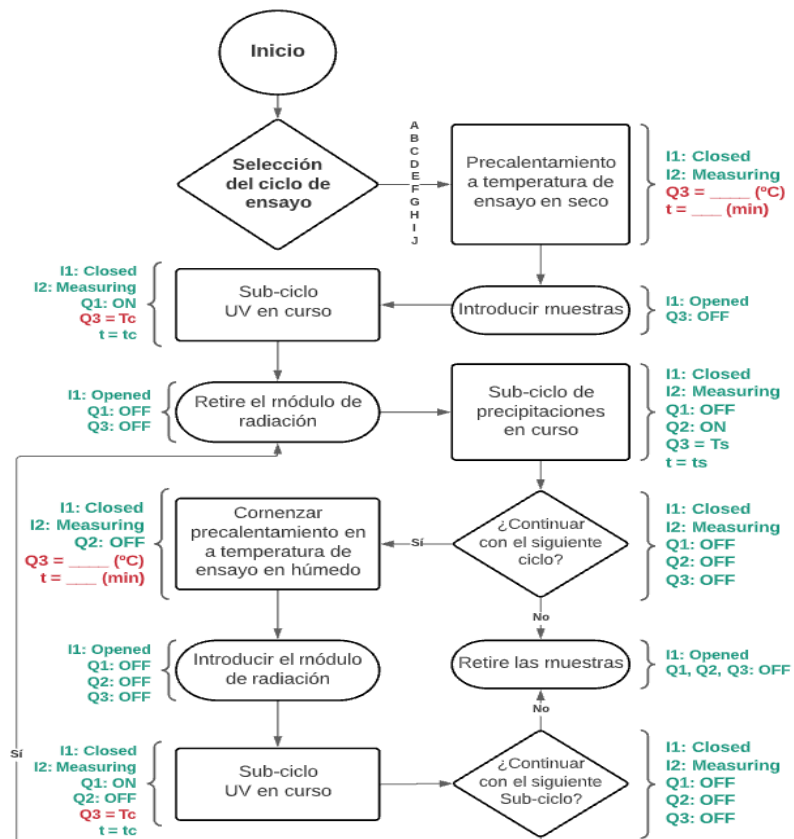
| Notación en el PLC | Descripción  | Señal de información o control  |
|--------------------|--------------|---------------------------------|
| L1                 | Alimentación | Entrada de 115 V – 230 V        |
| N                  | Neutro       | Conductor de 0 V                |
| I1                 | Entrada 1    | Sensor de apertura de puertas   |
| I2                 | Entrada 2    | Sensor de temperatura del horno |
| Q1                 | Salida 1     | Alimentación de bombillos UVC   |
| Q2                 | Salida 2     | Alimentación de la bomba        |
| Q3                 | Salida 3     | Temperatura del horno           |

Por otro lado, con la asociación entre señales, entradas y salidas expuesta en el Cuadro 1.18, además de restricciones asociadas al grado de compatibilidad de funcionamiento simultáneo entre los componentes que conforman el diseño del EEMA, se establecieron los siguientes condicionales de operación entre los parámetros manipulados a través del PLC LOGO! 230 RCE:



- Q1 y Q2 no pueden nunca estar activos al mismo tiempo. Los bombillos seleccionados para el diseño no especifican tolerancia a la humedad directa.
- Q1, Q2 y Q3 están restringidos por la señal que el PLC interprete de I1, es decir., si I1 es interpretado como “puertas abiertas”, en consecuencia, Q1, Q2 y Q3, cualesquiera que se encuentren operando, se desactivarán. Esto como una protección para quien ejecute ensayos en el EEMA.
- Q1 y Q3 pueden estar activos juntos. Los sub-ciclos de radiación son también a alta temperatura.

Pese a los condicionales y la información de los ciclos teóricos expuestos en el Cuadro 1.17, se requieren de datos experimentales de desempeño del equipo para ajustar los parámetros de control en el programa del PLC para el funcionamiento del EEMA.



**Figura 1.27.** Algoritmo de la programación del PLC LOGO! 230 RCE, para la ejecución de ensayos en el EEMA.

En la Figura 1.27, se observan en rojo los parámetros requeridos mediante pruebas de funcionamiento manual con el EEMA y en verde la notación del PLC involucrada, además del esquema del algoritmo del programa del EEMA.

Finalmente, tanto para las operaciones de precalentamiento en seco y húmedo que se muestran en el algoritmo del EEMA requieren pruebas manuales para determinar el tiempo y la temperatura que requiere el horno para alcanzar el valor de temperatura de ensayo (*set point*), debido a lo difícil de predecir el tiempo y calentamiento adecuados dada la variabilidad que el equipo posee y las condiciones externas a las que está expuesto naturalmente.

## 1.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los estudios realizados para el diseño del EEMA, se concluyeron los siguientes aspectos:

- Fue posible fundamentar los parámetros meteorológicos del EEMA con base en datos del IMN.
- Se encontró que la temperatura mínima del asfalto a la intemperie es similar a la temperatura mínima ambiente de una determinada región. Sin embargo, la equivalencia a temperatura ambiente no aplica en altas temperaturas.
- Con base en los estadísticos no paramétricos de la Mediana de Mood y el método de comparaciones múltiples, además de los datos meteorológicos de temperaturas mínimas promedio, se identificaron tres regiones estadísticamente diferentes en cuanto a temperaturas mínimas, a saber: Cordillera Volcánica Central (CVC), Vertientes Pacífico-Caribe y Subvertiente Norte (PCN), y Valle Central-Los Santos-Talamanca (VST).
- Se determinó que la aplicación de los factores climáticos de radiación y precipitaciones aplicados a muestras de asfaltos deben ser valores acumulados y no puntuales debido a que, durante todo el servicio, los pavimentos asfálticos absorben radiación y reciben precipitaciones de forma continua, lo cual influye gradualmente en las propiedades del material.
- Se empleó el IRS como un recurso para clasificar los valores recopilados de radiación solar de las regiones.
- Se considera que los bombillos UVC escogidos brindarán una radiación más penetrante, por lo que se podría incrementar la velocidad de los ensayos. Adicionalmente, se esperan diferencias en el desempeño experimental de los bombillos elegidos con respecto a los cálculos obtenidos del modelo de radiación dado que son de espectro discontinuo (picos de irradiancia).
- Se determinó como requisito técnico de diseño para el sistema de aspersión, una presión entre 20 psi y 30 psi en los aspersores, ya que produce la caída de agua como

rocío y no como niebla, para ello seleccionó la bomba Toolcraft® debido a que cumplió los criterios de capacidad.

- Se diseñaron los ciclos de envejecimiento para el EEMA mediante las clasificaciones de las regiones, según los valores extremos en los parámetros de temperaturas mínimas y máximas, IRS e IH, lo cual proporcionó 10 ciclos diferentes en total para simular la variabilidad climática costarricense.
- Mediante el diseño del algoritmo del software para el PLC, se determinó la necesidad de pruebas experimentales de funcionamiento con el fin de definir parámetros en el código del PLC.
- Se realizaron los planos constructivos del EEMA mediante AutoCAD y se estimaron de forma preliminar los materiales por requeridos para la construcción del EEMA.

Con base en los estudios realizados para el diseño del EEMA, se recomiendan los siguientes aspectos:

- Debido a la consideración de un nivel de irradiancia inferior al calculado para los bombillos UV escogidos, se recomienda que aumentar la proximidad de las muestras a la fuente luminosa puede compensar los bajos niveles de irradiancia de los picos de emisión.
- A causa de la adaptación del horno convectivo para el prototipo EEMA, se recomiendan pruebas experimentales para la revisión de posibles modos de falla como la filtración de aguas y los escapes de radiación peligrosa.
- Debido a que el EEMA es un prototipo, se recomienda que el alcance de las pruebas preliminares y las de funcionamiento, se realicen de forma empírica y exploratoria, y no aplicar una calibración real, ya que se requieren datos experimentales para precisar mejor el diseño.
- Se recomienda instalar un sistema de enfriamiento para los valores de temperatura mínima de los ciclos de diseño e implementar bombillos resistentes a la humedad.
- Se recomienda la implementación de un lazo de control del nivel de radiación mediante un sensor de temperatura tipo panel negro, un controlador y bombillos UV con potencia ajustable.

- Se recomienda la instalación de un sensor de humedad relativa, puesto que es una variable significativa de considerar durante los ensayos de envejecimiento.



## 1.5. NOMENCLATURA

### Siglas

|       |   |
|-------|---|
| AI    | Alta irradiancia  |
| ANOVA | Análisis de varianza  |
| ASTM  | <i>American Society for Testing Materials</i>                 |
| BI    | Baja irradiancia  |
| C     | Caribe  |
| CA    | Caribe Alta   |
| CC    | Criterio de capacidad   |
| CD    | Criterio de disponibilidad                                    |
| CE    | Criterio económico  |
| CG    | Criterio geométrico   |
| CGT   | Cordillera de Guanacaste y Tilarán                            |
| CMGV  | Clasificación meteorológica para gestión vial                 |
| CMN   | Clasificación meteorológica neta                              |
| CS    | Caribe Sur  |
| CT    | Criterio técnico  |
| CTAPG | Clasificación por temperatura de asfalto y grado de desempeño |
| CVC   | Cordillera Volcánica Central                                  |
| DLA   | Días con lluvia anuales, <i>días</i>                          |
| DMP   | Días con precipitaciones por mes, <i>días</i>                 |
| EEMA  | Equipo de envejecimiento por meteorización de los asfaltos    |
| FEP   | Factor de escalamiento pluvial, <i>min/año</i>                |
| GNG   | Golfo de Nicoya y Llanura Guanacasteca                        |
| H     | Húmedo  |
| HR    | Humedad relativa, %   |
| HS    | Húmedo seco   |
| HVS   | Simulador de vehículos pesados                                |
| IAM   | Irradiancia anual máxima, <i>MJ/ m<sup>2</sup>año</i>         |
| IH    | Índice de humedad, <i>m</i>                                   |
| IMN   | Instituto Meteorológico Nacional                              |
| IRS   | índice de radiación solar, <i>adim</i>                        |
| LS    | Los Santos  |
| MH    | Muy húmedo  |

|                      |  |
|----------------------|--|
| MI                   | Media irradiancia  |
| N                    | Norte  |
| NA                   | Norte Alta   |
| PC                   | Pacífico Central   |
| PCN                  | Vertientes Pacífico-Caribe y Subvertiente Norte              |
| PG                   | Grado de desempeño   |
| PLC                  | Controlador lógico programable                               |
| PM                   | Precipitaciones mensuales, $L/m^2$                           |
| PN                   | Península de Nicoya  |
| PS                   | Pacífico Sur   |
| RAD <sub>R</sub>     | Acumulado de radiación solar anual por región, $MJ/m^2año$   |
| RAD <sub>total</sub> | Acumulado de radiación solar anual a nivel país, $MJ/m^2año$ |
| RSDA                 | Radiación solar directa acumulada anual, $kWh/m^2$           |
| RSM                  | Radiación solar mensual, $MJ/m^2$                            |
| S                    | Seco   |
| TA                   | Temperatura Máxima Alta, °C                                  |
| TB                   | Temperatura Máxima Baja, °C                                  |
| TI                   | Temperatura Máxima Media, °C                                 |
| TM                   | Talamanca  |
| TMA                  | Temperatura media anual, °C                                  |
| TMM                  | Temperatura media mensual, °C                                |
| TPA                  | Total de precipitaciones anual, $L/m^2 año$                  |
| TPA <sub>R</sub>     | Total de precipitaciones anuales por región, $L/m^2 año$     |
| UC                   | Upala y Los Chiles   |
| UV                   | Ultravioleta   |
| UVA                  | Ultravioleta A   |
| UVB                  | Ultravioleta B   |
| UVC                  | Ultravioleta C   |
| UVM                  | Irradiancia UV anual máxima, $MJ/m^2año$                     |
| VC                   | Valle Central  |
| VCP                  | Volcánica Central Pacífico                                   |
| VG                   | Valle del General  |
| VST                  | Valle Central-Los Santos-Talamanca                           |

### Mayúsculas

|   |  |
|---|--|
| A | Coefficiente del modelo, $m \cdot s^2/L^2$ |
|---|--|



|               |  |
|---------------|--|
| $A_e$         | Área de irradiancia, $m^2$   |
| $D$           | Diámetro de tubería, $m$   |
| $D_{Lluvias}$ | Días con lluvia, <i>días</i>   |
| $D_{SLL}$     | Días sin lluvia, <i>días</i>   |
| $E_f$         | Energía del fotón, $J/\text{fotón}$  |
| $H$           | Cabeza de bombeo, $m$  |
| $H_1$         | Hipótesis alternativa  |
| $H_{máx}$     | Cabeza de bombeo máxima, $m$   |
| $H_o$         | Hipótesis nula   |
| $I$           | Irradiancia, $W/m^2$   |
| $I_1$         | Entrada 1 del PLC  |
| $I_2$         | Entrada 2 del PLC  |
| $I_{esp}$     | Irradiancia espectral, $W/m^2\text{ nm}$   |
| $L$           | Longitud del tramo de tubería, $m$   |
| $L_1$         | Alimentación al PLC  |
| $N$           | Neutro del PLC   |
| $N_T$         | Número total de datos de temperaturas mínimas en estudio, <i>adim</i>              |
| $P_{anual}$   | Precipitación anual, $mm$  |
| $P_{in}$      | Nodo de entrada a la bomba   |
| $P_o$         | Potencia nominal de la bombilla, $W$   |
| $P_{out}$     | Nodo de salida de la bomba   |
| $Q$           | Caudal de bombeo   |
| $Q_1$         | Salida 1 del PLC   |
| $Q_2$         | Salida 2 del PLC   |
| $Q_3$         | Salida 3 del PLC   |
| $Q_{LL}$      | Intensidad de flujo de llenado, $L/m^2\text{ min}$                                 |
| $R$           | Coefficiente de resistencia, $s^2/m^5$   |
| $R_d$         | Radio de irradiancia, $m$  |
| $R_i$         | Sumatoria de temperaturas mínimas mensuales para la $i$ -ésima región, $^{\circ}C$ |
| $R_j$         | Sumatoria de temperaturas mínimas mensuales para la $j$ -ésima región, $^{\circ}C$ |
| $T$           | Temperatura, $^{\circ}C$   |
| $T_a$         | Temperatura Mínima Alta, $^{\circ}C$   |
| $T_b$         | Temperatura Mínima Baja, $^{\circ}C$   |
| $T_c$         | Temperatura del subciclo de calor, $^{\circ}C$                                     |
| $T_i$         | Temperatura Mínima Media, $^{\circ}C$  |
| $T_s$         | Temperatura del subciclo de condensación, $^{\circ}C$                              |

|                  |   |
|------------------|---|
| $VC_{in}$        | Nodo de entrada a la válvula de compuerta                               |
| $VC_{out}$       | Nodo de salida de la válvula de compuerta                               |
| $VR_{in}$        | Nodo de entrada a la válvula reguladora de presión                      |
| $VR_{out}$       | Nodo de salida de la válvula reguladora de presión                      |
| $Z_{1-\alpha/2}$ | Valor del estadístico normal Z para un 5% de significancia, <i>adim</i> |

### Minúsculas

|           |   |
|-----------|---|
| C         | Velocidad de la luz, $m/s$  |
| f         | Factor de fricción de Darcy, <i>adim</i>                                |
| g         | Gravedad, $m/s^2$   |
| h         | Constante de Planck, $J\cdot s$   |
| $n_i$     | Número de datos de temperatura mínima de la i-ésima región, <i>adim</i> |
| $n_j$     | Número de datos de temperatura mínima de la j-ésima región, <i>adim</i> |
| tc        | Tiempo del subciclo de calor y luz, $h$                                 |
| $t_{EXP}$ | Tiempo de exposición, $h$   |
| ts        | Tiempo del subciclo de condensación, $h$                                |

### Griegas

|           |   |
|-----------|---|
| $\lambda$ | Longitud de onda, $m$                         |
| $\mu$     | Media de un conjunto de datos                 |
| $\Phi_f$  | Intensidad de flujo de fotones, $fotón/m^2 s$ |

### Subíndices

|              |   |
|--------------|---|
| l            | Indica alternativa cuando va con H        |
| $1-\alpha/2$ | Indica la confiabilidad de un estadístico |
| c            | Indica subciclo de calor                  |
| e            | Indica esfera de irradiancia              |
| esp          | Indica espectral                          |
| EXP          | Indica exposición                         |
| f            | Indica fotón                              |
| i            | Indica el i-ésimo valor                   |
| in           | Indica entrada                            |
| j            | Indica el j-ésimo valor                   |
| máx          | Indica valor máximo                       |
| o            | Indica nula cuando va con H               |

|     |                                 |
|-----|---------------------------------|
| o   | Indica nominal cuando va con P  |
| out | Indica salida                   |
| R   | Indica un valor regional        |
| s   | Indica subciclo de condensación |
| SLL | Indica sin lluvia               |
| T   | Indica el total de datos        |



## 1.6. BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (2017). Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials of Soils and Aggregate Materials. *ASTM Compass*. <https://compass-astm-org.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/download/ca118c34-56ff-4517-98b8-64adc5b7b8ea.35327.pdf>
- ASTM. (2016a). Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet ( UV ) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials. *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/G0154-16.2>
- ASTM. (2017b). Standard Test Method for Accelerated Weathering Test Conditions and Procedures for Bituminous Materials ( Fluorescent UV and Condensation. *Current*, 04(March 2000), 1–2. <https://doi.org/10.1520/D4799>
- ASTM. (2019). Standard Practice for Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources. *ASTM International*, 15(ASTM G151-19), 1–11. <https://doi.org/10.1520/G0151-19.2>
- ASTM. (2019b). Standard Practice for Preparation of Test Panels for Accelerated and Outdoor Weathering of Bituminous Coatings. *ASTM International*, *ASTM D1669*. <https://doi.org/10.1520/D1669>
- BTG. (2021). *OSRAM HNS 15 W*. BTG: Bulbtronics Group. <https://www.bulbtronics.com/Search-The-Warehouse/ProductDetail.aspx?sid=0065744&pid=OSG15T8OF++++++&Source=SearchResults#>
- Elizondo, F., Badilla, G., Bonilla, E., & Rodríguez, E. (2013). Zonificación climática de Costa Rica para la determinación del tipo de ligante asfáltico clasificado por grado de desempeño (PG). *Congreso Ibero Latinoamericano Del Asfalto, XVII CILA*(1980), 1–10. [https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/742/Zonificacion climática de Costa Rica para la determinación del tipo de ligante asfáltico clasificado por grado de desempeño %28PG%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/742/Zonificacion%20climatica%20de%20Costa%20Rica%20para%20la%20determinacion%20del%20tipo%20de%20ligante%20asfaltico%20clasificado%20por%20grado%20de%20desempeno%20PG.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- EPA. (2021a). *Bomba centrífuga marca foras de 0,5 hp FORAS*. <https://cr.epaenlinea.com/bomba-centrifuga-marca-foras-de-0-5-hp.html>
- EPA. (2021b). *Bomba de agua periférica de ½ hp Toolcraft*. <https://cr.epaenlinea.com/bomba-de-agua-periferica-de-hp.html>
- EPA. (2021c). *Bomba periférica de 1/2 hp, 33l /min Maute*. <https://cr.epaenlinea.com/bomba-periferica-de-1-2-hp-33l-min.html>
- Fedor, G.; Brennan, P. (1993). Las cámaras de prueba de condensación/UV de irradiación alta permiten obtener resultados más rápidos de los ensayos de envejecimiento artificial acelerado. *Q-Lab Corporation: Boletín Técnico LU-8031*, 04, 1–8. <https://www.q-lab.com/documents/public/b7379b18-5f0f-4bc3-b2a2-20b9c894af66.pdf>
- Grossman, G. W. (1977). Correlation of Laboratory to Natural Weathering. *The Q-Lab Company: Technical Bulletin LU-0824*, 1–12. <https://www.q-lab.com/documents/public/7a3f649a-fd88-417e-b42a-ae7eb14e4ea1.pdf>
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (Segunda ed). McGraw Hill.

- Hernández, P. (2014). *Radiación directa, difusa y reflejada*. Arquitectura Eficiente. <https://pedrojhernandez.com/2014/03/08/radiacion-directa-difusa-y-reflejada/>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2016a). *Densidad de potencia emitida*. PVEducation. <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/2-propiedades-de-la-luz-del-sol/densidad-de-potencia-emitida>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2016b). *Energía del fotón*. PVEducation. <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/2-propiedades-de-la-luz-del-sol/energia-del-foton>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2016c). *Espectro de irradiancia*. PVEducation. <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/2-propiedades-de-la-luz-del-sol/espectro-de-irradiacia>
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2016d). *Flujo de fotones*. PVEducation. <https://www.pveducation.org/es/fotovoltaica/2-propiedades-de-la-luz-del-sol/flujo-de-fotones>
- IMN. (2021). *Mapa de Costa Rica: datos climáticos*. Instituto Meteorológico Nacional. <https://www.imn.ac.cr/web/imn/mapa>
- Jiménez, M. (2009). Implementación del ensayo de módulo resiliente en bases granulares para pavimentos. *Lanamme, UCR, 506*. [https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1207/UI-07-09-ENSAYO MODULO RESILIENTE EN BASES GRANULARES.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1207/UI-07-09-ENSAYO_MODULO_RESILIENTE_EN_BASES GRANULARES.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Kaune, A. (2010). *Análisis de requerimientos, diseño y construcción de un simulador de lluvia a nivel de laboratorio, para la cuantificación de propiedades físicas- erosivas de gotas* [Universidad de Costa Rica]. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2015/08/1simuladordelluvia.pdf>
- Leiva, F., Camacho, E., & Aguiar, J. (2016). Simulación de variables climáticas en ensayos de daño acelerado de pavimentos a escala natural. *Revista Infraestructura Vial, 18*, 20–29. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/infraestructura/v18n32/2215-3705-infraestructura-18-32-00020.pdf>
- Minitab. (2019). *Método de cálculo para Prueba de la mediana de Mood*. Support Minitab. <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how-to/statistics/nonparametrics/how-to/mood-s-median-test/methods-and-formulas/calculation-method/#:~:text=El método de cálculo para,de conteos 2 x k.>
- Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos* (6th ed.). Prentice Hall.
- NaaDanJain. (2018). Microaspersores. In *NaaDanJain Irrigation Ltd*. [https://naandanjain.com/products\\_cat/es\\_micro-sprinklers/?lang=es](https://naandanjain.com/products_cat/es_micro-sprinklers/?lang=es)
- Orozco, G. (2007). Zonificación climática de costa rica para la gestión de infraestructura vial. *Congreso Ibero Latinoamericano Del Asfalto*.
- Petersen, J. (1989). A thin-rim accelerated aging test for evaluating asphalt oxidative aging. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists, 58*, 220–237.
- Q-Lab. (2006). Una selección de lámparas para la QUV. *Q-Lab Corporation: Boletín Técnico LU-8160.SP*. <https://www.q-lab.com/documents/public/50b2b1e7-2edc-4df1-acc1-b0f6249e55ce.pdf>
- RECOPE. (2005). *Reglamento técnico centroamericano de especificaciones para el asfalto*

- RTCA 75.01.22.04. 142. [https://www.recope.go.cr/wp-content/uploads/2013/07/RTCA\\_75\\_01\\_22\\_04\\_Decreto\\_Ejecutivo\\_32812\\_Especificaciones\\_de\\_Calidad\\_Asfaltos-1.pdf](https://www.recope.go.cr/wp-content/uploads/2013/07/RTCA_75_01_22_04_Decreto_Ejecutivo_32812_Especificaciones_de_Calidad_Asfaltos-1.pdf)
- Rojas, G. (2020). *Implementación de protocolo de análisis en laboratorio de materiales antioxidantes para el asfalto*. Universidad de Costa Rica.
- Rossmann, L. (2006). EPANET 2. Manual de usuario. In *United States Environmental Protection Agency (US EPA)*. Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development. <http://epanet.info/manuales/epanet-2-manual-de-usuario-espanol/>
- Sánchez, M. (2017). *Implementación de metodología de envejecimiento de asfaltos mediante radiación UV* [Universidad de Costa Rica]. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/10368/40999.pdf?sequence=1>
- Shi, P., Dai, Z., Zhu, H., Gao, Q., Li, X., & Shen, J. (2019). Nanoscaled Characteristics of Recovered Asphalt Binders from Weathered Asphalt Mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, 47(5), 20180340. <https://doi.org/10.1520/jte20180340>
- Solano, J., & Villalobos, R. (2000). Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. *Instituto Meteorológico Nacional, mapa 1*, 1–32.
- Solargis. (2020). *Mapas de recursos solares de Costa Rica*. Solargis: Solar Resource Database. <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/costa-rica>
- Vargas, X., & Reyes, F. (2010). El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *Ingeniería e Investigación*, 30(3), 27–44.
- Villegas-Villegas, R. E., Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., & Loria-Salazar, L. (2018). Analysis of asphalt oxidation by means of accelerated testing and environmental conditions. *Transportation Research Record*, 2672(28), 244–255. <https://doi.org/10.1177/0361198118777630>
- Wang, H., Feng, Z., Zhou, B., & Yu, J. (2012). A Study on Photo-thermal Coupled Aging Kinetics of Bitumen. *Journal of Testing and Evaluation*, 40(5). <https://doi.org/10.1520/jte20120065>
- Welty, J.; Wicks, C; Wilson, R; Rorrer, G. (2008). *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer* (5th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Wright, J. (2008). Cálculo y mapeo de la radiación solar directa y difusa en Costa Rica. *Uniciencia, Universidad Nacional de Costa Rica*, 22, 55–69.





## 1.7. APÉNDICES

### Apéndice A: Datos meteorológicos recopilados

**Cuadro A.1.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Valle Central (VC).

| Región                | Estaciones Climáticas    | Meses      | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |       | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|--------------------------|------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|-------|------------------------------|
|                       |                          |            |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.  |                              |
| VC                    | RECOPE<br>Ochomogo       | Enero      | 19.9                       | 6             | 72.8      | 25.17    | 16.03 | 20.60 | 375.10                       |
|                       | Dulce<br>Nombre          | Febrero    | 17.8                       | 4             | 70.8      | 25.93    | 16.03 | 20.97 | 407.00                       |
|                       | ITCR                     | Marzo      | 21.2                       | 4             | 70.6      | 26.78    | 16.34 | 21.57 | 449.00                       |
|                       | Zapote                   | Abril      | 66.6                       | 9             | 73.5      | 27.55    | 17.05 | 22.32 | 373.00                       |
|                       | CIGEFI                   | Mayo       | 248.7                      | 21            | 81.4      | 27.15    | 17.62 | 22.38 | 330.00                       |
|                       | IMN<br>Aranjuez          | Junio      | 235.4                      | 22            | 83.1      | 26.74    | 17.60 | 22.18 | 149.00                       |
|                       | Aeropuerto<br>Pavas Este | Julio      | 161.1                      | 20            | 80.8      | 26.19    | 17.50 | 21.84 | 155.00                       |
|                       | Belén                    | Agosto     | 201.5                      | 21            | 82.1      | 26.52    | 17.23 | 21.88 | 188.00                       |
|                       | Fabio<br>Baudrit         | Septiembre | 304.7                      | 23            | 84.2      | 26.80    | 17.07 | 21.93 | 133.00                       |
|                       | RECOPE<br>La Garita      | Octubre    | 317.8                      | 25            | 85.2      | 26.08    | 17.08 | 21.58 | 154.00                       |
|                       | Santa<br>Bárbara         | Noviembre  | 145.3                      | 18            | 81.9      | 25.48    | 16.88 | 21.17 | 185.00                       |
|                       | Santa Lucía              | Diciembre  | 44.9                       | 10            | 76.4      | 25.07    | 16.44 | 20.75 | 322.00                       |
| <b>Total anual</b>    |                          |            | 1784.9                     | 183           |           |          |       |       | 3220.24                      |
| <b>Promedio anual</b> |                          |            | 148.7                      |               | 78.56     | 26.29    | 16.90 | 21.60 | 268.35                       |

**Cuadro A.2.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones (PM), humedad relativa (HR), días de precipitaciones (DMP), temperaturas (TMM) y radiación solar (RSM) en las estaciones climáticas de la región Caribe (C).

| Región | Estaciones Climáticas | Meses                 | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |       | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|--------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|-------|------------------------------|
|        |                       |                       |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.  |                              |
| C      | Canta Gallo           | Enero                 | 351.3                      | 23            | 89.3      | 29.15    | 20.58 | 24.85 | 217.00                       |
|        |                       | Febrero               | 206.9                      | 17            | 86.3      | 29.75    | 20.43 | 25.10 | 224.00                       |
|        |                       | Marzo                 | 197.7                      | 19            | 86.3      | 30.18    | 20.90 | 25.55 | 286.75                       |
|        | Aeropuerto de Limón   | Abril                 | 201.1                      | 17            | 86.3      | 30.88    | 21.70 | 26.30 | 258.00                       |
|        |                       | Mayo                  | 369.9                      | 22            | 88.3      | 31.18    | 22.55 | 26.85 | 232.50                       |
|        |                       | Junio                 | 314.9                      | 22            | 89.3      | 31.23    | 22.70 | 26.95 | 201.00                       |
|        | Hitoy Cerere          | Julio                 | 429.8                      | 24            | 90.3      | 30.35    | 22.48 | 26.40 | 201.50                       |
|        |                       | Agosto                | 284.1                      | 21            | 89.3      | 30.95    | 22.33 | 26.65 | 174.38                       |
|        |                       | Septiembre            | 186.3                      | 19            | 87.5      | 31.88    | 22.20 | 27.05 | 250.00                       |
|        | La Rebusca            | Octubre               | 243.7                      | 22            | 87.8      | 31.53    | 22.28 | 26.88 | 266.60                       |
|        |                       | Noviembre             | 411.0                      | 23            | 90.3      | 29.83    | 21.83 | 25.83 | 158.25                       |
|        |                       | Diciembre             | 429.2                      | 24            | 90.0      | 29.25    | 21.13 | 25.20 | 147.91                       |
|        |                       | <b>Total anual</b>    | 3625.9                     | 250           |           |          |       |       | 2617.89                      |
|        |                       | <b>Promedio anual</b> | 302.2                      |               | 88.4      | 30.51    | 21.76 | 26.13 | 218.16                       |

**Cuadro A.3.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Caribe Alta (CA).

| Región | Estaciones Climáticas | Meses                 | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |       | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|--------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|-------|------------------------------|
|        |                       |                       |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.  |                              |
| CA     | Sitio Mata            | Enero                 | 246.8                      | 13            | 86.0      | 29.15    | 20.58 | 24.85 | 246.80                       |
|        |                       | Febrero               | 140.6                      | 11            | 85.0      | 29.75    | 20.43 | 25.10 | 140.60                       |
|        |                       | Marzo                 | 97.3                       | 9             | 84.0      | 30.18    | 20.90 | 25.55 | 97.30                        |
|        |                       | Abril                 | 111.4                      | 11            | 85.0      | 30.88    | 21.70 | 26.30 | 111.40                       |
|        |                       | Mayo                  | 299.3                      | 20            | 87.0      | 31.18    | 22.55 | 26.85 | 299.30                       |
|        |                       | Junio                 | 280.5                      | 19            | 87.0      | 31.23    | 22.70 | 26.95 | 280.50                       |
|        |                       | Julio                 | 278.6                      | 21            | 88.0      | 30.35    | 22.48 | 26.40 | 278.60                       |
|        |                       | Agosto                | 266.7                      | 19            | 87.0      | 30.95    | 22.33 | 26.65 | 266.70                       |
|        |                       | Septiembre            | 246.6                      | 18            | 85.0      | 31.88    | 22.20 | 27.05 | 246.60                       |
|        |                       | Octubre               | 247.1                      | 20            | 85.0      | 31.53    | 22.28 | 26.88 | 247.10                       |
|        |                       | Noviembre             | 323.8                      | 20            | 87.0      | 29.83    | 21.83 | 25.83 | 323.80                       |
|        |                       | Diciembre             | 289.9                      | 17            | 86.0      | 29.25    | 21.13 | 25.20 | 289.90                       |
|        |                       | <b>Total anual</b>    | 2828.6                     | 198           |           |          |       |       | 2954.92                      |
|        |                       | <b>Promedio anual</b> | 235.7                      |               | 86.0      | 30.51    | 21.76 | 26.13 | 246.24                       |

**Cuadro A.4.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Caribe Sur (CS).

| Región                | Estaciones Climáticas | Meses      | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |       | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|-----------------------|------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|-------|------------------------------|
|                       |                       |            |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.  |                              |
| CS                    | Sixaola               | Enero      | 226.7                      | 19            | 87.5      | 29.30    | 21.15 | 25.25 | 201.50                       |
|                       |                       | Febrero    | 199.0                      | 17            | 85.5      | 29.80    | 21.00 | 25.40 | 266.00                       |
|                       |                       | Marzo      | 191.0                      | 18            | 84.5      | 30.05    | 21.35 | 25.70 | 310.00                       |
|                       |                       | Abril      | 175.8                      | 16            | 85.5      | 30.95    | 22.30 | 26.60 | 240.00                       |
|                       |                       | Mayo       | 272.8                      | 20            | 85.0      | 31.55    | 22.95 | 27.30 | 248.00                       |
|                       |                       | Junio      | 210.6                      | 19            | 85.5      | 31.55    | 23.20 | 27.35 | 180.00                       |
|                       | Manzanillo            | Julio      | 346.0                      | 23            | 87.0      | 30.40    | 22.85 | 26.60 | 217.00                       |
|                       |                       | Agosto     | 188.1                      | 18            | 86.5      | 31.00    | 22.70 | 26.90 | 201.50                       |
|                       |                       | Septiembre | 121.4                      | 16            | 85.5      | 31.65    | 22.80 | 27.25 | 210.00                       |
|                       |                       | Octubre    | 126.3                      | 18            | 86.5      | 31.30    | 22.85 | 27.05 | 202.00                       |
|                       |                       | Noviembre  | 272.5                      | 20            | 88.5      | 29.85    | 22.40 | 26.10 | 195.00                       |
|                       |                       | Diciembre  | 313.5                      | 21            | 88.0      | 29.40    | 21.70 | 25.55 | 217.00                       |
| <b>Total anual</b>    |                       |            | 2643.4                     | 222           |           |          |       |       | 2687.50                      |
| <b>Promedio anual</b> |                       |            | 220.3                      |               | 86.29     | 30.57    | 22.27 | 26.42 | 223.96                       |

**Cuadro A.5.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Cordillera de Guanacaste y Tilarán (CGT).

| Región                | Estaciones Climáticas | Meses      | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |       | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|-----------------------|------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|-------|------------------------------|
|                       |                       |            |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.  |                              |
| CGT                   | Hacienda Mojica       | Enero      | 4.6                        | 4             | 63.0      | 31.60    | 24.50 | 28.00 | 267.38                       |
|                       |                       | Febrero    | 5.5                        | 4             | 60.0      | 32.70    | 24.80 | 28.70 | 280.00                       |
|                       |                       | Marzo      | 10.1                       | 3             | 58.0      | 33.60    | 25.20 | 29.40 | 341.00                       |
|                       |                       | Abril      | 23.5                       | 4             | 60.0      | 34.80    | 25.50 | 30.20 | 315.00                       |
|                       |                       | Mayo       | 182.5                      | 15            | 72.0      | 34.00    | 24.50 | 29.30 | 248.00                       |
|                       |                       | Junio      | 179.6                      | 20            | 79.0      | 32.60    | 24.10 | 28.40 | 165.00                       |
|                       |                       | Julio      | 104.0                      | 17            | 75.0      | 32.30    | 24.20 | 28.30 | 171.00                       |
|                       |                       | Agosto     | 142.0                      | 19            | 78.0      | 32.70    | 23.60 | 28.20 | 202.00                       |
|                       |                       | Septiembre | 244.1                      | 21            | 83.0      | 32.60    | 22.90 | 27.80 | 210.00                       |
|                       |                       | Octubre    | 265.5                      | 22            | 85.0      | 31.70    | 22.80 | 27.20 | 181.00                       |
|                       |                       | Noviembre  | 70.2                       | 13            | 76.0      | 31.40    | 23.10 | 27.30 | 195.00                       |
|                       |                       | Diciembre  | 13.0                       | 6             | 68.0      | 31.50    | 24.00 | 27.70 | 248.00                       |
| <b>Total anual</b>    |                       |            | 1244.6                     | 148           |           |          |       |       | 2822.21                      |
| <b>Promedio anual</b> |                       |            | 103.7                      |               | 71.42     | 32.63    | 24.10 | 28.38 | 235.18                       |

**Cuadro A.6.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Golfo de Nicoya y Llanura Guanacasteca (GNG).

| Región | Estaciones Climáticas | Meses                 | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |       | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|--------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|-------|------------------------------|
|        |                       |                       |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.  |                              |
| GNG    | Santa Elena           | Enero                 | 4.9                        | 2             | 63.6      | 32.10    | 22.48 | 27.32 | 364.47                       |
|        |                       | Febrero               | 3.6                        | 2             | 59.8      | 33.12    | 22.88 | 28.02 | 355.00                       |
|        | La Cruz               | Marzo                 | 4.7                        | 2             | 58.2      | 34.08    | 23.42 | 28.74 | 450.00                       |
|        | Aeropuerto            | Abril                 | 35.6                       | 4             | 63.0      | 34.42    | 23.82 | 29.12 | 395.00                       |
|        | Liberia               | Mayo                  | 205.8                      | 15            | 76.2      | 32.66    | 23.62 | 28.16 | 320.00                       |
|        | Oeste 07              | Junio                 | 180.4                      | 18            | 82.0      | 31.30    | 23.32 | 27.28 | 254.00                       |
|        | San José<br>Pinilla   | Julio                 | 133.6                      | 16            | 79.2      | 31.36    | 23.16 | 27.26 | 265.00                       |
|        |                       | Agosto                | 177.6                      | 18            | 81.6      | 31.50    | 22.92 | 27.22 | 297.00                       |
|        | Santa Cruz            | Septiembre            | 278.7                      | 21            | 85.4      | 30.82    | 22.72 | 26.78 | 275.00                       |
|        |                       | Octubre               | 389.2                      | 23            | 86.8      | 29.92    | 22.64 | 26.28 | 302.00                       |
|        | Puntarenas            | Noviembre             | 95.8                       | 11            | 79.6      | 30.44    | 22.40 | 26.42 | 287.00                       |
|        |                       | Diciembre             | 17.5                       | 4             | 71.2      | 31.14    | 22.30 | 26.70 | 346.00                       |
|        |                       | <b>Total anual</b>    | 1527.4                     | 135           |           |          |       |       | 3910.00                      |
|        |                       | <b>Promedio anual</b> | 127.3                      |               | 73.88     | 31.91    | 22.97 | 27.44 | 325.83                       |

**Cuadro A.7.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Los Santos (LS).

| Región | Estaciones Climáticas | Meses                 | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |       | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|--------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|-------|------------------------------|
|        |                       |                       |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.  |                              |
| LS     | La Lucha 2            | Enero                 | 68.6                       | 15            | 83.0      | 24.50    | 14.50 | 19.50 | 263.50                       |
|        |                       | Febrero               | 55.5                       | 12            | 79.5      | 25.85    | 14.55 | 20.15 | 350.00                       |
|        |                       | Marzo                 | 88.2                       | 13            | 80.0      | 26.85    | 14.95 | 20.95 | 403.00                       |
|        |                       | Abril                 | 260.0                      | 19            | 83.0      | 26.90    | 15.70 | 21.30 | 360.00                       |
|        |                       | Mayo                  | 370.5                      | 27            | 87.0      | 25.80    | 16.05 | 20.95 | 227.00                       |
|        |                       | Junio                 | 279.2                      | 26            | 88.0      | 24.80    | 16.20 | 20.50 | 180.00                       |
|        | Montecarlo            | Julio                 | 232.1                      | 25            | 88.0      | 24.45    | 15.85 | 20.15 | 186.00                       |
|        |                       | Agosto                | 340.4                      | 28            | 87.5      | 25.00    | 15.70 | 20.35 | 217.00                       |
|        |                       | Septiembre            | 427.7                      | 26            | 88.0      | 24.95    | 15.65 | 20.30 | 195.00                       |
|        |                       | Octubre               | 533.2                      | 29            | 90.0      | 24.10    | 15.55 | 19.85 | 217.00                       |
|        |                       | Noviembre             | 347.9                      | 28            | 91.0      | 23.80    | 15.40 | 19.60 | 225.00                       |
|        |                       | Diciembre             | 153.2                      | 23            | 87.5      | 23.75    | 14.85 | 19.30 | 279.00                       |
|        |                       | <b>Total anual</b>    | 3156.3                     | 268           |           |          |       |       | 3102.83                      |
|        |                       | <b>Promedio anual</b> | 263.0                      |               | 86.04     | 25.06    | 15.41 | 20.24 | 258.57                       |

**Cuadro A.8.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Norte (N).

| Región                | Estaciones Climáticas        | Meses      | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |         | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|------------------------------|------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|---------|------------------------------|
|                       |                              |            |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.    |                              |
| N                     | Finca<br>Brasilia del<br>Oro | Enero      | 170.1                      | 22            | 91.0      | 26.60    | 19.90 | 23.20   | 161.20                       |
|                       |                              | Febrero    | 93.5                       | 16            | 88.0      | 27.60    | 19.80 | 23.70   | 197.00                       |
|                       |                              | Marzo      | 66.0                       | 14            | 85.0      | 29.10    | 20.20 | 24.60   | 267.00                       |
|                       |                              | Abril      | 55.6                       | 11            | 83.0      | 30.60    | 20.80 | 25.70   | 174.00                       |
|                       |                              | Mayo       | 291.4                      | 22            | 87.0      | 30.00    | 21.20 | 25.60   | 181.00                       |
|                       |                              | Junio      | 400.6                      | 27            | 91.0      | 29.10    | 21.40 | 25.30   | 180.00                       |
|                       |                              | Julio      | 460.4                      | 29            | 92.0      | 28.10    | 21.40 | 24.70   | 155.00                       |
|                       |                              | Agosto     | 342.8                      | 27            | 91.0      | 28.80    | 21.30 | 25.10   | 155.00                       |
|                       |                              | Septiembre | 320.9                      | 25            | 90.0      | 29.60    | 20.90 | 25.30   | 180.00                       |
|                       |                              | Octubre    | 360.5                      | 25            | 90.0      | 29.10    | 20.80 | 25.00   | 152.00                       |
|                       |                              | Noviembre  | 333.1                      | 23            | 91.0      | 27.50    | 20.70 | 24.10   | 152.00                       |
|                       |                              | Diciembre  | 273.6                      | 24            | 92.0      | 26.40    | 20.30 | 23.30   | 134.00                       |
| <b>Total anual</b>    |                              | 3168.5     | 265                        |               |           |          |       | 2088.08 |                              |
| <b>Promedio anual</b> |                              | 264.0      |                            | 89.25         | 28.54     | 20.73    | 24.63 | 174.01  |                              |

**Cuadro A.9.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Norte Alta (NA).

| Región                | Estaciones Climáticas | Meses      | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |         | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|-----------------------|------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|---------|------------------------------|
|                       |                       |            |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.    |                              |
| NA                    | Santa Clara<br>ITCR   | Enero      | 199.9                      | 16            | 83.0      | 29.00    | 20.30 | 24.70   | 186.00                       |
|                       |                       | Febrero    | 117.6                      | 11            | 79.0      | 30.00    | 20.00 | 25.00   | 210.00                       |
|                       |                       | Marzo      | 85.5                       | 10            | 77.0      | 30.90    | 20.10 | 25.50   | 304.00                       |
|                       |                       | Abril      | 65.2                       | 9             | 77.0      | 32.00    | 20.70 | 26.30   | 300.00                       |
|                       |                       | Mayo       | 274.9                      | 21            | 84.0      | 31.40    | 22.00 | 26.70   | 196.00                       |
|                       |                       | Junio      | 384.7                      | 25            | 87.0      | 30.30    | 22.20 | 26.30   | 180.00                       |
|                       |                       | Julio      | 428.6                      | 27            | 88.0      | 29.60    | 22.30 | 25.90   | 202.00                       |
|                       |                       | Agosto     | 390.2                      | 26            | 87.0      | 30.20    | 21.90 | 26.00   | 202.00                       |
|                       |                       | Septiembre | 377.6                      | 26            | 86.0      | 30.70    | 21.60 | 26.10   | 195.00                       |
|                       |                       | Octubre    | 392.7                      | 25            | 86.0      | 30.30    | 21.60 | 26.00   | 186.00                       |
|                       |                       | Noviembre  | 369.9                      | 24            | 88.0      | 29.00    | 21.40 | 25.20   | 165.00                       |
|                       |                       | Diciembre  | 283.9                      | 21            | 87.0      | 28.60    | 20.90 | 24.70   | 202.00                       |
| <b>Total anual</b>    |                       | 3370.7     | 241                        |               |           |          |       | 2526.63 |                              |
| <b>Promedio anual</b> |                       | 280.9      |                            | 84.08         | 30.17     | 21.25    | 25.70 | 210.55  |                              |

**Cuadro A.10.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Pacífico Central (PC).

| Región                | Estaciones Climáticas | Meses      | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |       | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|-----------------------|------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|-------|------------------------------|
|                       |                       |            |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.  |                              |
| PC                    | Damas                 | Enero      | 58.8                       | 7             | 82.0      | 31.30    | 21.90 | 26.60 | 372.00                       |
|                       |                       | Febrero    | 27.7                       | 4             | 78.0      | 32.10    | 22.10 | 27.10 | 364.00                       |
|                       |                       | Marzo      | 39.1                       | 5             | 78.0      | 32.60    | 22.80 | 27.70 | 393.00                       |
|                       |                       | Abril      | 157.4                      | 13            | 82.0      | 32.40    | 23.40 | 27.90 | 330.00                       |
|                       |                       | Mayo       | 422.1                      | 22            | 86.0      | 31.30    | 23.40 | 27.40 | 248.00                       |
|                       |                       | Junio      | 410.5                      | 23            | 87.0      | 30.90    | 23.20 | 27.10 | 225.00                       |
|                       |                       | Julio      | 440.1                      | 25            | 87.0      | 30.80    | 23.00 | 26.90 | 264.00                       |
|                       |                       | Agosto     | 496.6                      | 26            | 88.0      | 30.70    | 22.90 | 26.80 | 238.00                       |
|                       |                       | Septiembre | 529.0                      | 25            | 88.0      | 30.50    | 22.70 | 26.60 | 240.00                       |
|                       |                       | Octubre    | 623.4                      | 26            | 89.0      | 30.10    | 22.90 | 26.50 | 202.00                       |
|                       |                       | Noviembre  | 385.7                      | 23            | 89.0      | 30.00    | 22.80 | 26.40 | 210.00                       |
|                       |                       | Diciembre  | 156.8                      | 15            | 85.0      | 30.70    | 22.50 | 26.60 | 279.00                       |
| <b>Total anual</b>    |                       |            | 3747.2                     | 214           |           |          |       |       | 3363.33                      |
| <b>Promedio anual</b> |                       |            | 312.3                      |               | 84.92     | 31.12    | 22.80 | 26.97 | 280.28                       |

**Cuadro A.11.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Pacífico Sur (PS).

| Región                | Estaciones Climáticas | Meses      | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |       | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|-----------------------|------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|-------|------------------------------|
|                       |                       |            |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.  |                              |
| PS                    | Finca el Patio        | Enero      | 75.5                       | 13            | 83.3      | 33.03    | 21.63 | 27.33 | 191.17                       |
|                       |                       | Febrero    | 59.5                       | 10            | 80.7      | 33.87    | 21.63 | 27.77 | 238.00                       |
|                       |                       | Marzo      | 105.1                      | 13            | 80.7      | 34.33    | 22.30 | 28.33 | 238.00                       |
|                       | Puerto Jiménez        | Abril      | 226.2                      | 19            | 84.3      | 33.37    | 22.73 | 28.03 | 157.00                       |
|                       |                       | Mayo       | 426.6                      | 27            | 87.7      | 32.43    | 22.73 | 27.57 | 124.00                       |
|                       |                       | Junio      | 403.2                      | 24            | 88.0      | 32.13    | 22.93 | 27.53 | 118.00                       |
|                       | Río Claro             | Julio      | 420.1                      | 26            | 88.3      | 31.93    | 22.80 | 27.37 | 105.00                       |
|                       |                       | Agosto     | 425.2                      | 26            | 88.3      | 32.03    | 22.77 | 27.37 | 110.00                       |
|                       |                       | Septiembre | 454.6                      | 27            | 88.7      | 31.77    | 22.63 | 27.20 | 104.00                       |
|                       | Coopeagropal Laurel   | Octubre    | 624.1                      | 29            | 90.3      | 30.80    | 22.57 | 26.70 | 109.00                       |
|                       |                       | Noviembre  | 489.8                      | 27            | 89.7      | 31.00    | 22.50 | 26.77 | 112.00                       |
|                       |                       | Diciembre  | 183.2                      | 19            | 87.0      | 31.87    | 21.97 | 26.97 | 141.00                       |
| <b>Total anual</b>    |                       |            | 3893.2                     | 261           |           |          |       |       | 1745.82                      |
| <b>Promedio anual</b> |                       |            | 324.4                      |               | 86.42     | 32.38    | 22.43 | 27.41 | 145.48                       |

**Cuadro A.12.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Península de Nicoya (PN).

| Región                | Estaciones Climáticas | Meses              | PM<br>(L/<br>m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR (%) | TMM (°C) |       |        | RSM<br>(MJ/<br>m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|-----------------------|--------------------|-------------------------------|---------------|--------|----------|-------|--------|---------------------------------|
|                       |                       |                    |                               |               |        | Máx.     | Mín.  | Med.   |                                 |
| PN                    | Paquera               | Enero              | 10.3                          | 4             | 74.0   | 33.90    | 19.50 | 26.70  | 387.50                          |
|                       |                       | Febrero            | 3.7                           | 1             | 71.0   | 34.90    | 19.50 | 27.20  | 455.00                          |
|                       |                       | Marzo              | 7.5                           | 2             | 67.0   | 35.70    | 21.20 | 28.40  | 465.00                          |
|                       |                       | Abril              | 39.4                          | 6             | 73.0   | 35.00    | 22.50 | 28.70  | 360.00                          |
|                       |                       | Mayo               | 319.3                         | 20            | 82.0   | 32.90    | 23.30 | 28.10  | 279.00                          |
|                       |                       | Junio              | 248.7                         | 21            | 85.0   | 32.20    | 23.30 | 27.70  | 255.00                          |
|                       |                       | Julio              | 174.4                         | 20            | 85.0   | 32.30    | 22.90 | 27.60  | 264.00                          |
|                       |                       | Agosto             | 209.6                         | 19            | 85.0   | 32.20    | 23.00 | 27.60  | 264.00                          |
|                       |                       | Septiembre         | 290.8                         | 22            | 85.0   | 31.80    | 22.50 | 27.10  | 240.00                          |
|                       |                       | Octubre            | 488.4                         | 25            | 86.0   | 30.90    | 22.30 | 26.60  | 248.00                          |
|                       |                       | Noviembre          | 101.6                         | 14            | 84.0   | 31.70    | 21.70 | 26.70  | 285.00                          |
|                       |                       | Diciembre          | 19.5                          | 7             | 80.0   | 32.70    | 20.50 | 26.60  | 341.00                          |
|                       |                       | <b>Total anual</b> |                               | 1913.2        | 161    |          |       |        |                                 |
| <b>Promedio anual</b> |                       | 159.4              |                               | 79.7533.02    | 33.02  | 21.85    | 27.42 | 320.21 |                                 |

**Cuadro A.13.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Talamanca (TM).

| Región                | Estaciones Climáticas  | Meses              | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |        | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|------------------------|--------------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|--------|------------------------------|
|                       |                        |                    |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.   |                              |
| TM                    | Altamira               | Enero              | 51.3                       | 11            | 83.5      | 25.95    | 15.05 | 20.50  | 307.93                       |
|                       |                        | Febrero            | 54.9                       | 9             | 77.5      | 27.05    | 15.15 | 21.15  | 333.00                       |
|                       |                        | Marzo              | 109.7                      | 14            | 79.0      | 27.30    | 15.70 | 21.55  | 358.00                       |
|                       |                        | Abril              | 212.3                      | 21            | 86.0      | 26.25    | 16.25 | 21.25  | 305.00                       |
|                       |                        | Mayo               | 417.6                      | 28            | 91.0      | 25.35    | 16.65 | 21.00  | 217.00                       |
|                       |                        | Junio              | 313.1                      | 25            | 91.5      | 24.90    | 16.50 | 20.70  | 180.00                       |
|                       |                        | Julio              | 261.4                      | 25            | 91.5      | 24.80    | 16.40 | 20.60  | 186.00                       |
|                       |                        | Agosto             | 334.5                      | 27            | 91.5      | 24.90    | 16.30 | 20.60  | 202.00                       |
|                       | Las Brisas<br>San Vito | Septiembre         | 464.6                      | 28            | 91.5      | 24.95    | 16.10 | 20.50  | 195.00                       |
|                       |                        | Octubre            | 527.7                      | 30            | 93.0      | 24.45    | 16.15 | 20.30  | 196.00                       |
|                       |                        | Noviembre          | 352.2                      | 27            | 93.0      | 24.30    | 16.20 | 20.25  | 210.00                       |
|                       |                        | Diciembre          | 97.5                       | 18            | 89.0      | 25.00    | 15.60 | 20.30  | 281.00                       |
|                       |                        | <b>Total anual</b> |                            | 3196.6        | 260       |          |       |        |                              |
| <b>Promedio anual</b> |                        | 266.4              |                            | 88.17         | 25.43     | 16.00    | 20.73 | 247.57 |                              |

**Cuadro A.14.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Upala y Los Chiles (UC).

| Región                | Estaciones Climáticas | Meses      | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |       | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|-----------------------|------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|-------|------------------------------|
|                       |                       |            |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.  |                              |
| UC                    | Upala                 | Enero      | 94.9                       | 21            | 85.7      | 29.83    | 20.97 | 25.37 | 178.25                       |
|                       |                       | Febrero    | 58.2                       | 15            | 82.3      | 31.00    | 20.53 | 25.77 | 189.00                       |
|                       |                       | Marzo      | 38.3                       | 12            | 79.0      | 32.43    | 20.70 | 26.53 | 295.00                       |
|                       |                       | Abril      | 44.8                       | 10            | 77.3      | 33.77    | 21.60 | 27.70 | 280.00                       |
|                       |                       | Mayo       | 206.6                      | 20            | 83.3      | 32.83    | 22.70 | 27.77 | 233.00                       |
|                       | Laguna<br>Caño Negro  | Junio      | 294.5                      | 25            | 88.0      | 31.77    | 23.13 | 27.43 | 188.00                       |
|                       |                       | Julio      | 295.5                      | 26            | 88.7      | 30.73    | 22.93 | 26.83 | 155.00                       |
|                       | Comando<br>Los Chiles | Agosto     | 244.2                      | 26            | 87.7      | 31.50    | 22.97 | 27.23 | 186.00                       |
|                       |                       | Septiembre | 230.6                      | 24            | 87.3      | 32.23    | 22.70 | 27.47 | 210.00                       |
|                       |                       | Octubre    | 243.8                      | 24            | 87.7      | 31.70    | 22.70 | 27.20 | 217.00                       |
|                       |                       | Noviembre  | 196.1                      | 21            | 88.0      | 30.37    | 22.30 | 26.33 | 180.00                       |
|                       |                       | Diciembre  | 166.5                      | 22            | 87.7      | 29.77    | 21.57 | 25.63 | 145.00                       |
| <b>Total anual</b>    |                       |            | 2114.0                     | 247           |           |          |       |       | 2454.68                      |
| <b>Promedio anual</b> |                       |            | 176.2                      |               | 85.22     | 31.49    | 22.07 | 26.77 | 204.56                       |

**Cuadro A.15.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Valle del General (VG).

| Región                | Estaciones Climáticas | Meses      | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |       | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|-----------------------|------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|-------|------------------------------|
|                       |                       |            |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.  |                              |
| VG                    | Pindeco               | Enero      | 32.1                       | 7             | 81.0      | 31.90    | 19.10 | 25.50 | 286.75                       |
|                       |                       | Febrero    | 28.9                       | 6             | 77.0      | 32.90    | 19.10 | 26.00 | 322.00                       |
|                       |                       | Marzo      | 79.6                       | 10            | 77.0      | 33.70    | 20.00 | 26.80 | 372.00                       |
|                       |                       | Abril      | 165.5                      | 14            | 82.0      | 32.80    | 20.90 | 26.80 | 255.00                       |
|                       |                       | Mayo       | 392.7                      | 25            | 86.0      | 31.30    | 21.10 | 26.20 | 206.67                       |
|                       |                       | Junio      | 299.0                      | 21            | 87.0      | 30.80    | 21.10 | 25.90 | 180.00                       |
|                       |                       | Julio      | 298.7                      | 22            | 87.0      | 30.50    | 20.90 | 25.70 | 170.50                       |
|                       |                       | Agosto     | 354.0                      | 25            | 87.0      | 30.70    | 20.80 | 25.80 | 179.80                       |
|                       |                       | Septiembre | 466.5                      | 27            | 88.0      | 30.70    | 20.60 | 25.60 | 195.00                       |
|                       |                       | Octubre    | 488.2                      | 27            | 89.0      | 30.00    | 20.80 | 25.40 | 217.00                       |
|                       |                       | Noviembre  | 322.4                      | 23            | 88.0      | 29.90    | 20.80 | 25.40 | 180.00                       |
|                       |                       | Diciembre  | 64.1                       | 11            | 84.0      | 30.70    | 20.20 | 25.40 | 263.50                       |
| <b>Total anual</b>    |                       |            | 2991.7                     | 218           |           |          |       |       | 2828.22                      |
| <b>Promedio anual</b> |                       |            | 249.3                      |               | 84.42     | 31.33    | 20.45 | 25.88 | 235.68                       |



**Cuadro A.16.** Datos meteorológicos promediados mensuales de precipitaciones, humedad relativa, días de precipitaciones, temperaturas y radiación solar en las estaciones climáticas de la región Volcánica Central Pacífico (VCP).

| Región                | Estaciones Climáticas | Meses      | PM<br>(L/ m <sup>2</sup> ) | DMP<br>(días) | HR<br>(%) | TMM (°C) |       |       | RSM<br>(MJ/ m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|-----------------------|------------|----------------------------|---------------|-----------|----------|-------|-------|------------------------------|
|                       |                       |            |                            |               |           | Máx.     | Mín.  | Med.  |                              |
| VCP                   | Volcán Irazú          | Enero      | 96.7                       | 13            | 77.3      | 16.80    | 8.40  | 12.60 | 478.43                       |
|                       |                       | Febrero    | 51.6                       | 9             | 72.7      | 17.77    | 8.27  | 13.03 | 513.80                       |
|                       | Finca 3 Llano Grande  | Marzo      | 36.1                       | 9             | 72.7      | 18.77    | 8.67  | 13.73 | 554.13                       |
|                       |                       | Abril      | 77.7                       | 13            | 77.7      | 19.27    | 9.53  | 14.43 | 400.00                       |
|                       | Laguna Fraijanes      | Mayo       | 281.7                      | 24            | 85.0      | 18.60    | 10.33 | 14.47 | 248.00                       |
|                       |                       | Junio      | 253.8                      | 23            | 87.0      | 18.17    | 10.40 | 14.30 | 150.00                       |
|                       |                       | Julio      | 205.1                      | 23            | 86.0      | 17.33    | 10.17 | 13.73 | 186.00                       |
|                       |                       | Agosto     | 213.0                      | 23            | 85.7      | 17.90    | 10.13 | 14.03 | 170.50                       |
|                       |                       | Septiembre | 325.7                      | 25            | 86.7      | 18.20    | 10.07 | 14.13 | 180.00                       |
|                       |                       | Octubre    | 384.4                      | 27            | 89.0      | 17.73    | 10.10 | 13.93 | 170.50                       |
|                       |                       | Noviembre  | 289.3                      | 23            | 88.3      | 16.90    | 9.73  | 13.30 | 165.00                       |
|                       |                       | Diciembre  | 147.3                      | 18            | 82.3      | 16.67    | 8.97  | 12.83 | 366.83                       |
| <b>Total anual</b>    |                       |            | 2362.3                     | 230           |           |          |       |       | 3583.19                      |
| <b>Promedio anual</b> |                       |            | 196.9                      |               | 82.53     | 17.84    | 9.56  | 13.71 | 298.60                       |

## Apéndice B: Resultados intermedios

**Cuadro B.1.** Valores del índice de radiación para cada una de las 16 regiones de la CMGV y su clasificación según el nivel de radiación.

| Región | Índice de radiación, IRS/ adim | Clasificación     |
|--------|--------------------------------|-------------------|
| C      | 1.76                           | Baja irradiancia  |
| CA     | 2.89                           | Media irradiancia |
| CS     | 2.25                           | Media irradiancia |
| CGT    | 3.59                           | Media irradiancia |
| GNG    | 5.27                           | Alta irradiancia  |
| LS     | 1.77                           | Baja irradiancia  |
| N      | 1.22                           | Baja irradiancia  |
| NA     | 1.84                           | Baja irradiancia  |
| PC     | 2.98                           | Media irradiancia |
| PS     | 1.06                           | Baja irradiancia  |
| PN     | 4.60                           | Alta irradiancia  |
| T      | 1.83                           | Baja irradiancia  |
| UC     | 1.70                           | Baja irradiancia  |
| VC     | 3.44                           | Media irradiancia |
| VG     | 2.44                           | Media irradiancia |
| VCP    | 2.84                           | Media irradiancia |

**Cuadro B.2.** Valores del índice de humedad para cada una de las 16 regiones de la CMGV y su clasificación según el nivel de humedad.

| Región | Índice de humedad, IH/ (m) | Clasificación |
|--------|----------------------------|---------------|
| C      | 2.49                       | Muy Húmeda    |
| CA     | 1.53                       | Húmeda Seca   |
| CS     | 1.60                       | Húmeda Seca   |
| CGT    | 0.50                       | Seca          |
| GNG    | 0.57                       | Seca          |
| LS     | 2.31                       | Húmeda        |
| N      | 2.30                       | Húmeda        |

**Cuadro B.2. (Continuación)** Valores del índice de humedad para cada una de las 16 regiones de la CMGV y su clasificación según el nivel de humedad.

| Región | Índice de humedad, IH/ (m) | Clasificación |
|--------|----------------------------|---------------|
| NA     | 2.23                       | Húmeda        |
| PC     | 2.20                       | Húmeda        |
| PS     | 2.78                       | Muy Húmeda    |
| PN     | 0.84                       | Seca          |
| T      | 2.28                       | Húmeda        |
| UC     | 1.43                       | Húmeda Seca   |
| VC     | 0.90                       | Seca          |
| VG     | 1.79                       | Húmeda        |
| VCP    | 1.49                       | Húmeda Seca   |

**Cuadro B.3.** Resultado del método de comparaciones múltiples (Ecuación 1.9) para clasificar las regiones de la CMGV según la temperatura mínima.

| Regiones comparadas | A      | B      | Decisión         |
|---------------------|--------|--------|------------------|
| CA - C              | 0.0000 | 3.8096 | No significativo |
| CS - C              | 0.5146 | 3.8096 | No significativo |
| CGT - C             | 2.3438 | 3.8096 | No significativo |
| GNG - C             | 1.2171 | 3.8096 | No significativo |
| LS - C              | 6.3437 | 3.8096 | Significativo    |
| N - C               | 1.0312 | 3.8096 | No significativo |
| NA - C              | 0.5062 | 3.8096 | No significativo |
| PC - C              | 1.0438 | 3.8096 | No significativo |
| PS - C              | 0.6771 | 3.8096 | No significativo |
| PN - C              | 0.0938 | 3.8096 | No significativo |
| T - C               | 5.7521 | 3.8096 | Significativo    |
| UC - C              | 0.3104 | 3.8096 | No significativo |
| VC - C              | 4.8514 | 3.8096 | Significativo    |
| VG - C              | 1.3063 | 3.8096 | No significativo |

**Cuadro B.3. (Continuación)** Resultado del método de comparaciones múltiples (Ecuación 1.9) para clasificar las regiones de la CMGV según la temperatura mínima.

| <b>Regiones comparadas</b> | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>Decisión</b>  |
|----------------------------|----------|----------|------------------|
| VCP - C                    | 12.1924  | 3.8096   | Significativo    |
| CS - CA                    | 0.5146   | 3.8096   | No significativo |
| CGT - CA                   | 2.3438   | 3.8096   | No significativo |
| GNG - CA                   | 1.2171   | 3.8096   | No significativo |
| LS - CA                    | 6.3437   | 3.8096   | Significativo    |
| N - CA                     | 1.0312   | 3.8096   | No significativo |
| NA - CA                    | 0.5062   | 3.8096   | No significativo |
| PC - CA                    | 1.0438   | 3.8096   | No significativo |
| PS - CA                    | 0.6771   | 3.8096   | No significativo |
| PN - CA                    | 0.0938   | 3.8096   | No significativo |
| T - CA                     | 5.7521   | 3.8096   | Significativo    |
| UC - CA                    | 0.3104   | 3.8096   | No significativo |
| VC - CA                    | 4.8514   | 3.8096   | Significativo    |
| VG - CA                    | 1.3063   | 3.8096   | No significativo |
| VCP - CA                   | 12.1924  | 3.8096   | Significativo    |
| CGT - CS                   | 1.8292   | 3.8096   | No significativo |
| GNG - CS                   | 0.7025   | 3.8096   | No significativo |
| LS - CS                    | 6.8583   | 3.8096   | Significativo    |
| N - CS                     | 1.5458   | 3.8096   | No significativo |
| NA - CS                    | 1.0208   | 3.8096   | No significativo |
| PC - CS                    | 0.5292   | 3.8096   | No significativo |
| PS - CS                    | 0.1625   | 3.8096   | No significativo |
| PN - CS                    | 0.4208   | 3.8096   | No significativo |
| T - CS                     | 6.2667   | 3.8096   | Significativo    |
| UC - CS                    | 0.2042   | 3.8096   | No significativo |
| VC - CS                    | 5.3660   | 3.8096   | Significativo    |
| VG - CS                    | 1.8208   | 3.8096   | No significativo |
| VCP - CS                   | 12.7069  | 3.8096   | Significativo    |

**Cuadro B.3. (Continuación)** Resultado del método de comparaciones múltiples (Ecuación 1.9) para clasificar las regiones de la CMGV según la temperatura mínima.

| <b>Regiones comparadas</b> | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>Decisión</b>  |
|----------------------------|----------|----------|------------------|
| GNG - CGT                  | 1.1267   | 3.8096   | No significativo |
| LS - CGT                   | 8.6875   | 3.8096   | Significativo    |
| N - CGT                    | 3.3750   | 3.8096   | No significativo |
| NA - CGT                   | 2.8500   | 3.8096   | No significativo |
| PC - CGT                   | 1.3000   | 3.8096   | No significativo |
| PS - CGT                   | 1.6667   | 3.8096   | No significativo |
| PN - CGT                   | 2.2500   | 3.8096   | No significativo |
| T - CGT                    | 8.0958   | 3.8096   | Significativo    |
| UC - CGT                   | 2.0333   | 3.8096   | No significativo |
| VC - CGT                   | 7.1951   | 3.8096   | Significativo    |
| VG - CGT                   | 3.6500   | 3.8096   | No significativo |
| VCP - CGT                  | 14.5361  | 3.8096   | Significativo    |
| LS - GNG                   | 7.5608   | 3.8096   | Significativo    |
| N - GNG                    | 2.2483   | 3.8096   | No significativo |
| NA - GNG                   | 1.7233   | 3.8096   | No significativo |
| PC - GNG                   | 0.1733   | 3.8096   | No significativo |
| PS - GNG                   | 0.5400   | 3.8096   | No significativo |
| PN - GNG                   | 1.1233   | 3.8096   | No significativo |
| T - GNG                    | 6.9692   | 3.8096   | Significativo    |
| UC - GNG                   | 0.9067   | 3.8096   | No significativo |
| VC - GNG                   | 6.0685   | 3.8096   | Significativo    |
| VG - GNG                   | 2.5233   | 3.8096   | No significativo |
| VCP - GNG                  | 13.4094  | 3.8096   | Significativo    |
| N - LS                     | 5.3125   | 3.8096   | Significativo    |
| NA - LS                    | 5.8375   | 3.8096   | Significativo    |
| PC - LS                    | 7.3875   | 3.8096   | Significativo    |
| PS - LS                    | 7.0208   | 3.8096   | Significativo    |
| PN - LS                    | 6.4375   | 3.8096   | Significativo    |

**Cuadro B.3. (Continuación)** Resultado del método de comparaciones múltiples (Ecuación 1.9) para clasificar las regiones de la CMGV según la temperatura mínima.

| <b>Regiones comparadas</b> | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>Decisión</b>  |
|----------------------------|----------|----------|------------------|
| T - LS                     | 0.5917   | 3.8096   | No significativo |
| UC - LS                    | 6.6542   | 3.8096   | Significativo    |
| VC - LS                    | 1.4924   | 3.8096   | No significativo |
| VG - LS                    | 5.0375   | 3.8096   | Significativo    |
| VCP - LS                   | 5.8486   | 3.8096   | Significativo    |
| NA - N                     | 0.5250   | 3.8096   | No significativo |
| PC - N                     | 2.0750   | 3.8096   | No significativo |
| PS - N                     | 1.7083   | 3.8096   | No significativo |
| PN - N                     | 1.1250   | 3.8096   | No significativo |
| T - N                      | 4.7208   | 3.8096   | Significativo    |
| UC - N                     | 1.3417   | 3.8096   | No significativo |
| VC - N                     | 3.8201   | 3.8096   | Significativo    |
| VG - N                     | 0.2750   | 3.8096   | No significativo |
| VCP - N                    | 11.1611  | 3.8096   | Significativo    |
| PC - NA                    | 1.5500   | 3.8096   | No significativo |
| PS - NA                    | 1.1833   | 3.8096   | No significativo |
| PN - NA                    | 0.6000   | 3.8096   | No significativo |
| T - NA                     | 5.2458   | 3.8096   | Significativo    |
| UC - NA                    | 0.8167   | 3.8096   | No significativo |
| VC - NA                    | 4.3451   | 3.8096   | Significativo    |
| VG - NA                    | 0.8000   | 3.8096   | No significativo |
| VCP - NA                   | 11.6861  | 3.8096   | Significativo    |
| PS - PC                    | 0.3667   | 3.8096   | No significativo |
| PN - PC                    | 0.9500   | 3.8096   | No significativo |
| T - PC                     | 6.7958   | 3.8096   | Significativo    |
| UC - PC                    | 0.7333   | 3.8096   | No significativo |
| VC - PC                    | 5.8951   | 3.8096   | Significativo    |
| VG - PC                    | 2.3500   | 3.8096   | No significativo |

**Cuadro B.3. (Continuación)** Resultado del método de comparaciones múltiples (Ecuación 1.9) para clasificar las regiones de la CMGV según la temperatura mínima.

| <b>Regiones comparadas</b> | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>Decisión</b>  |
|----------------------------|----------|----------|------------------|
| VCP - PC                   | 13.2361  | 3.8096   | Significativo    |
| PN - PS                    | 0.5833   | 3.8096   | No significativo |
| T - PS                     | 6.4292   | 3.8096   | Significativo    |
| UC - PS                    | 0.3667   | 3.8096   | No significativo |
| VC - PS                    | 5.5285   | 3.8096   | Significativo    |
| VG - PS                    | 1.9833   | 3.8096   | No significativo |
| VCP - PS                   | 12.8694  | 3.8096   | Significativo    |
| T - PN                     | 5.8458   | 3.8096   | Significativo    |
| UC - PN                    | 0.2167   | 3.8096   | No significativo |
| VC - PN                    | 4.9451   | 3.8096   | Significativo    |
| VG - PN                    | 1.4000   | 3.8096   | No significativo |
| VCP - PN                   | 12.2861  | 3.8096   | Significativo    |
| UC - T                     | 6.0625   | 3.8096   | Significativo    |
| VC - T                     | 0.9007   | 3.8096   | No significativo |
| VG - T                     | 4.4458   | 3.8096   | Significativo    |
| VCP - T                    | 6.4403   | 3.8096   | Significativo    |
| VC - UC                    | 5.1618   | 3.8096   | Significativo    |
| VG - UC                    | 1.6167   | 3.8096   | No significativo |
| VCP - UC                   | 12.5028  | 3.8096   | Significativo    |
| VG - VC                    | 3.5451   | 3.8096   | No significativo |
| VCP - VC                   | 7.3410   | 3.8096   | Significativo    |
| VCP - VG                   | 10.8861  | 3.8096   | Significativo    |

**Cuadro B.4.** Clasificación por temperatura mínima generada con base en el método de comparaciones múltiples aplicado a las regiones de la CMGV.

| <b>Temperatura mínima alta, <math>T_a = 19.10</math> °C</b> | <b>Temperatura mínima media, <math>T_i = 14.50</math> °C</b> | <b>Temperatura mínima baja, <math>T_b = 8.27</math> °C</b> |
|---|--|--|
| C, CA, CS, CGT, GNG, N, NA, PC, PS, PN, UC, VG              | LS, T, VC  | VCP  |

**Cuadro B.5.** Valores de energía y flux de fotones, irradiancia e irradiancia espectral para cada longitud de onda de emisión de los bombillos OSRAM HNS 15 W, según la metodología del apartado 1.2.2.a.

| Longitud de onda, $\lambda$ / (nm) | Energía del fotón, $E_f$ / (J/ f)· $10^{-19}$ | Flux de fotones, $\Phi_f$ / (f/ m <sup>2</sup> s)· $10^{18}$ | Irradiancia, $I$ / (W/ m <sup>2</sup> ) | Irradiancia espectral, $I_{esp}$ / (W/ m <sup>2</sup> nm) |
|------------------------------------|---|--|---|---|
| 200                                | 9.9324  | 5.5580   | 5.5205                                  | 0.02760   |
| 201                                | 9.8830  | 5.5858   | 5.5205                                  | 0.02746   |
| 202                                | 9.8340  | 5.6136   | 5.5205                                  | 0.02733   |
| 203                                | 9.7856  | 5.6414   | 5.5205                                  | 0.02719   |
| 204                                | 9.7376  | 5.6692   | 5.5205                                  | 0.02706   |
| 205                                | 9.6901  | 5.6970   | 5.5205                                  | 0.02693   |
| 206                                | 9.6431  | 5.7248   | 5.5205                                  | 0.02680   |
| 207                                | 9.5965  | 5.7526   | 5.5205                                  | 0.02667   |
| 208                                | 9.5504  | 5.7804   | 5.5205                                  | 0.02654   |
| 209                                | 9.5047  | 5.8082   | 5.5205                                  | 0.02641   |
| 210                                | 9.4594  | 5.8360   | 5.5205                                  | 0.02629   |
| 211                                | 9.4146  | 5.8637   | 5.5205                                  | 0.02616   |
| 212                                | 9.3702  | 5.8915   | 5.5205                                  | 0.02604   |
| 213                                | 9.3262  | 5.9193   | 5.5205                                  | 0.02592   |
| 214                                | 9.2826  | 5.9471   | 5.5205                                  | 0.02580   |
| 215                                | 9.2394  | 5.9749   | 5.5205                                  | 0.02568   |
| 216                                | 9.1966  | 6.0027   | 5.5205                                  | 0.02556   |
| 217                                | 9.1543  | 6.0305   | 5.5205                                  | 0.02544   |
| 218                                | 9.1123  | 6.0583   | 5.5205                                  | 0.02532   |
| 219                                | 9.0707  | 6.0861   | 5.5205                                  | 0.02521   |
| 220                                | 9.0294  | 6.1139   | 5.5205                                  | 0.02509   |
| 221                                | 8.9886  | 6.1416   | 5.5205                                  | 0.02498   |
| 222                                | 8.9481  | 6.1694   | 5.5205                                  | 0.02487   |
| 223                                | 8.9080  | 6.1972   | 5.5205                                  | 0.02476   |
| 224                                | 8.8682  | 6.2250   | 5.5205                                  | 0.02464   |
| 225                                | 8.8288  | 6.2528   | 5.5205                                  | 0.02454   |



**Cuadro B.5. (Continuación)** Valores de energía y flux de fotones, irradiancia e irradiancia espectral para cada longitud de onda de emisión de los bombillos OSRAM HNS 15 W, según la metodología del apartado 1.2.2.a.

| Longitud de onda, $\lambda$ (nm) | Energía del fotón, $E_f$ (J/ f)·10 <sup>-19</sup> | Flux de fotones, $\Phi_f$ (f/ m <sup>2</sup> s)·10 <sup>18</sup> | Irradiancia, I/ (W/ m <sup>2</sup> ) | Irradiancia espectral, $I_{esp}$ / (W/ m <sup>2</sup> nm) |
|----------------------------------|---|--|--------------------------------------|---|
| 226                              | 8.7897  | 6.2806   | 5.5205                               | 0.02443   |
| 227                              | 8.7510  | 6.3084   | 5.5205                               | 0.02432   |
| 228                              | 8.7126  | 6.3362   | 5.5205                               | 0.02421   |
| 229                              | 8.6746  | 6.3640   | 5.5205                               | 0.02411   |
| 230                              | 8.6368  | 6.3918   | 5.5205                               | 0.02400   |
| 231                              | 8.5995  | 6.4195   | 5.5205                               | 0.02390   |
| 232                              | 8.5624  | 6.4473   | 5.5205                               | 0.02380   |
| 233                              | 8.5256  | 6.4751   | 5.5205                               | 0.02369   |
| 234                              | 8.4892  | 6.5029   | 5.5205                               | 0.02359   |
| 235                              | 8.4531  | 6.5307   | 5.5205                               | 0.02349   |
| 236                              | 8.4173  | 6.5585   | 5.5205                               | 0.02339   |
| 237                              | 8.3818  | 6.5863   | 5.5205                               | 0.02329   |
| 238                              | 8.3465  | 6.6141   | 5.5205                               | 0.02320   |
| 239                              | 8.3116  | 6.6419   | 5.5205                               | 0.02310   |
| 240                              | 8.2770  | 6.6697   | 5.5205                               | 0.02300   |
| 241                              | 8.2426  | 6.6974   | 5.5205                               | 0.02291   |
| 242                              | 8.2086  | 6.7252   | 5.5205                               | 0.02281   |
| 243                              | 8.1748  | 6.7530   | 5.5205                               | 0.02272   |
| 244                              | 8.1413  | 6.7808   | 5.5205                               | 0.02262   |
| 245                              | 8.1081  | 6.8086   | 5.5205                               | 0.02253   |
| 246                              | 8.0751  | 6.8364   | 5.5205                               | 0.02244   |
| 247                              | 8.0424  | 6.8642   | 5.5205                               | 0.02235   |
| 248                              | 8.0100  | 6.8920   | 5.5205                               | 0.02226   |
| 249                              | 7.9778  | 6.9198   | 5.5205                               | 0.02217   |
| 250                              | 7.9459  | 6.9476   | 5.5205                               | 0.02208   |
| 251                              | 7.9142  | 6.9754   | 5.5205                               | 0.02199   |

**Cuadro B.5. (Continuación)** Valores de energía y flux de fotones, irradiancia e irradiancia espectral para cada longitud de onda de emisión de los bombillos OSRAM HNS 15 W, según la metodología del apartado 1.2.2.a.

| Longitud de onda, $\lambda$ (nm) | Energía del fotón, $E_f$ (J/ f)·10 <sup>-19</sup> | Flux de fotones, $\Phi_f$ (f/ m <sup>2</sup> s)·10 <sup>18</sup> | Irradiancia, I/ (W/ m <sup>2</sup> ) | Irradiancia espectral, $I_{esp}$ / (W/ m <sup>2</sup> nm) |
|----------------------------------|---|--|--------------------------------------|---|
| 252                              | 7.8828  | 7.0031   | 5.5205                               | 0.02191   |
| 253                              | 7.8517  | 7.0309   | 5.5205                               | 0.02182   |
| 254                              | 7.8208  | 7.0587   | 5.5205                               | 0.02173   |
| 255                              | 7.7901  | 7.0865   | 5.5205                               | 0.02165   |
| 256                              | 7.7597  | 7.1143   | 5.5205                               | 0.02156   |
| 257                              | 7.7295  | 7.1421   | 5.5205                               | 0.02148   |
| 258                              | 7.6995  | 7.1699   | 5.5205                               | 0.02140   |
| 259                              | 7.6698  | 7.1977   | 5.5205                               | 0.02131   |
| 260                              | 7.6403  | 7.2255   | 5.5205                               | 0.02123   |
| 261                              | 7.6110  | 7.2533   | 5.5205                               | 0.02115   |
| 262                              | 7.5820  | 7.2810   | 5.5205                               | 0.02107   |
| 263                              | 7.5531  | 7.3088   | 5.5205                               | 0.02099   |
| 264                              | 7.5245  | 7.3366   | 5.5205                               | 0.02091   |
| 265                              | 7.4961  | 7.3644   | 5.5205                               | 0.02083   |
| 266                              | 7.4680  | 7.3922   | 5.5205                               | 0.02075   |
| 267                              | 7.4400  | 7.4200   | 5.5205                               | 0.02068   |
| 268                              | 7.4122  | 7.4478   | 5.5205                               | 0.02060   |
| 269                              | 7.3847  | 7.4756   | 5.5205                               | 0.02052   |
| 270                              | 7.3573  | 7.5034   | 5.5205                               | 0.02045   |
| 271                              | 7.3302  | 7.5312   | 5.5205                               | 0.02037   |
| 272                              | 7.3032  | 7.5589   | 5.5205                               | 0.02030   |
| 273                              | 7.2765  | 7.5867   | 5.5205                               | 0.02022   |
| 274                              | 7.2499  | 7.6145   | 5.5205                               | 0.02015   |
| 275                              | 7.2235  | 7.6423   | 5.5205                               | 0.02007   |
| 276                              | 7.1974  | 7.6701   | 5.5205                               | 0.02000   |
| 277                              | 7.1714  | 7.6979   | 5.5205                               | 0.01993   |

**Cuadro B.5. (Continuación)** Valores de energía y flux de fotones, irradiancia e irradiancia espectral para cada longitud de onda de emisión de los bombillos OSRAM HNS 15 W, según la metodología del apartado 1.2.2.a.

| Longitud de onda, $\lambda$ (nm) | Energía del fotón, $E_f$ (J/ f)·10 <sup>-19</sup> | Flux de fotones, $\Phi_f$ (f/ m <sup>2</sup> s)·10 <sup>18</sup> | Irradiancia, I/ (W/ m <sup>2</sup> ) | Irradiancia espectral, $I_{esp}$ / (W/ m <sup>2</sup> nm) |
|----------------------------------|---|--|--------------------------------------|---|
| 278                              | 7.1456  | 7.7257   | 5.5205                               | 0.01986   |
| 279                              | 7.1200  | 7.7535   | 5.5205                               | 0.01979   |
| 280                              | 7.0946  | 7.7813   | 5.5205                               | 0.01972   |
| <b>Totales</b>                   |   |  | 447.16                               | 1.881   |

**Cuadro B.6.** Valores de energía y flux de fotones, irradiancia e irradiancia espectral para cada longitud de onda de emisión de los bombillos Phillips TL 20W/01 RS SLV/25, según la metodología del apartado 1.2.2.a.

| Longitud de onda, $\lambda$ (nm) | Energía del fotón, $E_f$ (J/ f)·10 <sup>-19</sup> | Flux de fotones, $\Phi_f$ (f/ m <sup>2</sup> s)·10 <sup>19</sup> | Irradiancia, I/ (W/ m <sup>2</sup> ) | Irradiancia espectral, $I_{esp}$ / (W/ m <sup>2</sup> nm) |
|----------------------------------|---|--|--------------------------------------|---|
| 290                              | 6.8499  | 1.0746   | 7.3606                               | 0.02538   |
| 291                              | 6.8264  | 1.0783   | 7.3606                               | 0.02529   |
| 292                              | 6.8030  | 1.0820   | 7.3606                               | 0.02521   |
| 293                              | 6.7798  | 1.0857   | 7.3606                               | 0.02512   |
| 294                              | 6.7567  | 1.0894   | 7.3606                               | 0.02504   |
| 295                              | 6.7338  | 1.0931   | 7.3606                               | 0.02495   |
| 296                              | 6.7111  | 1.0968   | 7.3606                               | 0.02487   |
| 297                              | 6.6885  | 1.1005   | 7.3606                               | 0.02478   |
| 298                              | 6.6660  | 1.1042   | 7.3606                               | 0.02470   |
| 299                              | 6.6437  | 1.1079   | 7.3606                               | 0.02462   |
| 300                              | 6.6216  | 1.1116   | 7.3606                               | 0.02454   |
| 301                              | 6.5996  | 1.1153   | 7.3606                               | 0.02445   |
| 302                              | 6.5777  | 1.1190   | 7.3606                               | 0.02437   |
| 303                              | 6.5560  | 1.1227   | 7.3606                               | 0.02429   |
| 304                              | 6.5345  | 1.1264   | 7.3606                               | 0.02421   |
| 305                              | 6.5130  | 1.1301   | 7.3606                               | 0.02413   |
| 306                              | 6.4917  | 1.1338   | 7.3606                               | 0.02405   |

**Cuadro B.6. (Continuación)** Valores de energía y flux de fotones, irradiancia e irradiancia espectral para cada longitud de onda de emisión de los bombillos Phillips TL 20W/01 RS SLV/25, según la metodología del apartado 1.2.2.a.

| Longitud de onda, $\lambda$ (nm) | Energía del fotón, $E_f$ (J/ f)·10 <sup>-19</sup> | Flux de fotones, $\Phi_f$ (f/ m <sup>2</sup> s)·10 <sup>19</sup> | Irradiancia, I/ (W/ m <sup>2</sup> ) | Irradiancia espectral, $I_{esp}$ / (W/ m <sup>2</sup> nm) |
|----------------------------------|---|--|--------------------------------------|---|
| 307                              | 6.4706  | 1.1375   | 7.3606                               | 0.02398   |
| 308                              | 6.4496  | 1.1413   | 7.3606                               | 0.02390   |
| 309                              | 6.4287  | 1.1450   | 7.3606                               | 0.02382   |
| 310                              | 6.4080  | 1.1487   | 7.3606                               | 0.02374   |
| 311                              | 6.3874  | 1.1524   | 7.3606                               | 0.02367   |
| 312                              | 6.3669  | 1.1561   | 7.3606                               | 0.02359   |
| 313                              | 6.3466  | 1.1598   | 7.3606                               | 0.02352   |
| 314                              | 6.3264  | 1.1635   | 7.3606                               | 0.02344   |
| 315                              | 6.3063  | 1.1672   | 7.3606                               | 0.02337   |
| <b>Totales</b>                   |   |  | 191.38                               | 0.6330  |

**Cuadro B.7.** Valores de energía y flux de fotones, irradiancia e irradiancia espectral para cada longitud de onda de emisión de los bombillos UVC desinfection lamp, según la metodología del apartado 1.2.2.a.

| Longitud de onda, $\lambda$ (nm) | Energía del fotón, $E_f$ (J/ f)·10 <sup>-18</sup> | Flux de fotones, $\Phi_f$ (f/ m <sup>2</sup> s)·10 <sup>18</sup> | Irradiancia, I/ (W/ m <sup>2</sup> ) | Irradiancia espectral, $I_{esp}$ / (W/ m <sup>2</sup> nm) |
|----------------------------------|---|--|--------------------------------------|---|
| 185                              | 1.0738  | 1.7137   | 1.8402                               | 0.00995   |
| 186                              | 1.0680  | 1.7230   | 1.8402                               | 0.00989   |
| 187                              | 1.0623  | 1.7323   | 1.8402                               | 0.00984   |
| 188                              | 1.0566  | 1.7415   | 1.8402                               | 0.00979   |
| 189                              | 1.0510  | 1.7508   | 1.8402                               | 0.00974   |
| 190                              | 1.0455  | 1.7600   | 1.8402                               | 0.00969   |
| 191                              | 1.0400  | 1.7693   | 1.8402                               | 0.00963   |
| 192                              | 1.0346  | 1.7786   | 1.8402                               | 0.00958   |
| 193                              | 1.0293  | 1.7878   | 1.8402                               | 0.00953   |
| 194                              | 1.0240  | 1.7971   | 1.8402                               | 0.00949   |
| 195                              | 1.0187  | 1.8064   | 1.8402                               | 0.00944   |

**Cuadro B.7. (Continuación)** Valores de energía y flux de fotones, irradiancia e irradiancia espectral para cada longitud de onda de emisión de los bombillos UVC desinfection lamp, según la metodología del apartado 1.2.2.a.

| <b>Longitud de onda, <math>\lambda</math> (nm)</b> | <b>Energía del fotón, <math>E_f</math> (J/ f)·10<sup>-19</sup></b> | <b>Flux de fotones, <math>\Phi_f</math> (f/ m<sup>2</sup> s)·10<sup>18</sup></b> | <b>Irradiancia, I (W/ m<sup>2</sup>)</b> | <b>Irradiancia espectral, I<sub>esp</sub> (W/ m<sup>2</sup> nm)</b> |
|--|--|--|--|---|
| 196  | 1.0135·10 <sup>-18</sup>   | 1.8156   | 1.8402                                   | 0.00939   |
| 197  | 1.0084·10 <sup>-18</sup>   | 1.8249   | 1.8402                                   | 0.00934   |
| 198  | 1.0033·10 <sup>-18</sup>   | 1.8342   | 1.8402                                   | 0.00929   |
| 199  | 9.9823   | 1.8434   | 1.8402                                   | 0.00925   |
| 200  | 9.9324   | 1.8527   | 1.8402                                   | 0.00920   |
| 201  | 9.8830   | 1.8619   | 1.8402                                   | 0.00915   |
| 202  | 9.8340   | 1.8712   | 1.8402                                   | 0.00911   |
| 203  | 9.7856   | 1.8805   | 1.8402                                   | 0.00906   |
| 204  | 9.7376   | 1.8897   | 1.8402                                   | 0.00902   |
| 205  | 9.6901   | 1.8990   | 1.8402                                   | 0.00898   |
| 206  | 9.6431   | 1.9083   | 1.8402                                   | 0.00893   |
| 207  | 9.5965   | 1.9175   | 1.8402                                   | 0.00889   |
| 208  | 9.5504   | 1.9268   | 1.8402                                   | 0.00885   |
| 209  | 9.5047   | 1.9361   | 1.8402                                   | 0.00880   |
| 210  | 9.4594   | 1.9453   | 1.8402                                   | 0.00876   |
| 211  | 9.4146   | 1.9546   | 1.8402                                   | 0.00872   |
| 212  | 9.3702   | 1.9638   | 1.8402                                   | 0.00868   |
| 213  | 9.3262   | 1.9731   | 1.8402                                   | 0.00864   |
| 214  | 9.2826   | 1.9824   | 1.8402                                   | 0.00860   |
| 215  | 9.2394   | 1.9916   | 1.8402                                   | 0.00856   |
| 216  | 9.1966   | 2.0009   | 1.8402                                   | 0.00852   |
| 217  | 9.1543   | 2.0102   | 1.8402                                   | 0.00848   |
| 218  | 9.1123   | 2.0194   | 1.8402                                   | 0.00844   |
| 219  | 9.0707   | 2.0287   | 1.8402                                   | 0.00840   |
| 220  | 9.0294   | 2.0380   | 1.8402                                   | 0.00836   |
| 221  | 8.9886   | 2.0472   | 1.8402                                   | 0.00833   |

**Cuadro B.7. (Continuación)** Valores de energía y flux de fotones, irradiancia e irradiancia espectral para cada longitud de onda de emisión de los bombillos UVC desinfection lamp, según la metodología del apartado 1.2.2.a.

| Longitud de onda, $\lambda$ (nm) | Energía del fotón, $E_f$ (J/ f)·10 <sup>-19</sup> | Flux de fotones, $\Phi_f$ (f/ m <sup>2</sup> s)·10 <sup>18</sup> | Irradiancia, I/ (W/ m <sup>2</sup> ) | Irradiancia espectral, $I_{esp}$ / (W/ m <sup>2</sup> nm) |
|----------------------------------|---|--|--------------------------------------|---|
| 222                              | 8.9481  | 2.0565   | 1.8402                               | 0.00829   |
| 223                              | 8.9080  | 2.0657   | 1.8402                               | 0.00825   |
| 224                              | 8.8682  | 2.0750   | 1.8402                               | 0.00821   |
| 225                              | 8.8288  | 2.0843   | 1.8402                               | 0.00818   |
| 226                              | 8.7897  | 2.0935   | 1.8402                               | 0.00814   |
| 227                              | 8.7510  | 2.1028   | 1.8402                               | 0.00811   |
| 228                              | 8.7126  | 2.1121   | 1.8402                               | 0.00807   |
| 229                              | 8.6746  | 2.1213   | 1.8402                               | 0.00804   |
| 230                              | 8.6368  | 2.1306   | 1.8402                               | 0.00800   |
| 231                              | 8.5995  | 2.1398   | 1.8402                               | 0.00797   |
| 232                              | 8.5624  | 2.1491   | 1.8402                               | 0.00793   |
| 233                              | 8.5256  | 2.1584   | 1.8402                               | 0.00790   |
| 234                              | 8.4892  | 2.1676   | 1.8402                               | 0.00786   |
| 235                              | 8.4531  | 2.1769   | 1.8402                               | 0.00783   |
| 236                              | 8.4173  | 2.1862   | 1.8402                               | 0.00780   |
| 237                              | 8.3818  | 2.1954   | 1.8402                               | 0.00776   |
| 238                              | 8.3465  | 2.2047   | 1.8402                               | 0.00773   |
| 239                              | 8.3116  | 2.2140   | 1.8402                               | 0.00770   |
| 240                              | 8.2770  | 2.2232   | 1.8402                               | 0.00767   |
| 241                              | 8.2426  | 2.2325   | 1.8402                               | 0.00764   |
| 242                              | 8.2086  | 2.2417   | 1.8402                               | 0.00760   |
| 243                              | 8.1748  | 2.2510   | 1.8402                               | 0.00757   |
| 244                              | 8.1413  | 2.2603   | 1.8402                               | 0.00754   |
| 245                              | 8.1081  | 2.2695   | 1.8402                               | 0.00751   |
| 246                              | 8.0751  | 2.2788   | 1.8402                               | 0.00748   |
| 247                              | 8.0424  | 2.2881   | 1.8402                               | 0.00745   |

**Cuadro B.7. (Continuación)** Valores de energía y flux de fotones, irradiancia e irradiancia espectral para cada longitud de onda de emisión de los bombillos UVC desinfection lamp, según la metodología del apartado 1.2.2.a.

| <b>Longitud de onda, <math>\lambda</math> (nm)</b> | <b>Energía del fotón, <math>E_f</math> (J/ f)·10<sup>-19</sup></b> | <b>Flux de fotones, <math>\Phi_f</math> (f/ m<sup>2</sup> s)·10<sup>18</sup></b> | <b>Irradiancia, I/ (W/ m<sup>2</sup>)</b> | <b>Irradiancia espectral, I<sub>esp</sub>/ (W/ m<sup>2</sup> nm)</b> |
|--|--|--|---|--|
| 248  | 8.0100   | 2.2973   | 1.8402                                    | 0.00742  |
| 249  | 7.9778   | 2.3066   | 1.8402                                    | 0.00739  |
| 250  | 7.9459   | 2.3159   | 1.8402                                    | 0.00736  |
| 251  | 7.9142   | 2.3251   | 1.8402                                    | 0.00733  |
| 252  | 7.8828   | 2.3344   | 1.8402                                    | 0.00730  |
| 253  | 7.8517   | 2.3436   | 1.8402                                    | 0.00727  |
| 254  | 7.8208   | 2.3529   | 1.8402                                    | 0.00724  |
| <b>Totales</b>                                     |  |  | 128.81                                    | 0.5919   |

## **CAPÍTULO 2**

### **Construcción del equipo para el envejecimiento de los asfaltos a partir de factores climáticos costarricenses**

#### **2.1. MARCO TEÓRICO**

Para la construcción del EEMA se consideraron criterios de seguridad, normas y equipos comerciales. Se investigaron tópicos asociados a la programación de PLC y comprobación térmica en equipos. Dichas temáticas se tratan en las secciones siguientes.

##### **2.1.1. Equipos tradicionales para el envejecimiento de los asfaltos**

Entre los equipos más comunes para los ensayos de envejecimiento acelerado de asfaltos se encuentran el PAV (*Pressure Aging Vessel*), cuyo funcionamiento se basa en exponer las muestras a altas temperaturas y altas presiones para catalizar los mecanismos de envejecimiento (ASTM, 2018a), y el RTFO (*Rolling Thin Film Oven*), cuyo principio es simular los tiempos de mezclado y calentamiento previos a la puesta en servicio de los asfaltos, por lo que suele ser complementario a los ensayos en el PAV (AASHTO, 2016).

Seguidamente, se detallan aspectos generales respecto a ambos equipos y las normas que los rigen.

##### **a. Norma ASTM D2872-04 (sobre el RTFO)**

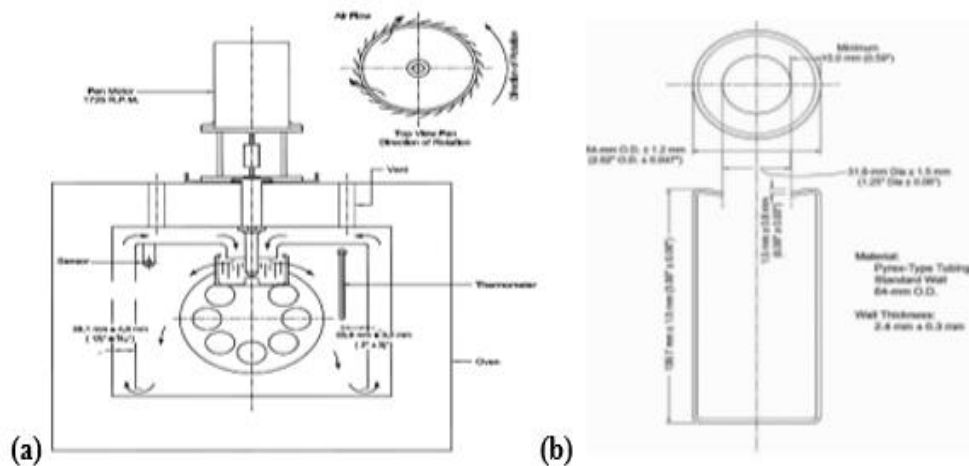
El ensayo en el RTFO se enfoca en el envejecimiento a corto plazo que sufre el asfalto durante el calentamiento, mezclado, transporte desde que sale de la planta hasta su colocación en la vía para el servicio. En este caso las muestras se ponen en un receptor de muestras RTFO, el cual permite su colocación en forma de una capa delgada que al introducirse en el equipo permanece en rotación durante el ensayo (AASHTO, 2016).

El ensayo consiste en un ciclo de calentamiento de la capa móvil de bitumen durante 85 minutos y a 163 °C. Como respuesta se determinan las propiedades mecánicas como viscosidad, ductilidad y, de forma opcional, cambio de masa (AASHTO, 2016).



El dispositivo (ver Figura 2.1) consiste en un horno que emite calor como efecto de una resistencia eléctrica y se transfiere de forma convectiva mediante un abanico colocado en la cara superior del horno (AASHTO, 2016).

El calor se distribuye sobre un disco que posee cilindros receptores de muestras, los cuales se mantienen en rotación durante el ensayo. Las especificaciones sobre el diseño se encuentran en la norma en cuestión (AASHTO, 2016).



**Figura 2.1.** Diagrama del dispositivo RTFO para los ensayos normados por la ASTM D2872-04: a) vista general del equipo; b) receptor de muestras.

Fuente: (AASHTO, 2016).

### b. Norma ASTM D6521-19a (sobre el PAV)

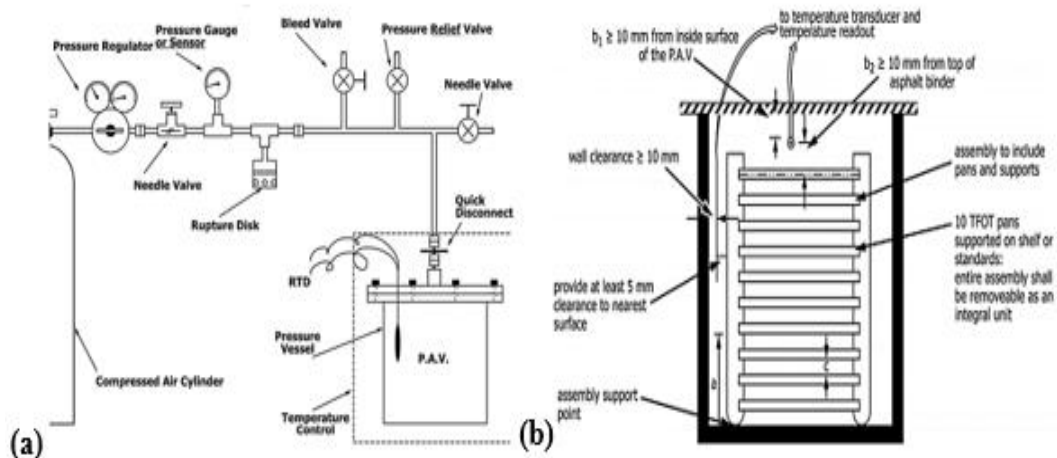
El término PAV se traduce del inglés como recipiente de envejecimiento a presión. La metodología descrita por la norma en cuestión para el envejecimiento acelerado del asfalto consiste en la aplicación de altas temperaturas en conjunto con aire presurizado.

Se enfoca en simular la oxidación del asfalto en condiciones de servicio durante periodos mayores a siete años (es decir largo plazo) y se determinan los resultados mediante la medición de las propiedades mecánicas del asfalto de previo y posterior al ensayo en PAV (ASTM, 2018a).

Sin embargo, su alcance para simular condiciones climáticas es limitado y no puede referirse a un solo ciclo operativo del PAV, además, ignora otros factores influyentes en la oxidación del asfalto puesto en servicio (ASTM, 2018).

El dispositivo PAV para los ensayos de envejecimiento acelerado, que se aprecia en la Figura 2.2, está compuesto de un recipiente a presión, un horno, controladores y sensores de temperatura y presión, además de estar asociado a un sistema adecuado de registro de dichas variables, encuentra fabricado de acero inoxidable para operar a  $(2.1 \pm 0.1)$  MPa de presión y a una temperatura entre los 90 °C y los 110 °C (ASTM, 2018).

Cabe destacar que este método de envejecimiento acelerado actúa a través de un mecanismo antinatural, debido a que las muestras se ven expuestas a condiciones muy distintas a las de intemperie y carece de la exposición a la luz UV.



**Figura 2.2.** Diagrama del dispositivo para ensayos PAV: a) vista general; b) enfoque en el horno y recepción de muestras.

Fuente: (ASTM, 2018a).

### 2.1.2. Equipos de envejecimiento de los asfaltos por meteorización

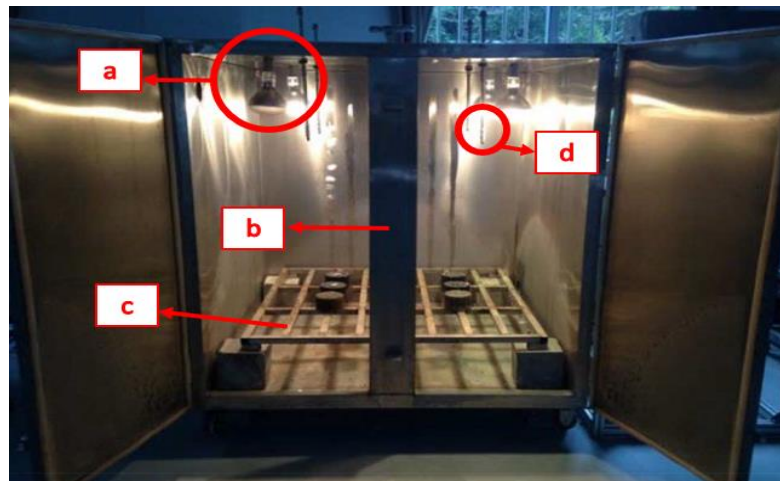
En el Capítulo 1 se mencionaron algunos equipos para el envejecimiento acelerado de los asfaltos desde un enfoque hacia los ensayos y tipos de muestras. En la presente sección del Capítulo 2, se abordaron desde un enfoque constructivo, lo cual permitió robustecer el proceso constructivo del EEMA.

#### a. *Accelerated Weathering Machine (AWM)*

En la sección 1.1.3.a del Capítulo 1 se mencionó a la AWM (ver Figura 1.4) como un equipo para el envejecimiento acelerado de los materiales por meteorización con base en la norma ASTM D4799. Seguidamente, se detallan aspectos constructivos de la AWM.

Con base en la Figura 2.3.a, se observa que el modelo de bombillos UV empleados corresponden a los Ultra Vitalux 300 W de OSRAM; en la Figura 2.3.b se observa que el material de la carcasa es acero inoxidable; la Figura 2.3.c evidencia una base de hierro que no permite la recepción de muestras fluidas, y la Figura 2.3.d muestra los aspersores empleados de tipo *spray* (Shi *et al.*, 2019).

Cabe destacar que la AWM desarrollada por Shi *et al.* (2019), posee mayor volumen que los equipos de meteorización convencionales, como el de Q-Lab. Esto se debe a que los bombillos Ultra Vitalux 300 W disipan una alta potencia y generan altas temperaturas, por lo que la proximidad a la fuente luminosa para alcanzar temperaturas de ensayo adecuadas es un inconveniente de la AWM. Además, no se posee control automatizado de irradiancia como sugieren las guías G151 y G154 de la ASTM (ASTM, 2019b; ASTM, 2016a).



**Figura 2.3.** Detalles constructivos de la AWM: a) Bombillos Ultra Vitalux 300 W OSRAM; b) Acero inoxidable de la carcasa; c) Base de hierro; d) Aspersores.

Fuente: (Shi *et al.*, 2019).

Otra desventaja del diseño de la AWM es que la cámara de ensayo no posee aislamiento térmico, lo cual maximiza las pérdidas de calor hacia los alrededores, aumenta el riesgo de quemaduras debido al calentamiento del acero inoxidable de la carcasa y se desaprovecha la capacidad de los bombillos (Shi *et al.*, 2019).

Entre las ventajas del diseño de la AWM se presenta un lazo de control de temperatura mediante ventiladores para enfriamiento y un sistema de calentamiento para mantener la

temperatura al valor de ensayo y se presenta un lazo de control de humedad con gotas de aspersión similares a las precipitaciones naturales promedio (Shi *et al.*, 2019).

**b. Heavy Vehicle Simulator (HVS)**

Los HVS son equipos que en su forma original simulan los factores de carga vehicular, precipitaciones y temperatura, sin embargo, suelen incorporarse modificaciones para incorporar el factor de radiación solar, como las efectuadas a la unidad HVS del LanammeUCR, a la cual se le añadieron como fuentes de radiación luminosa bombillos UV (Ultra Vitalux 300 W) e infrarrojos (Leiva *et al.*, 2016).

En la Figura 2.4 se observan un par de unidades HVS; a la izquierda la del *Florida Department of Transportation Research* (FDOT) y a la derecha la del LanammeUCR. Entre las ventajas del HVS se encuentran una alta automatización de los parámetros de ensayo originales, una robusta instrumentación que contribuye a la captación precisa de datos y la incorporación del factor vehicular como parte del envejecimiento del pavimento asfáltico (FDOT, 2007; Leiva *et al.*, 2016).



**Figura 2.4.** Ejemplos de unidades HVS: a la izquierda la unidad del FDOT y a la derecha la unidad del LanammeUCR.

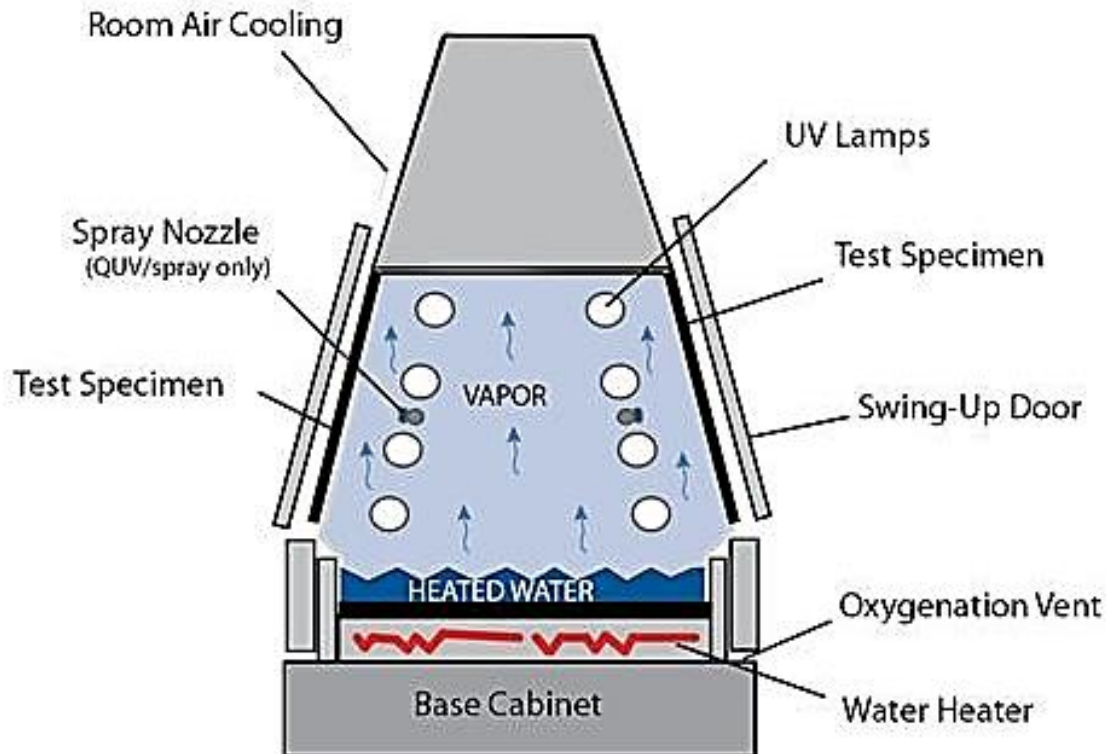
Fuente: (FDOT, 2007; Leiva *et al.*, 2016).

Una desventaja que presentan las unidades HVS son el tamaño de muestra requerido, además de su preparación.

**c. QUV accelerated weathering tester**

El equipo QUV de Q-Lab consiste en una cámara que simula los factores meteorológicos de radiación, temperatura, condensación, evaporación y precipitaciones. Posee una adherencia

completa a las especificaciones técnicas estipuladas por las guías G151 y G154 de la ASTM, además de la norma ASTM D4799. Los detalles de la cámara QUV de Q-Lab se observan en la Figura 2.5 (ASTM, 2016a, 2017b, 2019a).



**Figura 2.5.** Detalles de diseño de la QUV de Q-Lab.

Fuente: (Q-Lab, 2005).

La QUV es el equipo más idóneo para el desarrollo de ensayos por meteorización sobre materiales, pues posee lazos de control para humedad, temperatura e irradiancia; el agua para los ciclos de precipitaciones pasa por varios filtros purificadores, los bombillos son de irradiancia continua y no de picos de densidad radiante, además de emplear espectros UV aproximados a los encontrados en la intemperie, es decir, de tipo UVA y UVB (Q-Lab, 2005).

### 2.1.3. Normas y guías para los equipos de envejecimiento por meteorización

Para el diseño y construcción de equipos, los estándares internacionales proveen una base de los requisitos mínimos por alcanzar en los equipos en desarrollo. Seguidamente, se presenta en el Cuadro 2.1, un resumen de las normas y guías principales para el diseño y construcción de equipos para envejecimiento acelerado por meteorización.

**Cuadro 2.1.** Normas y guías principales para el diseño y construcción de equipos para envejecimiento acelerado y la evaluación de su desempeño.

| <b>Norma/ Guía</b>       | <b>Nombre</b>   | <b>Descripción</b>   |
|--------------------------|---|--|
| ASTM D4799 <sup>9</sup>  | Standard Practice for Accelerated Weathering Test Conditions and Procedures for Bituminous Materials (Fluorescent UV, Water Spray, and Condensation Method) | Esta norma describe las condiciones experimentales para ensayos de meteorización mediante la consideración de los factores de radiación y aspersion                                |
| ASTM D1669 <sup>10</sup> | Standard Practice for Preparation of Test Panels for Accelerated and Outdoor Weathering of Bituminous Coatings  | En esta norma se aborda la preparación de muestras bituminosas para ensayos por meteorización, lo que incluye dimensiones de las muestras y especificaciones de los porta muestras |
| ASTM G113 <sup>11</sup>  | Standard Terminology Relating to Natural and Artificial Weathering Tests of Nonmetallic Materials   | Esta guía consiste en un compendio de términos relacionados a los ensayos de envejecimiento por meteorización  |
| ASTM D1670 <sup>12</sup> | Standard Test Method for Failure End Point in Accelerated and Outdoor Weathering of Bituminous Materials  | Esta norma se enfoca en los ensayos de falla aplicables a muestras bituminosas luego de haber sido ensayadas en un equipo de meteorización   |

<sup>9</sup>Standard Practice for Accelerated Weathering Test Conditions and Procedures for Bituminous Materials (Fluorescent UV, Water Spray, and Condensation Method) (ASTM, 2017b).

<sup>10</sup>Standard Practice for Preparation of Test Panels for Accelerated and Outdoor Weathering of Bituminous Coatings (ASTM, 2019c).

<sup>11</sup>Standard Terminology Relating to Natural and Artificial Weathering Tests of Nonmetallic Materials (ASTM, 2016b).

<sup>12</sup>Standard Test Method for Failure End Point in Accelerated and Outdoor Weathering of Bituminous Materials (ASTM, 2018b).

**Cuadro 2.1 (Continuación).** Normas y guías principales para el diseño y construcción de equipos para envejecimiento acelerado y la evaluación de su desempeño.

| Norma/ Guía             | Nombre   | Descripción   |
|-------------------------|--|---|
| ASTM G141 <sup>13</sup> | Standard Guide for Addressing Variability in Exposure Testing of Nonmetallic Materials                               | Esta guía trata la variabilidad en los ensayos de meteorización naturales y simulados y brinda estrategias para reducir dicha variabilidad  |
| ASTM G147 <sup>14</sup> | Standard Practice for Conditioning and Handling of Nonmetallic Materials for Natural and Artificial Weathering Tests | Esta guía trata la preparación, identificación, embalaje, envío, manipulación y acondicionamiento de muestras antes, durante y después de los ensayos de meteorización natural y artificial |
| ASTM G154 <sup>15</sup> | Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials    | Esta guía brinda los principios básicos de operabilidad de lámparas UV fluorescentes y de sistemas de aspersión.  |
| ASTM G151 <sup>16</sup> | Standard Practice for Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources   | Esta guía abarca los procedimientos generales al exponer materiales no metálicos en dispositivos de envejecimiento acelerados que utilizan fuentes de luz para simular efectos de radiación |

#### 2.1.4. Análisis del Modo de Fallos y Efectos en Diseños (*DFMEA*)

Un *DFMEA* consiste en una herramienta para analizar los modos de fallo de un diseño y sus consecuencias, mediante la clasificación por índices de gravedad para la información de riesgo,

<sup>13</sup>Standard Guide for Addressing Variability in Exposure Testing of Nonmetallic Materials (ASTM, 2013).

<sup>14</sup>Standard Practice for Conditioning and Handling of Nonmetallic Materials for Natural and Artificial Weathering Tests (ASTM, 2017a).

<sup>15</sup>Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials (ASTM, 2016a).

<sup>16</sup>Standard Practice for Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources (ASTM, 2019b).

lo cual permite establecer los puntos críticos en materia de seguridad para un diseño determinado (Behera & Behera, 2016).

El rango de valores de los índices en un *DFMEA* va del 1 al 10, donde 10 es el valor más alto para un evento. Seguidamente, los índices se aplican para la severidad, la frecuencia y la capacidad de detección; además, en un *DFMEA* un evento se describe mediante las categorías de: modo de falla, causa de la falla y efecto de la falla (Behera & Behera, 2016).

En la Figura 2.6, se observa el ejemplo de un *DFMEA* aplicado a un prototipo de vehículo impulsado por esfuerzo humano, así mismo, se detallan los modos, las causa y los efectos los cuales se pueden discernir a través de herramientas de calidad, como las lluvias de ideas, diagramas de Ishikawa, entre otros.

| SI No. | COMPONENT            | FAILURE MODE   | FAILURE CAUSE   | FAILURE EFFECT   | S* | O* | D* | RPN* | PREVENTIVE ACTIONS   |
|--------|----------------------|--|---|--|----|----|----|------|--|
| 1.     | Frame                | Torsion, Bending, Rolling, Cracks, Broken welds, Structural forces | Axial stress, Impact loading, Fatigue stress, Fabrication Defects | Bending and weakening of frame, Damage to Roll over protection system, All mounting parts gets weakened, Rider's safety is compromised | 10 | 5  | 8  | 400  | Selection of correct material having high yield stress, Considering high factor of safety in design stage, Careful testing and analysis, efficient welding |
| 2.     | Bottom Bracket       | Axial loads, Bending, Torsion                                      | Excessive bearing and bending stress                              | Break in connection of crank with the vehicle, Transmission breakdown  | 8  | 3  | 3  | 72   | Choosing of a material with high factor of safety  |
| 3.     | Handlebar            | Bending failure, Structural failure                                | Excess of impact loading  | Vehicle Imbalance, Rider's Safety is compromised   | 10 | 5  | 5  | 250  | Choose materials with high FOS; Highly efficient design  |
| 4.     | Cassette & Crank set | Torsion failure, Fatigue failure, Mechanical failure               | Excessive wear and tear, accidents                                | Gear shifting failure, Performance compromised   | 7  | 3  | 7  | 147  | Proper lubrication, Periodical checkups and replacements, use of standard cassette   |
| 5.     | Storage Space        | Impact Failure, Bearing failure                                    | Overloading, Shock loads, Frame faults                            | Storage space gets damaged   | 4  | 6  | 1  | 24   | The supporting frame should a material of high factor of safety, Loading beyond a permissible range should be prevented                                    |
| 6.     | Steering Column      | Bending failure, Torsion failure, Buckling                         | Rough terrain travel, Overloading                                 | Steering Mechanism fails, Rider's safety is compromised  | 9  | 4  | 4  | 144  | Extensive structural testing, proper material selection and design   |

**Figura 2.6.** Ejemplo de un *DFMEA* aplicado al diseño de un vehículo impulsado por esfuerzo humano.

Fuente: (Behera & Behera, 2016).



### 2.1.5. Señalamiento de seguridad

En paralelo a la herramienta del DFMEA como medio para el aseguramiento de la calidad, el diseño y construcción de un equipo debe incorporar toda la notación de seguridad pertinente para reducir la incidencia de eventos derivados de la manipulación del equipo en cuestión.

Para efectos del territorio costarricense, uno de los sistemas de rotulación de seguridad es la *Señalización en el Trabajo* del Instituto Nacional de Seguros (INS), el cual se observa en la Figura 2.7 (INS, 2012).



Figura 2.7. Señalización de seguridad en los sitios de trabajo propuesta por el INS. Fuente: (INS, 2012).

En el diseño y construcción de equipos las señales más comunes son las de prohibición, precaución y advertencia, y obligación. En el *Manual de Señalización Institucional*, de la Caja Costarricense del Seguro Social (CCSS, 2005), se profundiza sobre cada señal.

### **2.1.5. Conceptos metrológicos en equipos**

Posterior a los enfoques normativos, de seguridad y mandatorios, parte fundamental del diseño y construcción de equipos es la estabilidad de los parámetros de ensayo a lo largo del tiempo y la fiabilidad de las mediciones.

Por ello, como enfoque técnico, para la operación de un equipo es importante que presente propiedades de homogeneidad y estabilidad para las variables manipulables en el volumen de control de trabajo, ya que ello permite satisfacer condiciones específicas en la ejecución de ensayos (LanammeUCR, 2020).

Seguidamente, se exponen una serie de conceptos metrológicos orientados a la operabilidad de equipos, con enfoque al control térmico, ya que es el lazo más instrumentado en la construcción del EEMA, el cual, como se observa en la Figura 1.13 y como se mencionó en la sección 1.2.2.c, consistía inicialmente, en un horno convectivo; sin embargo, los conceptos por tratar son extensibles a las variables de radiación y precipitaciones con una adecuada instrumentación. Los detalles gráficos de los conceptos metrológicos definidos a continuación se observan en la Figura 2.8.

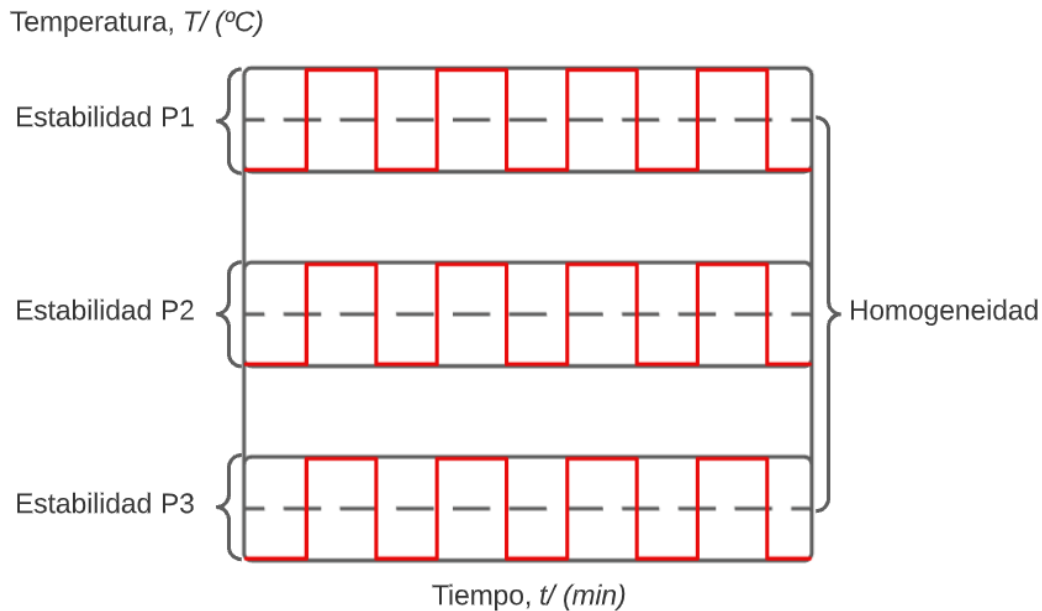
#### **a. Comprobación**

La comprobación es un método que consiste en la determinación de las características de los medios isotérmicos como la homogeneidad y la estabilidad de la temperatura en un volumen de trabajo determinado ( LanammeUCR, 2020).

Durante una comprobación, cuando se alcanza el estado estable de la variable en estudio (ejemplo, la temperatura), se determinan los valores corregidos contra un patrón de medición, como un termopar calibrado; además, se determina la fluctuación de la variable en estudio respecto a un valor objetivo (*set point*) y el gradiente (homogeneidad) de dicha variable en el volumen de trabajo (LanammeUCR, 2020).

### b. Homogeneidad

Es la diferencia máxima en el valor medido promedio entre los entre todos los puntos en un volumen de trabajo, una vez estabilizada la temperatura (LanammeUCR, 2020).



**Figura 2.8.** Conceptos metrológicos de estabilidad, homogeneidad, fluctuación y tiempo de estabilización aplicados en tres puntos dentro de un volumen de trabajo para la comprobación térmica de un horno.

### c. Estabilidad

Es el mayor rango en el cual fluctúan los valores de un parámetro de control, para cada punto de inspección en el volumen de trabajo. Este concepto puede generalizarse a todo el volumen de trabajo, con lo cual el rango puede estar formado por datos de puntos de inspección distintos (LanammeUCR, 2020).

### d. Fluctuación

La fluctuación es la curva de comportamiento contra el tiempo de un parámetro en estado estable. Los valores máximos y mínimo de la curva fluctuante permiten determinar la estabilidad de la medición (LanammeUCR, 2020).

### e. Tiempo de estabilización

Es el tiempo que un equipo requiere para alcanzar un valor de estudio sobre el cual determinar homogeneidad, fluctuación y estabilidad (LanammeUCR, 2020).

### **2.1.6. Conceptos fundamentales de la programación del PLC**

Un controlador lógico programable (PLC, por sus siglas en inglés), según la norma NEMA ICS 61131-1-2005 (R2013, 2021) consiste en un componente electrónico que utiliza una memoria programable para guardar instrucciones sobre la implementación de funciones, como operaciones lógicas, secuencia de acciones, especificaciones temporales, contadores, cálculos de control mediante módulos E/S (Entrada/Salida) analógicos o digitales, sobre diferentes tipos de máquinas y de procesos (NEMA, 2021).

La mayoría de los programas para configurar PLC presentan tres esquemas básicos de programación a saber: esquema de contactos, diagrama de funciones y funciones personalizadas. Cabe destacar que los esquemas descritos anteriormente se fundamentan en el álgebra booleana, por lo que las señales activas suelen denotarse con “1” y las inactivas con “0”. Las definiciones de estas modalidades se detallan a continuación y se tomaron de la *Ayuda en pantalla* del Software *LOGO! Soft Comfort V8.3.0* (2020).

#### **a. Esquema de contactos (KOP)**

Esta modalidad de programación de PLC se conoce también como lenguaje *Ladder*, la particularidad de este lenguaje radica en que la distribución de la lógica programación es similar a la lógica del cableado.

#### **b. Diagrama de funciones (FUP)**

La modalidad FUP de programación de PLC consiste en la construcción de la lógica del lazo de control a través de bloques lógicos, entradas, salidas, bloques con funciones y bajo los principios del álgebra booleana. Presenta gran similitud a un diagrama de flujo con condicionales.

#### **c. Función personalizada (UDF)**

La modalidad UDF puede considerarse como un complemento de la modalidad FUP, ya que consiste en la creación de una función lógica cuyo algoritmo es el condensado de un diagrama FUP sin entradas y salidas, de modo que puede considerarse la modalidad UDF como un resumen de la FUP con la diferencia que la UDF permite configuraciones distintas en las

entradas y salidas de la función condensada, así como incorporar la función condensada como un paso de un código de mayor tamaño.

## 2.2. METODOLOGÍA

Para la fase de construcción del EEMA se llevaron a cabo procesos financieros, técnicos y de comprobación térmica del prototipo construido. Para cada uno de los procesos mencionados con antelación, se detalla seguidamente, la metodología de aplicación.

### 2.2.1. Proceso financiero

Para el financiamiento requerido para la construcción del EEMA se realizó una lista de materiales con base en el Cuadro 1.12, el cableado descrito en la sección 1.3.7.a, la bomba escogida en la sección 1.3.5.a y los bombillos UV escogidos en la sección 1.3.4.c. La lista de materiales se detalla en el Cuadro 2.2.

Cabe destacar que la lista de materiales expuesta en el Cuadro 2.2, es resultado de un ajuste a una lista preliminar, la cual fue expuesta ante personal técnico-industrial del LanammeUCR a fin de establecer los componentes adecuados para la construcción del EEMA.

**Cuadro 2.2.** Lista de materiales, proveedores posibles y cantidades aproximadas requeridas para la construcción del EEMA.

| Material   | Cantidad    | Proveedores                                  |
|--|-------------|--|
| Bomba periférica<br>Toolcraft TC26666 ½ HP                           | 1 unidad    | EPA, Las Gravilias, Construplaza             |
| Bombillos UV OSRAM<br>HNS 15 W G13                                   | 10 unidades | BTG (Bulbtronics Group), Amazon,<br>Osram    |
| Tanque de agua de 55 gal   | 1 unidad    | Construplaza, EPA                            |
| Manómetro de Glicerina<br>de (0 – 100) psi, Macho                    | 1 unidad    | Tubocobre S.A., EPA, Construplaza            |
| Válvula reguladora de<br>presión de ½” y de (15 –<br>75) psi, hembra | 1 unidad    | Tubocobre S.A., EPA, Construplaza            |
| Válvula de bola 1”   | 1 unidad    | Tubocobre S.A., EPA, Construplaza            |
| Válvula de compuerta 1”  | 1 unidades  | Tubocobre S.A., EPA                          |
| Aspersores de bombas<br>atomizadoras de ¼” NPT                       | 4 unidades  | Agroindustrias Mora S.A.,<br>Naandanjain CR. |
| Tubo PVC 1” Sch. 40  | 3 m         | EPA, Construplaza                            |
| Tubo PVC ½” Sch. 40  | 6 m         | EPA, Construplaza                            |

**Cuadro 2.2 (Continuación).** Lista de materiales, proveedores posibles y cantidades aproximadas requeridas para la construcción del EEMA.

| <b>Material</b>  | <b>Cantidad</b> | <b>Proveedores</b>                 |
|--|-----------------|------------------------------------|
| Tubo Cobre 3/8"  | 3 m             | Enfogue, Central de Mangueras S.A. |
| Uniones tubo-tubería en bronce 1/4" NPT con sello mecánico       | 12 unidades     | Enfogue, Central de Mangueras S.A. |
| Teflón de 1"   | 1 unidad        | Cualquier ferretería               |
| Teflón de 1/2"   | 1 unidad        | Cualquier ferretería               |
| Codo HG Sch. 40 1/2"   | 3 unidades      | Cualquier ferretería               |
| Codo HG Sch. 40 1"   | 3 unidades      | Cualquier ferretería               |
| Reducción tipo campana HG 1" x 1/2" Sch. 40                      | 1 unidad        | Cualquier ferretería               |
| Reducción tipo campana bronce 1/2" x 1/4" NPT                    | 1 unidad        | Enfogue, Central de Mangueras S.A. |
| Tees hembra bronce 1/4" NPT                                      | 4 unidades      | Enfogue, Central de Mangueras S.A. |
| Tee macho unión tubo-tubería con sello mecánico, bronce 1/4" NPT | 1 unidad        | Enfogue, Central de Mangueras S.A. |
| Tee HG hembra Sch. 40 1"   | 1 unidad        | Cualquier ferretería               |
| Tee HG hembra Sch. 40 1/2"                                       | 1 unidad        | Cualquier ferretería               |
| Gaza doble 3/4"  | 5 unidades      | Cualquier ferretería               |
| Uniones hembra (tubo) – macho (tubería) PVC Sch. 40 1"           | 19 unidades     | Cualquier ferretería               |
| Uniones hembra (tubo) – macho (tubería) PVC Sch. 40 1"           | 8 unidades      | Cualquier ferretería               |
| Cable de fibra de vidrio 12 AWG 600V 250 °C                      | 12 m            | Electro MAZ LTDA, Ditesa S.A.      |
| Balastro electrónico 1x17 W                                      | 3 unidades      | EPA, Construplaza                  |
| Base para fluorescentes  | 6 unidades      | Cualquier ferretería               |
| Portamuestras aluminio   | 6 unidades      | Alumindustria LTDA                 |
| Pintura anticorrosiva  | 1/4 de galón    | Cualquier ferretería               |

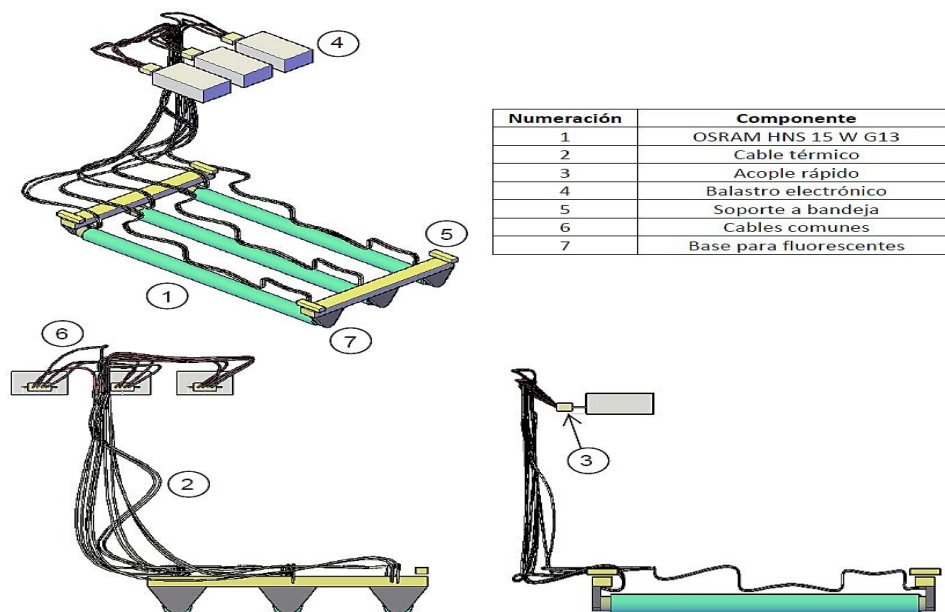
Con base en la lista del Cuadro 2.2, se procedieron a realizar cotizaciones tanto de forma virtual como presencial, con el fin de obtener los mejores precios sin que ello perjudicara la funcionalidad del diseño final del EEMA propuesto en el Capítulo 1.

### 2.2.2. Proceso técnico

Para el proceso técnico de construcción, se solicitó capacitación al personal técnico-industrial de mantenimiento del LanammeUCR en el uso de las herramientas adecuadas para la manipulación de los materiales expuestos en el Cuadro 2.2 y la construcción del equipo fue por mano de obra propia excepto en los componentes de riesgo eléctrico, cuya manipulación fue mixta.

Cabe destacar que el proceso técnico de construcción se dividió en tres subprocesos a saber: primero, la construcción del sistema de aspersion; segundo, el sistema de radiación y, tercero, el sistema de activación.

El detalle constructivo del sistema de aspersion se observa en la Figura 1.24. Por otro lado, el diseño del sistema de radiación se observa en la Figura 2.9. A su vez, el sistema de activación se determinó como la instalación de un par de interruptores para accionar la bomba y los bombillos.



**Figura 2.9.** Sistema de radiación diseñado para el prototipo EEMA.



Seguidamente, en el Cuadro 2.3 se detalla la lista de herramientas y aditivos empleados en la construcción del EEMA, así como una breve descripción del uso.

**Cuadro 2.3.** Herramientas, aditivos y componentes adicionales empleados en la construcción del EEMA según la asesoría del personal técnico-industrial del LanammeUCR.

| Herramienta   | Uso   |
|---|---|
| Dobladora de tubos de 3/8", 1/2" y 1/4"   | Para crear curvas en el tubo de cobre sin afectar el diámetro   |
| Cortadora de tubos de 1" Máximo   | Permite cortes perpendiculares en tubos   |
| Torno eléctrico   | Permite cortes precisos en varias geometrías, se empleó en los portamuestras del EEMA                                 |
| Taladro percutor de broca ajustable (brocas perforadoras, tipo sierra y tipo desatornillador) | Para ajustar gazas en el sistema de aspersión, crear el sistema de drenaje y la línea de succión en el tanque de agua |
| Esmeriladora con discos de corte de 3" o menos  | Para cortar la lámina de zinc liso para las persianas protectoras de humedad  |
| Duretán gris y pistola aplicadora   | Como aislante del espacio inundado  |
| Tornillos punta broca   | Para colocar las gazas del sistema de aspersión   |
| Láminas de zinc liso calibre 26   | Material para crear persianas protectoras de humedad  |
| Prensa de mesa tipo sargento  | Para manipular accesorios NPT   |
| Pistola de aire comprimido  | Permite limpiar de polvo las superficies en trabajo   |
| Motor tool con discos de corte de 1/2" y 1/4"   | Cortes precisos en las persianas protectoras  |
| Esmeril de mesa   | Elimina los filos en los cortes metálicos   |
| Cemento PVC de secado en húmedo   | Une tubo PVC con adaptador rosca PVC  |
| Lija 180 y 120  | Facilita la adherencia del cemento PVC  |
| Cinta aislante  | Protege los tramos de cables unidos   |
| Cable de cobre con recubrimiento polimérico en calibres 12, 6 y 8 AWG                         | Alimenta los componentes del equipo externos a la zona de alta temperatura  |
| Conectores tipo <i>turnlock</i>   | Permite la alimentación trifásica del horno   |
| Cautín para soldaduras electrónicas   | Fija las conexiones con los balastos  |
| Peladora de cables para varios calibres AWG   | Permite unir mecánicamente el núcleo metálico de los cables   |
| Kit de llaves para tuercas  | Permite ajustar los sellos mecánicos de la tubería NPT  |

Algunos aspectos que caben destacar durante la construcción del EEMA es el tratamiento a los portamuestras, debido a que la profundidad de estos excedía la requerida para el vertido de las muestras asfálticas y, por otro lado, se detectó la necesidad de construir dos mecanismos de protección, uno para los orificios de ventilación dentro de la cámara del horno y otro, en la línea de succión de la bomba. Estos aspectos se detallan en la sección 2.3.

### **2.2.3. Comprobación térmica**

Debido a que el horno convectivo base para la elaboración del EEMA pertenece al LanammeUCR y teniendo en cuenta que el instructivo IT-AG-20 *Método para la Comprobación de Equipo de Acondicionamiento Térmico*, se menciona que:

*“Se realizará una comprobación en los siguientes casos:*

- *El equipo se encuentra fuera de servicio y se encuentra almacenado en una bodega por un periodo prolongado de tiempo.*
- *El equipo recibió mantenimiento y fueron reemplazados algunos de sus componentes...”* (LanammeUCR, 2020).

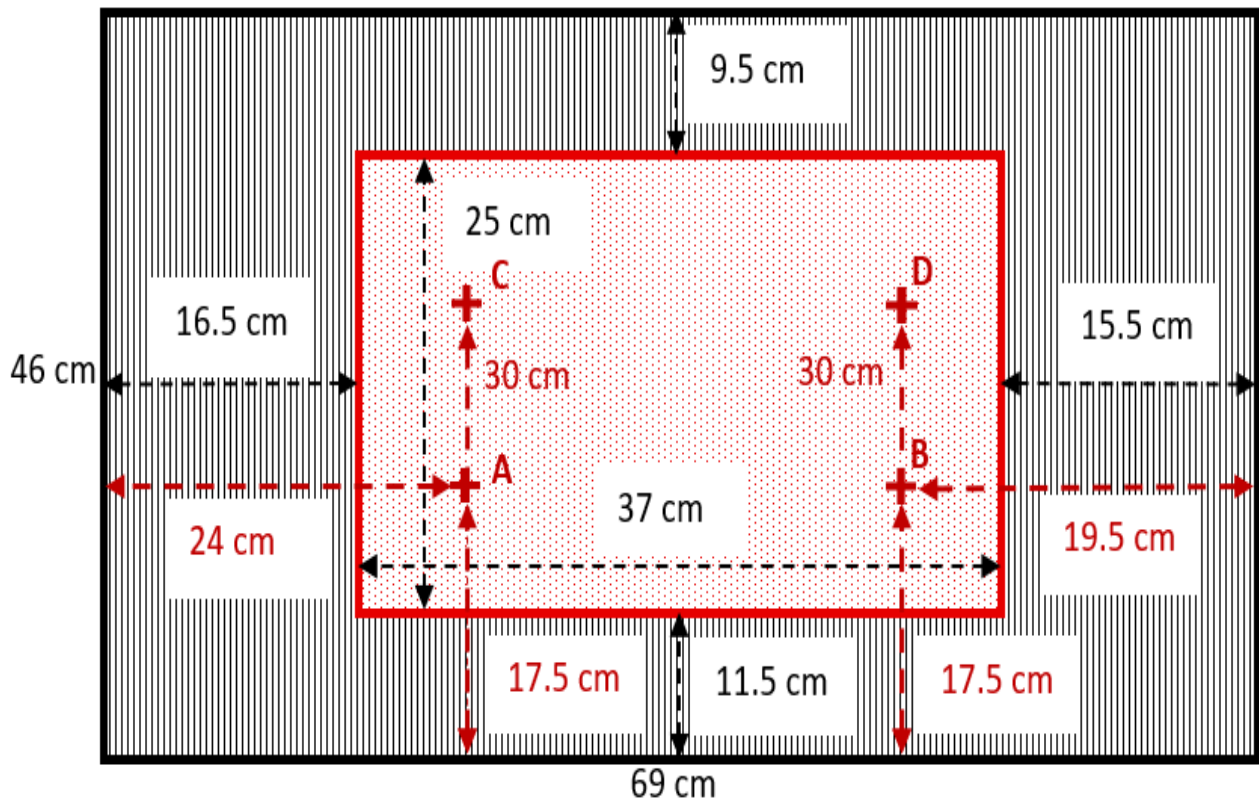
Se determinó que el EEMA requiere comprobación térmica. Respecto a los parámetros de aspersión y radiación, el LanammeUCR no cuenta con instructivos vinculantes y, por lo tanto, con equipo adecuado de comprobación. Además, el EEMA en dichos parámetros se encuentra en una fase más exploratoria.

Según el IT-AG-20 (LanammeUCR, 2020), para efectuar una comprobación térmica en el EEMA se requiere de los siguientes aspectos:

- Medición de las dimensiones internas del horno.
- Delimitar el volumen de trabajo, el cual debe estar a 3 cm de distancia de las paredes internas, como mínimo.
- Fijar las coordenadas de los puntos de comprobación de modo que se registre el posible gradiente de temperatura en el volumen de trabajo.
- Fijar los sensores en los puntos de comprobación determinados anteriormente.
- Esperar a que el equipo se estabilice en la temperatura de trabajo.
- Registrar siete lecturas en cada punto de comprobación como mínimo, durante el tiempo requerido por el ensayo de mayor duración.

- Definir y registrar los intervalos de tiempo en que se tomarán las mediciones de temperatura.

Con base en los requisitos anteriores, se realizó el diagrama de la Figura 2.10, el cual muestra la vista superior del volumen de control, el cual se determinó a una altura de 18 cm sobre la base de la cámara del EEMA y con un espesor de 4 cm. El volumen delimitado encierra el espacio que ocupan los portamuestras.



**Figura 2.10.** Vista superior del volumen de trabajo del EEMA, con sus respectivos puntos de comprobación destacados.

Como se observa en la Figura 2.10, los puntos A, B, C y D corresponden a los puntos de comprobación y la zona roja con un espesor de 4 cm, representa el volumen de trabajo. Los dispositivos empleados para la medición de la temperatura fueron dos termopares (Figura 2.11) con capacidad de almacenamiento y descarga de datos. Se programó la toma de datos en intervalos de cinco minutos y durante 375 minutos.

El ciclo seleccionado para la comprobación térmica fue el ciclo B del Cuadro 1.17 (para el Valle Central), debido a que el EEMA no cuenta con sistema de enfriamiento y la única temperatura mínima obtenible es la del ambiente.



**Figura 2.11.** Termopares empleados en la comprobación térmica del EEMA.

Cabe destacar que no solo se planteó la medición de la temperatura de trabajo, sino que también se incluyó la medición en la etapa de precalentamiento a fin de establecer cuánto le toma al EEMA estabilizarse en la temperatura de trabajo para encender el sistema de radiación.

Una vez finalizado el planteamiento para la construcción del EEMA expuesto con antelación, en el punto siguiente se detallan aspectos metodológicos para la programación del PLC LOGO! 230 RCE.

#### **2.2.4. Programación del PLC LOGO! 230 RCE**

Para la programación del PLC se empleó el software *LOGO! Soft Comfort V8.3.0* de Siemens y se planteó como base lo expuesto en la sección 1.3.7.b. Adicionalmente, se cursó como capacitación el curso virtual: *Programación del Mini Logo Siemens 230 RC* de Ospino (2020).

Como modalidad de programación, se empleó el diagrama de funciones (FUP), el cual facilita la observación del comportamiento del lazo de control durante la simulación en *LOGO! Soft Comfort*. Los detalles de programación y la lógica del algoritmo obtenido se exponen en la sección 2.3. A modo de verificar la efectividad del algoritmo se ejecutó una simulación de programa.

#### **2.2.5. DFMEA del EEMA**

Por otro lado, con el diseño del EEMA y un plan constructivo más sólido, se realizó el DFMEA como documentación adicional al prototipo a fin de mapear los riesgos en el diseño, probar aspectos de seguridad preliminares a la ejecución de ensayos y obtener medidas de contingencia en caso de eventos y acciones de prevención para evitarlos.

Para ello, se empleó la metodología desarrollada por Behera & Behera (2016) para la elaboración de un DFMEA, con el fin de obtener las prioridades de riesgo (PR) en los componentes añadidos al horno convectivo.

Previo a la obtención de las prioridades de riesgo, se elaboraron las escalas para los parámetros de severidad (S, Cuadro 2.4), ocurrencia (O, Cuadro 2.5) y detección (D, Cuadro 2.6), con el fin de clasificar cada riesgo por componente. Se toma 10 como el riesgo máximo.

Cabe destacar que, para la elaboración de cada escala, se implementaron los criterios interdisciplinarios del personal del LanammeUCR a saber: de los técnicos eléctrico y de mantenimiento industrial, del regente químico, del ingeniero electromecánico, además de los criterios del Comité Asesor y el ingeniero diseñador (graduando).

Los componentes que se sometieron al DFMEA, específicamente, fueron los bombillos UV, el armario eléctrico del horno, la resistencia térmica, las bases de los bombillos, el ventilador, las tuberías en PVC, bronce y cobre, los accesorios de tuberías, los aspersores, las uniones internas, la bomba, el manómetro, los acoples rápidos, las compuertas, el tanque de agua y los balastros electrónicos.

**Cuadro 2.4.** Escala de severidad para la evaluación de los componentes del EEMA.

| <b>Clasificación de severidad</b> | <b>S</b> | <b>Descripción</b>   |
|-----------------------------------|----------|--|
| Peligro máximo sin advertencia    | 10       | Fallas durante la operación sin señal previa y con efectos mortales  |
| Muy alto peligro con advertencia  | 9        | Fallas durante la operación con señales previas y con efectos mortales                                       |
| Muy alto peligro                  | 8        | Fallas durante la operación sin señales previsibles con lesiones presentes                                   |
| Alto peligro                      | 7        | Fallas durante la operación con señales previsibles con lesiones presentes                                   |
| Peligro moderado                  | 6        | Efectos mapeados sobre el usuario que no comprometen la vida   |
| Bajo peligro                      | 5        | Componente en operación con desperfectos y que no compromete la vida del usuario. Requiere reparación        |
| Muy bajo peligro                  | 4        | Existen efectos acumulativos previsibles que no comprometen la vida del usuario. Puede requerir reparaciones |
| Menor peligro                     | 3        | Operabilidad normal del componente con ajustes requeridos  |
| Mínimo peligro                    | 2        | Componente inoperable o deficiente   |
| Sin peligro                       | 1        | Desempeño normal del componente  |

**Cuadro 2.5.** Escala de ocurrencia para la evaluación de los componentes del EEMA.

| <b>Clasificación de ocurrencia</b> | <b>O</b> | <b>Descripción</b>                                       |
|------------------------------------|----------|--|
| Máxima ocurrencia                  | 10       | El componente siempre presenta el evento                 |
| Muy alta ocurrencia                | 9        | Evento muy altamente probable durante manipulación       |
| Alta ocurrencia                    | 8        | Evento altamente probable durante manipulación           |
| Recurrente ocurrencia              | 7        | Evento probable aun con buenas prácticas                 |
| Común ocurrencia                   | 6        | Evento de común ocurrencia sin condiciones especiales    |
| Ocasional ocurrencia               | 5        | Evento que, bajo condiciones específicas, sucede         |
| Baja ocurrencia                    | 4        | Eventos en descuidos prolongados (12-24 horas)           |
| Muy baja ocurrencia                | 3        | Eventos en descuidos extensos (más de 24 horas)          |
| Remota ocurrencia                  | 2        | Eventos bajo descuidos extensos y condiciones especiales |
| Mínima ocurrencia                  | 1        | Componente transcurre sin fallas                         |

**Cuadro 2.6.** Escala de detección para la evaluación de los componentes del EEMA.

| <b>Clasificación de detección</b> | <b>D</b> | <b>Descripción</b>   |
|-----------------------------------|----------|--|
| Imposible de detectar             | 10       | La falla es imperceptible  |
| Muy improbable de detectar        | 9        | Se requiere de inspección muy rigurosa para detectar con desarme de componentes y uso de instrumentación   |
| Improbable de detectar            | 8        | Se requiere de inspección rigurosa empleando instrumentos para detectar falla, pero sin desarmar el equipo |
| Baja detección                    | 7        | Se requiere de inspección mediante instrumentación   |
| Muy baja detección                | 6        | La falla es audible  |
| Moderadamente detectable          | 5        | Se requiere inspección visual detallada y ajustes de prueba y error  |
| Alta detección                    | 4        | Se requiere inspección visual detallada  |
| Muy alta detección                | 3        | Se requiere inspección visual  |
| Máxima detección                  | 2        | La falla es perceptible a simple vista   |
| Certeza de presencia              | 1        | Se tiene certeza de un desperfecto de diseño que no compromete la operabilidad                             |

### 2.2.6. Ajustes en parámetros de ensayo

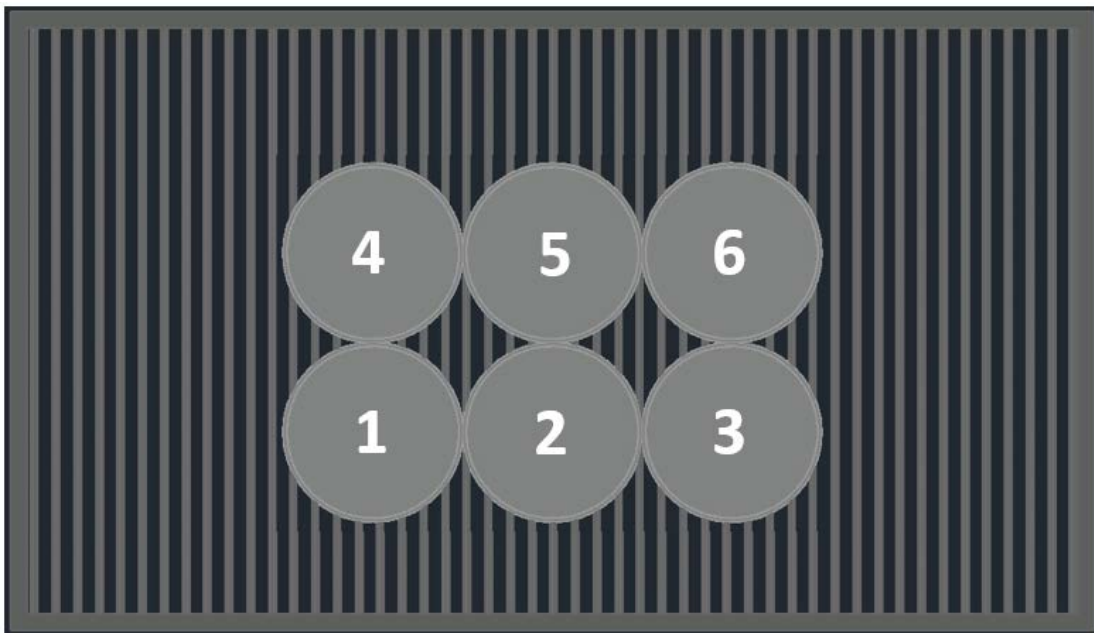
Con la puesta en marcha del EEMA y al evaluarse su funcionamiento real, se planteó el ajuste de los parámetros de ensayo del EEMA, tales como la radiación y la aspersion.

Primeramente, el tiempo de radiación se ajustó mediante una calculadora del nivel de irradiancia que facilitó el proveedor OSRAM GmbH por modelo de bombillo a un determinado radio de irradiancia, por lo que se aplicó un ajuste geométrico.

Por otro lado, para el sistema de aspersion se ajustaron los aspersores como totalmente cerrados y posteriormente, se abrieron hasta cinco vueltas. Además se colocaron con un ángulo de 15° hacia el área de la Figura 2.12 que abarcan los portamuestras.

Seguidamente, se colocaron los portamuestras como indica la Figura 2.12, se cuantificó con cronómetro el tiempo de llenado para cada uno y se midió el área de la superficie expuesta y el volumen del portamuestras.

Posterior a ello, se promediaron los tiempos de llenado y con dicho tiempo se procedió con los cálculos conforme a la metodología expuesta en la sección 1.2.3. Con base en lo expuesto, se replantearon los Cuadros 1.14 y 1.18 en la sección de Análisis de Resultados del presente capítulo.



**Figura 2.12.** Distribución de los portamuestras en el volumen de trabajo para el ajuste del sistema de aspersión a capacidad real.

### **2.2.7. Manual de equipo EEMA**

Toda la información con detalles constructivos y operacionales se resumió en la elaboración de un manual de equipo, el cual se adjuntó en el Anexo Y.





## **2.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Con base en la metodología propuesta en la sección 2.2 para la construcción del EEMA, se analizaron los hallazgos y resultados obtenidos de previo, durante y al final del ensamblaje del EEMA en las siguientes subsecciones.

### **2.3.1. Costos finales para la elaboración del EEMA**

Con base en la lista de materiales del Cuadro 2.2 y las respectivas cotizaciones, se obtuvieron los costos finales para la construcción del EEMA, los cuales se reflejan en el Cuadro C.1 del Apéndice C. Cabe destacar que en algunos materiales se detalla un impuesto de valor agregado (IVA) del 2 % ya que fueron adquiridos a través del fondo de caja chica del LanammeUCR para proyectos finales de graduación.

Por otro lado, el restante grupo de materiales cuenta con un IVA del 13 % ya que fueron adquiridos por cuenta propia. Además, no se consideraron costos por concepto de mano de obra debido a que la mayoría del ensamblaje fue por cuenta propia y el trabajo asistencial del personal técnico-industrial del LanammeUCR (en conexiones eléctricas) fue donado.

Como se aprecia en el presupuesto para construcción del EEMA en la Figura 2.13, el monto total en materiales fue de 316,560.95 CRC, lo cual resultó más económico que el costo solo de los bombillos especializados UV-313 de Q-Lab, cuya orden mínima de 12 bombillos tiene un costo de 1,200 USD, que al tipo de cambio colón-dólar reportado por el Banco Central de Costa Rica (BCCR) el día 22 de abril del año 2022 (664.58 CRC la venta), dicho monto ronda los 797,496.00 CRC.

Adicionalmente, de complementarse el monto de los bombillos de Q-Lab con los costos del sistema de aspersion, el costo total, sin mano de obra, para la construcción del EEMA aproximaría un millón de colones, sin contemplar la instrumentación y automatización de los lazos de control de precipitaciones y radiación.

Dado que el diseño del EEMA responde más a la definición de un prototipo y en consideración que aún los equipos comerciales se encuentran en constante soporte y cambio de diseño

ingenieril, se determinó como suficiente el costo total expuesto en el Cuadro C.1, ya que permite la construcción de un equipo funcional y seguro, con la debida capacitación en su operación y mantenimiento.

En conclusión, se destaca que con el presupuesto invertido, la operabilidad del EEMA se estableció como manual, ya que si bien se cuenta con un PLC Siemens LOGO! 230 RCE del LanammeUCR, el cableado adicional y la falta de presupuesto para bombillos tolerantes a la humedad directa, así como la falta de instrumentación para la radiación y la aspersion, impidieron una completa automatización del EEMA.

### **2.3.2. Proceso técnico-constructivo del EEMA**

Para el análisis del proceso constructivo del EEMA, se abordó bajo cuatro etapas de ensamblaje, a saber: construcción del sistema de aspersion, ensamblaje e instalación del sistema de radiación, incorporación del sistema de alimentación complementaria y ensambles de protección eléctrica.

#### **a. Construcción del sistema de aspersion**

La ejecución del diseño del sistema de aspersion requirió el uso de la mayor parte de herramientas del Cuadro 2.3 y la mayoría de los materiales del Cuadro 2.2; por lo tanto, su construcción fue la más compleja en detalles de diseño y se realizó por cuenta propia.

Primeramente se trató el tanque de almacenamiento de agua, el cual consistió en un barril de hierro reciclado que inicialmente se encontraba cubierto de óxido en diversas secciones, por lo que se procedió, en primer lugar, con la perforación de la línea de succión, seguido de operaciones alternadas de lijado y limpieza, y se finalizó con la aplicación del anticorrosivo blanco para facilitar la identificación de contaminantes en el agua durante la ejecución de ensayos. El detalle del proceso se muestra en la Figura 2.13.

Seguidamente, se midieron y enumeraron los tramos de tubo en PVC según las medidas del plano que se muestra en la Figura X.6 en los Anexos. Posteriormente, se cortaron empleando la cortadora de tubos, se lijaron los extremos de cada tramo de tubo y las paredes internas de las uniones tubo-tubería (conocidos también como adaptadores machos) PVC para facilitar la

aplicación del cemento PVC y la adherencia entre ambos componentes y con ello conferir a cada tramo la capacidad de roscarse a las válvulas, la bomba y otros accesorios del sistema de aspersión.



**Figura 2. 13.** Proceso de restauración del tanque de agua para el sistema de aspersión del EEMA.

Cabe destacar que se escogieron accesorios de hierro galvanizado (hg) para codos, reducciones y tees hembras, para unir de forma roscada con adaptadores PVC machos, por la facilidad de desinstalación, debido a que la zona de construcción del EEMA es distinta a la zona prevista de operación dentro del LanammeUCR. Además, los mismos accesorios en PVC con unión roscable resultan ser más costosos que los de hierro galvanizado.

Previo al roscado entre los accesorios, la bomba, las válvulas y la tubería, se recubrió con teflón a los componentes machos en sentido opuesto a las manecillas del reloj para que durante el roscado el sello prevenga la filtración de agua. El ancho de teflón se aplicó de acuerdo con el ancho del inserto roscable de los componentes machos.

Entre los aspectos de seguridad al momento de la instalación de la tubería resaltan el uso de guantes durante las operaciones de corte, abrasión y uso de químicos concentrados, como el cemento PVC, y la apertura total de las válvulas previo a la instalación, de modo que de olvidarse verificar las válvulas al encender el bombeo, el agua pueda fluir sin forzar la bomba

y se prevenga el aspirado contra una línea de succión cerrada, además del trasiego contra una línea cerrada.

Una vez finalizados los tramos en PVC (ver Figura 2.14) y con el manómetro instalado a través de una reducción de media pulgada cédula 40 a un cuarto de pulgada NPT en la tee de media pulgada de tal modo que permita la lectura de presión, se procedió con la instalación de la tubería en bronce y cobre (conocida como fitinería).



**Figura 2.14.** Detalle de la sección del sistema de aspersión en PVC y hierro galvanizado.

Esta sección del sistema comienza por una reducción de media pulgada a un cuarto de pulgada en NPT de bronce con sello mecánico. El cambio de materiales hacia el interior del horno radica en que la temperatura máxima de operación son  $64.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo cual no es tolerable por el PVC, además que los aspersores son componentes de acoples a un cuarto de pulgada en NPT.

El sello mecánico es una argolla lisa de bronce dentro de una tuerca hueca que se rosca al macho del componente en NPT de bronce, de modo que permite la unión de tubo con tubería ya que al roscarse la tuerca, la argolla estrangula el tubo y lo fija en un acople firme, lo cual permitió la implementación del tubo de cobre en el sistema de aspersión sin tener que incurrir

en el costo de emplear niples y codos de bronce en NPT, lo cual incrementaría los costos significativamente.

Con base en lo anteriormente expuesto, la sección del sistema de aspersión dentro del horno se construyó empleando la cortadora de tubo, la dobladora de tubo y teflón en los componentes machos. Finalmente, el ramal de aspersores en malla cerrada (para una aspersión a presiones más uniformes) se fijó al techo de la cámara de calor del horno mediante gazas dobles de tres cuartos de pulgada y tornillos punta broca. En la Figura 2.15 se aprecia esta sección del sistema de aspersión.



**Figura 2.15.** Detalle de la sección interna del sistema de aspersión.

Respecto a los materiales empleados en el sistema de aspersión todos comparten la característica de tolerar la corrosión por efecto del agua, además de no añadir contaminación a la misma. Para el caso del tanque de hierro, la pintura anticorrosiva le brinda la protección requerida.

#### **b. Ensamblaje e instalación del sistema de radiación**

Para el sistema de radiación se partió de la premisa de ser fácilmente instalable para los ciclos de calor y radiación conjuntos, y removible con igual facilidad, para los ciclos de aspersión; además, contar con un cableado tolerante a altas temperaturas dentro del horno y poder fijar los bombillos a una estructura estable.

Dadas las especificaciones anteriores, se implementaron conectores de acople rápido entre los bombillos UV y los balastos electrónicos que regulan la alimentación a dichos bombillos; contra las altas temperaturas de servicio se implementó cableado de fibra de vidrio 12 AWG, que además facilita la introducción del cable al contacto de las bases para los bombillos UV, ya que poseen poco espacio para la alimentación.

Como uno de los primeros pasos para la elaboración del sistema de radiación, se introdujeron los bombillos UV en el horno para verificar compatibilidad geométrica, la cual fue positiva. Seguido de ello, se colocaron las bases y los bombillos en un horno a 70 °C, una temperatura mayor a la de operación del EEMA, con el objetivo de verificar la tolerancia a altas temperaturas y el resultado fue positivo. El sistema de radiación se aprecia en la Figura 2.16.



**Figura 2.16.** Detalle del sistema de radiación. A la izquierda las bases de contacto para los bombillos UV; al centro el sistema de acople rápido y, a la derecha, los balastos de regulación.

Seguidamente, el técnico electricista del LanammeUCR realizó las conexiones con los balastos y los acoples rápidos, mediante soldadura de estaño y cautín, además, se unificó la alimentación entre los tres balastos y la red eléctrica mediante un conector tipo *turnlock*.

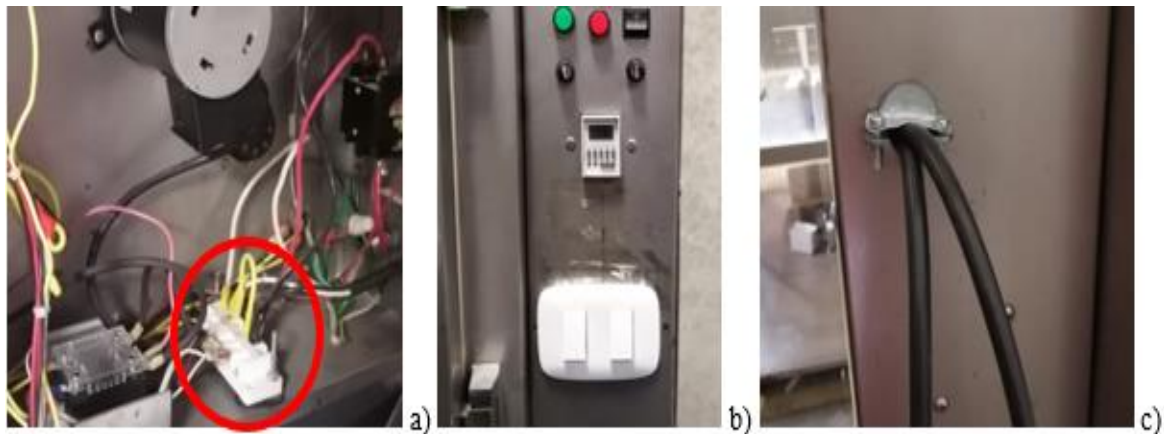
Como detalles finales por destacar, las bases se encuentran fijadas a una bandeja mediante unas reglas de madera, de modo que se permite la colocación de los bombillos UV; los balastos de menor potencia conseguidos fueron de 17 W, sin embargo, los bombillos son de 15 W, como resultado de ello, se estima que los bombillos tendrán una vida útil inferior a la estipulada en la ficha técnica.

### c. Sistema de alimentación complementaria

El sistema de alimentación complementaria consiste en el modo de energizar los bombillos UV del sistema de radiación y la bomba del sistema de aspersión, a través de un medio controlable.

Para ello, el técnico electricista del LanammeUCR añadió a la regleta interna del equipo (ver Figura 2.17.a encerrado en rojo), la conexión a dos interruptores que activan a los bombillos UV y a la bomba, respectivamente (Figura 2.17.b). También, se añadió la salida a dos receptores tipo *turnlock*, los cuales reciben tanto al conector unificado de los bombillos UV, como el conector de la bomba del sistema de aspersión (Figura 2.17.c).

Con base en lo anteriormente expuesto, el horno debe estar encendido y los conectores acoplados para que los bombillos y la bomba sean energizados, pues de no ser así, aunque los bombillos y la bomba estén conectados al horno mediante las extensiones creadas, no se verán energizados. Además, los interruptores se instalaron en el espacio que ocupaba anteriormente el PLC, el cual fue un añadido que no se programó en el pasado.



**Figura 2.17.** Detalle del sistema de alimentación complementaria: a) regleta para la admisión de los interruptores y los receptores de los bombillos y la bomba; b) interruptores de los bombillos y la bomba, instalados; c) Salida de receptores.

### d. Ensamblajes de protección eléctrica

El propósito de estos ensamblajes es la prevención del contacto del agua con los componentes electrónicos del EEMA, para ello, primero se identificaron los posibles puntos de filtración de aguas. También, se abarcó la prevención de incidentes obstructivos en los aspersores.



Como primera zona de filtración se consideraron las uniones internas del horno y el acceso a las puertas, los cuales están bien definidos, seguido de ello, se determinó que la pared que encierra la resistencia y el ventilador es un punto significativo para la filtración y de alto riesgo debido a la cercanía con los circuitos internos del horno y, finalmente, los bordes del tubo de drenaje en la base del horno.

Para las uniones internas y los bordes del tubo de drenaje del horno, se empleó duretán gris como medio aislante e impermeabilizante, el cual se aplicó en seco y se dejó reposar por dos días para un curado de acuerdo con el fabricante. Para el acceso a las puertas, se empleó una lámina de acero inoxidable doblada en forma de “L” y adherida mediante duretán.

Por otro lado, para la ventilación de la pared que encierra al ventilador y la resistencia del horno, se crearon con zinc liso, unas persianas que permiten la circulación del aire caliente y previenen la entrada directa de agua de los aspersores al foco de calor. El detalle de los ensamblajes de protección se observa en la Figura 2.18.



**Figura 2.18.** Detalle de los ensamblajes diseñados para la prevención del contacto del agua con los circuitos internos del EEMA.

Finalmente, para prevenir la obstrucción de los aspersores, se colocó en la línea de succión un filtro donado por el personal técnico-industrial del LanammeUCR, el cual consiste en un tapón de PVC largo, con perforaciones angulares y como medio filtrante, una esponja rígida. El detalle de la protección para los aspersores se observa en la Figura 2.19.



**Figura 2.19.** Detalle de la protección para los aspersores.

### **2.3.3. Análisis a la comprobación térmica del EEMA**

Primeramente, para la determinación de los puntos A, B, C, y D en los cuales se ejecutó la comprobación térmica, se emplearon los portamuestras, los cuales se trataron en la sección en curso debido a su relación para la escogencia de los puntos de comprobación. Los portamuestras se presentan en la Figura 2.20.

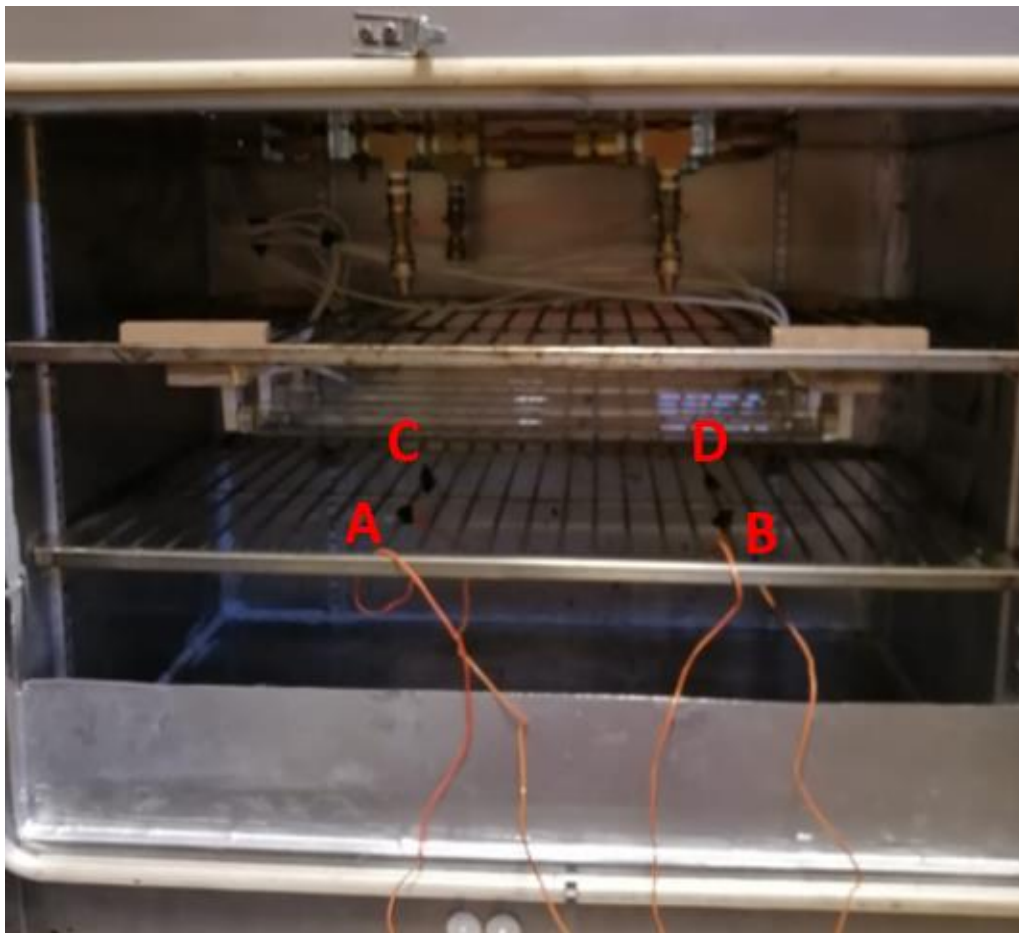


**Figura 2.20.** Portamuestras de aluminio colocados en la configuración de ensayo.

Con base en la configuración de portamuestras que se muestra en la Figura 2.20 más dos portamuestras adicionales, se determinó el volumen de trabajo, el cual corresponde a un prisma

rectangular y tangencial a las paredes externas de los portamuestras (Figura 2.10 con un espesor de 4 cm). Seguidamente, los puntos de comprobación corresponden a los centros de los portamuestras esquineros en el volumen de trabajo.

Por otro lado, los sensores de los termopares se fijaron con cinta aislante sin contacto sobre la zona metálica y se aseguró que los puntos de aplicación se mantuvieran fijos pese a que se cierren las puertas. En la Figura 2.21 se observan colocados los sensores de los termopares en los puntos de comprobación.



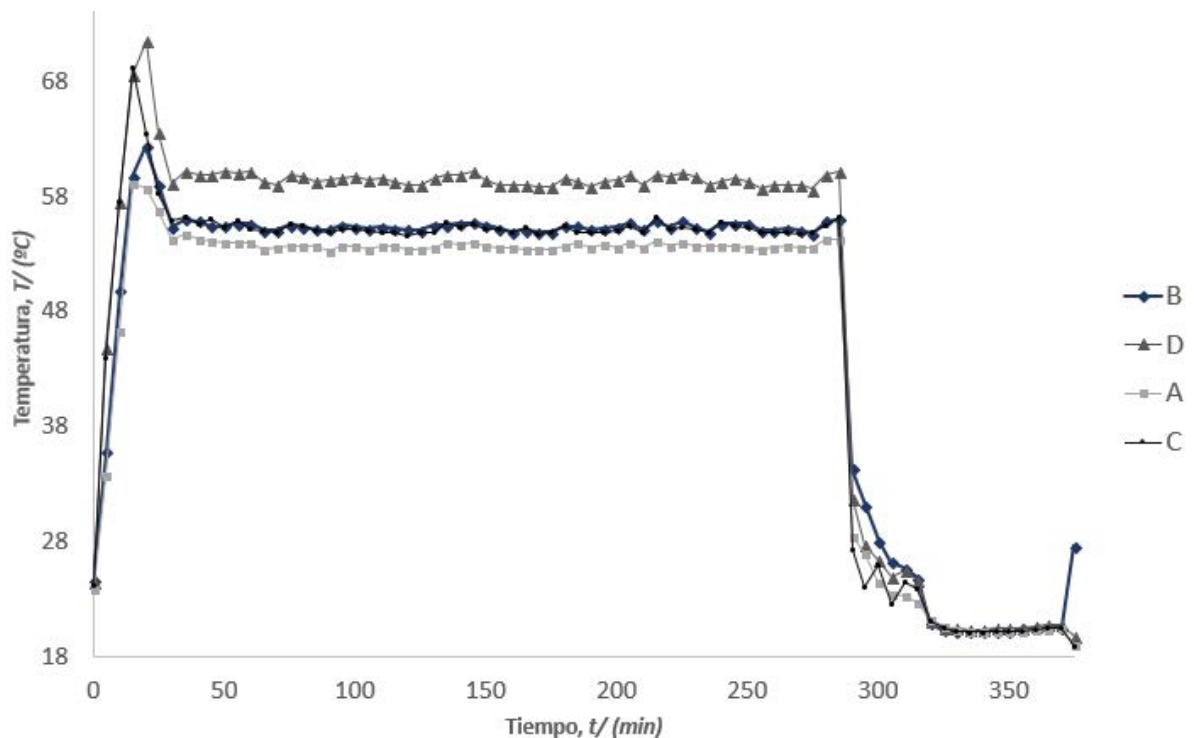
**Figura 2.21.** Colocación de los sensores de los termopares en los puntos de comprobación térmica A, B, C y D dentro del volumen de trabajo.

Con base en las mediciones realizadas para la comprobación térmica del EEMA en los puntos A, B, C y D indicados en la Figura 2.21, se obtuvieron una curva de operación general del ciclo de ensayo (Figura 2.22), una curva de tiempo de estabilidad térmica (Figura 2.23), un

gráfico de control en la temperatura de ensayo a alta temperatura (Figura 2.24) y una curva de ensayo a baja temperatura (Figura 2.25).

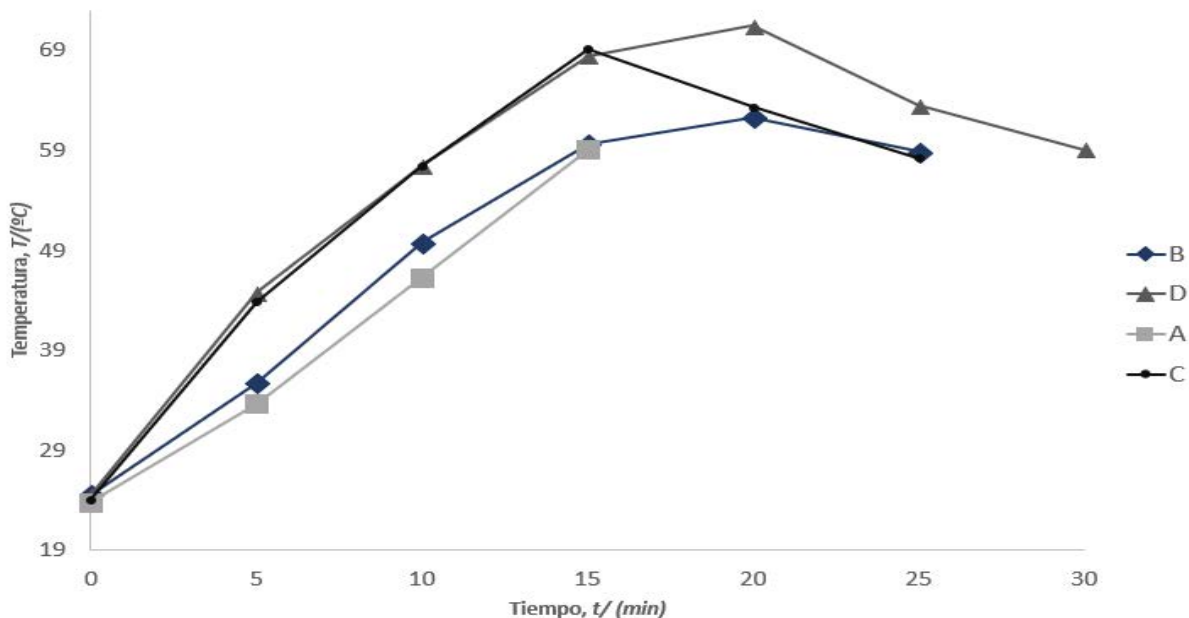
Cabe destacar que debido a las modificaciones para la construcción del EEMA, el controlador de temperatura del horno convectivo presentó un desfase entre la temperatura de lectura en los termopares contra la configurada en el controlador, esto se debió a que la configuración el controlador contemplaba una geometría y espacio para la transmisión de calor distinto al resultante de las modificaciones para el EEMA.

Como resultado de ello, para comprobar el EEMA a  $58.0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Temperatura máxima del Ciclo B del Cuadro 1.17), se requirió colocar el controlador térmico a  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 2.22.** Curva térmica general de la operación del EEMA para el Ciclo B y cuatro puntos de comprobación.

Con base en la Figura 2.22, se observan tres regiones bien definidas en el comportamiento térmico operacional del EEMA para los cuatro puntos de comprobación. La primera, es un aumento acelerado de temperatura y su posterior estabilización a un valor configurado en el controlador térmico.



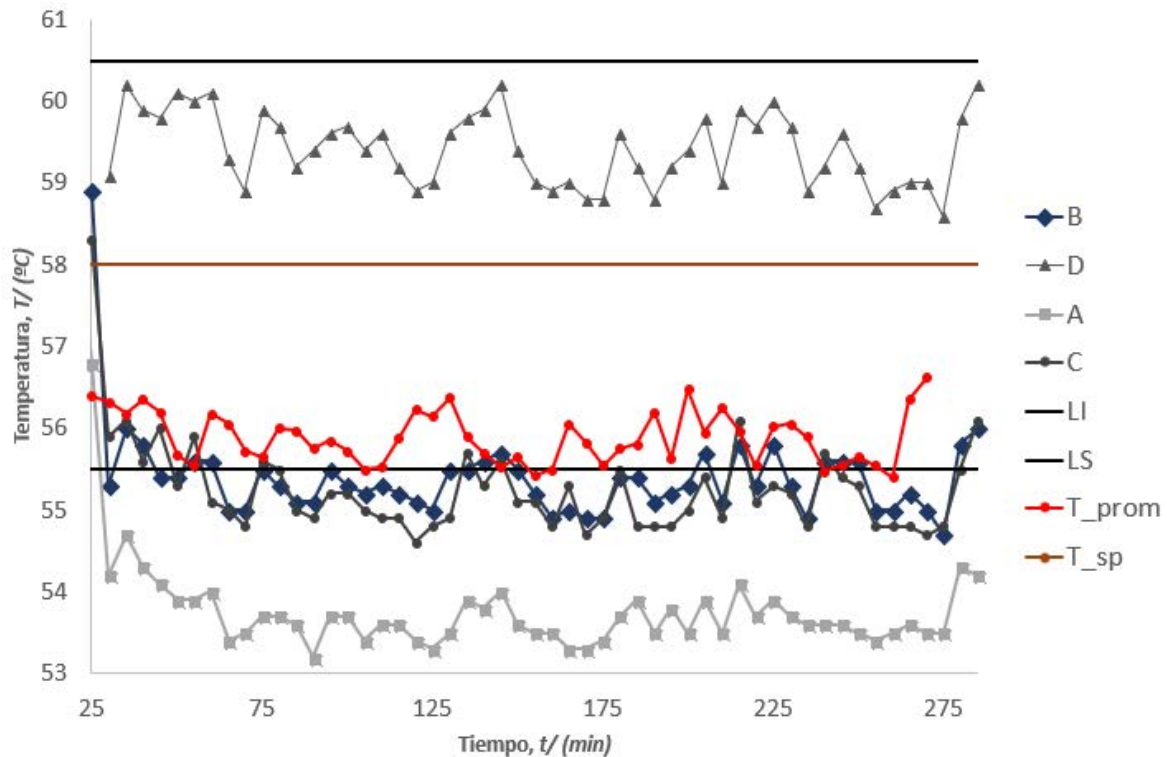
**Figura 2.23.** Curva de precalentamiento del EEMA para el Ciclo B y cuatro puntos de comprobación.

Esta primera sección se conoce como fase de precalentamiento y se detalla en la Figura 2.23, donde se puede apreciar que la curva del punto D le toma una mayor cantidad de tiempo para llegar al valor estable, sin embargo, es el punto que alcanza la mayor temperatura. Esto se debe a que en la disposición geométrica del horno, el punto D es el más cercano a la salida de ventilador que moviliza el aire caliente generado por la resistencia.

Seguidamente, los puntos B y C que son el segundo y el tercero más cercanos a la resistencia térmica respectivamente, presentaron una temperatura de estabilización térmica similar, sin embargo, el punto C (más lejano que el B, respecto a la resistencia), presentó un mayor valor de temperatura máxima de precalentamiento, esto se debió a que el punto C se encontraba alineado al punto D que a su vez se encuentra alineado a la salida del ventilador, por lo que el flujo de calor es más directo respecto al que recibe el punto B.

Por último el punto A, combina los factores de lejanía a la resistencia y de un flujo indirecto por parte del ventilador, por lo que posee el calentamiento más gradual y en esta ubicación se alcanzan valores admisibles de ensayo en un tiempo menor. Eso responde a que al punto A llega un flujo de calor más difuso y homogéneo.

De la Figura 2.23, se establecieron 30 minutos como tiempo de precalentamiento para la ejecución de ensayos en el EEMA.

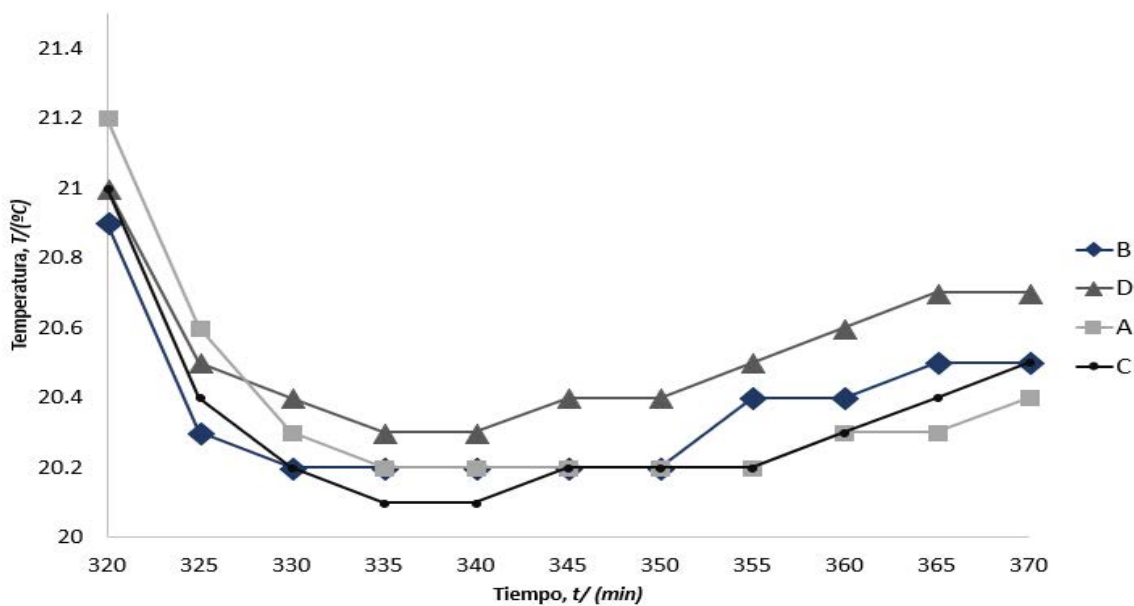


**Figura 2.24.** Gráfico de control de los cuatro puntos de comprobación térmica respecto a la temperatura del subciclo de calor del Ciclo B del EEMA.

Con respecto a la estabilidad térmica en el valor del subciclo de calor del Ciclo B del EEMA, en la Figura 2.24 se aprecia el gráfico de control, del cual se deduce que la temperatura promedio del subciclo de calor durante todo el tiempo de ensayo es menor a la media, pero la mayoría de tiempo, dentro de la tolerancia estipulada por la norma ASTM D4799.

Sin embargo, si se consideran los puntos de comprobación individualmente, solamente el punto D se encuentra dentro de la tolerancia del valor de ensayo. Entre las principales causas que afectan la respuesta térmica del equipo se pueden mencionar los cambios en el aislamiento del horno, ya que se perforó un drenaje en la base del horno, se colocaron persianas en los conductos de ventilación de la resistencia térmica, se introdujeron cables por el agujero de monitoreo del horno y el factor ambiente influye con mayor facilidad la cámara de ensayo debido a las afecciones en el aislamiento mencionadas con antelación.

Pese a lo expuesto anteriormente, el desempeño del EEMA a 65 °C en el controlador térmico, para alcanzar aproximadamente 58 °C en la cámara de ensayo, se consideró suficiente para la ejecución de ensayos experimentales del prototipo debido a que más de siete valores de temperatura promedio en el lapso del tiempo de ensayo se encontraron dentro de la tolerancia admisible, además, el ajuste individual de todos los puntos de comprobación supone modificaciones al controlador térmico y el descarte de mecanismos de protección contra humedad que son indispensables para la operación segura del EEMA.



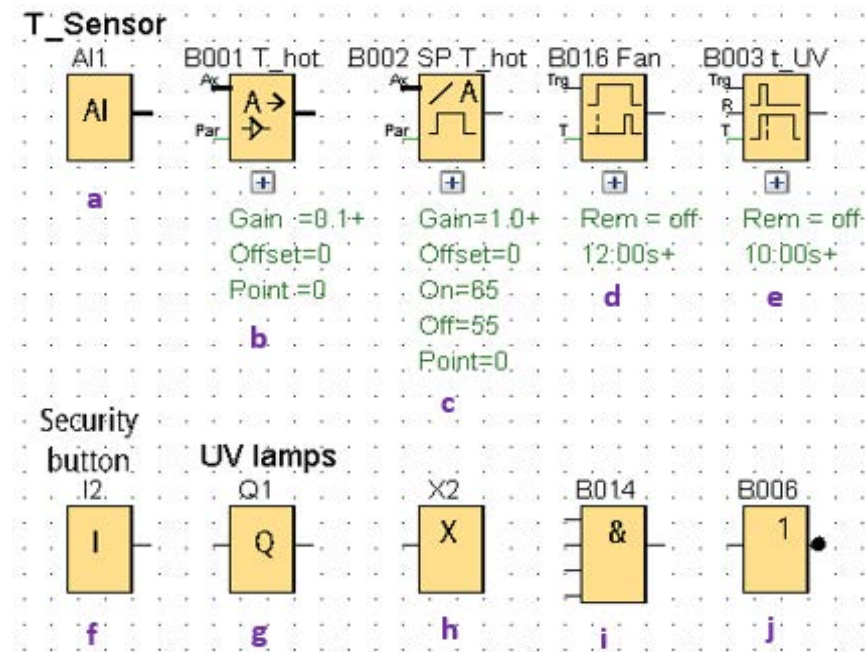
**Figura 2.25.** Curva de ensayo a baja temperatura para cuatro puntos de comprobación del subciclo de precipitación del Ciclo B del EEMA.

Por otro lado, para el subciclo de precipitaciones (Figura 2.25), el Cuadro 1.17 estipula un valor de  $15.0\text{ °C} \pm 2.5\text{ °C}$  para el Ciclo B, el cual no se alcanzó en la curva expuesta con antelación, ya que la temperatura mínima alcanza oscila los 20 °C. Esto se debió a que el EEMA no cuenta con un sistema de acondicionamiento de aire y la temperatura mínima de ensayo es tan baja como la temperatura ambiente lo sea y dado que la comprobación térmica se realizó en verano del 2022, los valores obtenidos son esperados.

Finalmente, con base en la Figura 2.22 y la Figura 2.25, se determinó que el tiempo de enfriamiento hasta temperatura ambiente es de 25 minutos. Cabe destacar que el detalle de los datos de comprobación térmica se presenta en el Cuadro D.1 de la sección 2.8, Apéndice D.

### 2.3.4. Programa para ejecución automática del EEMA

Para la programación del EEMA utilizando la modalidad FUP en el software *LOGO! Soft Comfort V8.3.0*, se emplearon los bloques lógicos que se observan en la Figura 2.26.

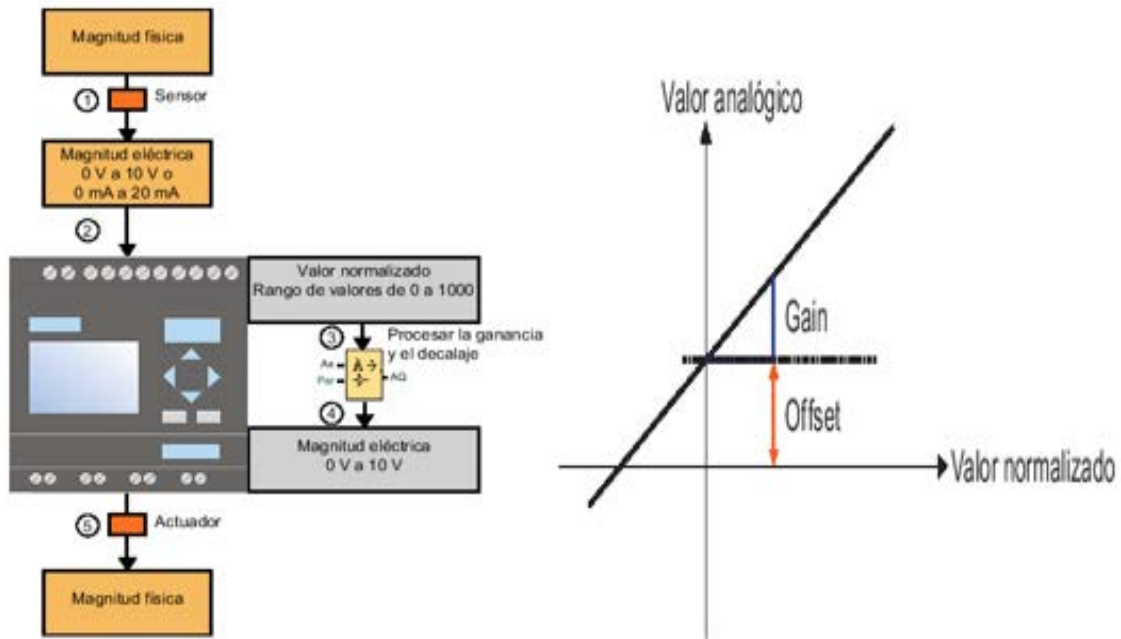


**Figura 2.26.** Bloques lógicos empleados en la programación del PLC LOGO! 230 RCE para la automatización del EEMA: a) Entrada analógica; b) Amplificador analógico; c) Conmutador analógico de valor umbral; d) Retardo a la conexión; e) Retardo a la desconexión; f) Entrada digital; g) Salida/ relé de los bombillos; h) Conector abierto; i) AND; j) NOT.

La programación del PLC se fundamentó en la traducción del algoritmo descrito en la sección 1.3.7.b al lenguaje FUP. Primero, se empleó una entrada analógica (Figura 2.26.a), la cual corresponde al sensor de temperatura que posee el horno convectivo original. Se determinó como analógica, debido a que su lectura proviene de una variable física real no interpretable por una computadora (Siemens, 2020).

Con base en lo anterior, se añadió la función de amplificación analógica (Figura 2.26.b), la cual toma la señal de una magnitud física y mediante la ganancia (parámetro que amplifica la magnitud eléctrica de la lectura que hace el sensor) y el decalaje (parámetro que determina el punto cero de la magnitud eléctrica) permiten la lectura en el PLC (Siemens, 2020). En la Figura 2.27 se ilustra el proceso del amplificador analógico.





**Figura 2.27.** Proceso que realiza el amplificador analógico para interpretar la información recibida por un sensor y habilitar una señal comprensible para el PLC.

Fuente: (Siemens, 2020).

Para el caso del EEMA, dado que el sensor tiene un rango de medición de 0 °C a 100 °C, se empleó una ganancia de +0.1 y un decalaje de 0, con lo cual el PLC interpreta la escala del sensor traducida a una escala de 0 a 1000.

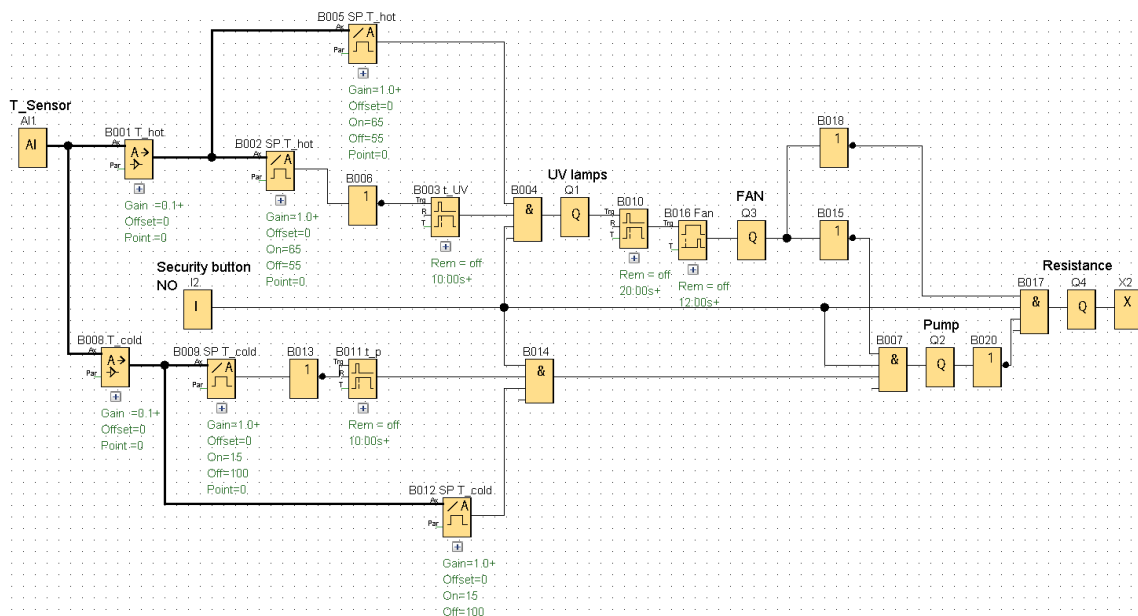
Seguidamente, mediante un conmutador analógico de valor umbral (Figura 2.26.c), se puede definir en una escala física, los valores umbrales de activación y desactivación del bloque (Siemens, 2020). En el caso del EEMA, se empleó una ganancia +1.0 (para tomar los valores físicos como tales) y un valor de activación de 65 °C, el cual de la sección 2.3.3, se estableció como el valor para lograr la temperatura del subciclo de calor del Ciclo B y, como valor de desactivación se emplearon 55 °C. Cabe destacar que los términos activación y desactivación refieren al paso de la señal en el programa del PLC.

Para el control de los tiempos de actividad y de desfase (Siemens, 2020), se emplearon las funciones retardo a la conexión (Figura 2.26.d) y retardo a la desconexión (Figura 2.26.e), las cuales se configuraron con los tiempos de los subciclos de calor y de aspersion según el caso de aplicación.

Como componentes físicos directos en el código del PLC, se emplearon una entrada tipo pulsador normalmente abierto (Figura 2.26.f), la cual representa los sensores de apertura de las puertas que al estar abiertas no hay contacto eléctrico, y salidas/ relés (Figura 2.26.g), que corresponden a la activación de la bomba, los bombillos, la resistencia o un ventilador del horno para controlar parámetros físicos.

Las funciones conector abierto (Figura 2.26.h), AND (Figura 2.26.i) y NOT (Figura 2.26.j) son de tipo lógicas. La primera sirve para cerrar bloques con una conexión pendiente y permite al PLC comprender que el código concluye donde esté, la función AND permite la activación si todas las señales que recibe son activas y, la función NOT, invierte el tipo de señal que recibe, es decir, una señal de activación la vuelve de desactivación y viceversa (Siemens, 2020).

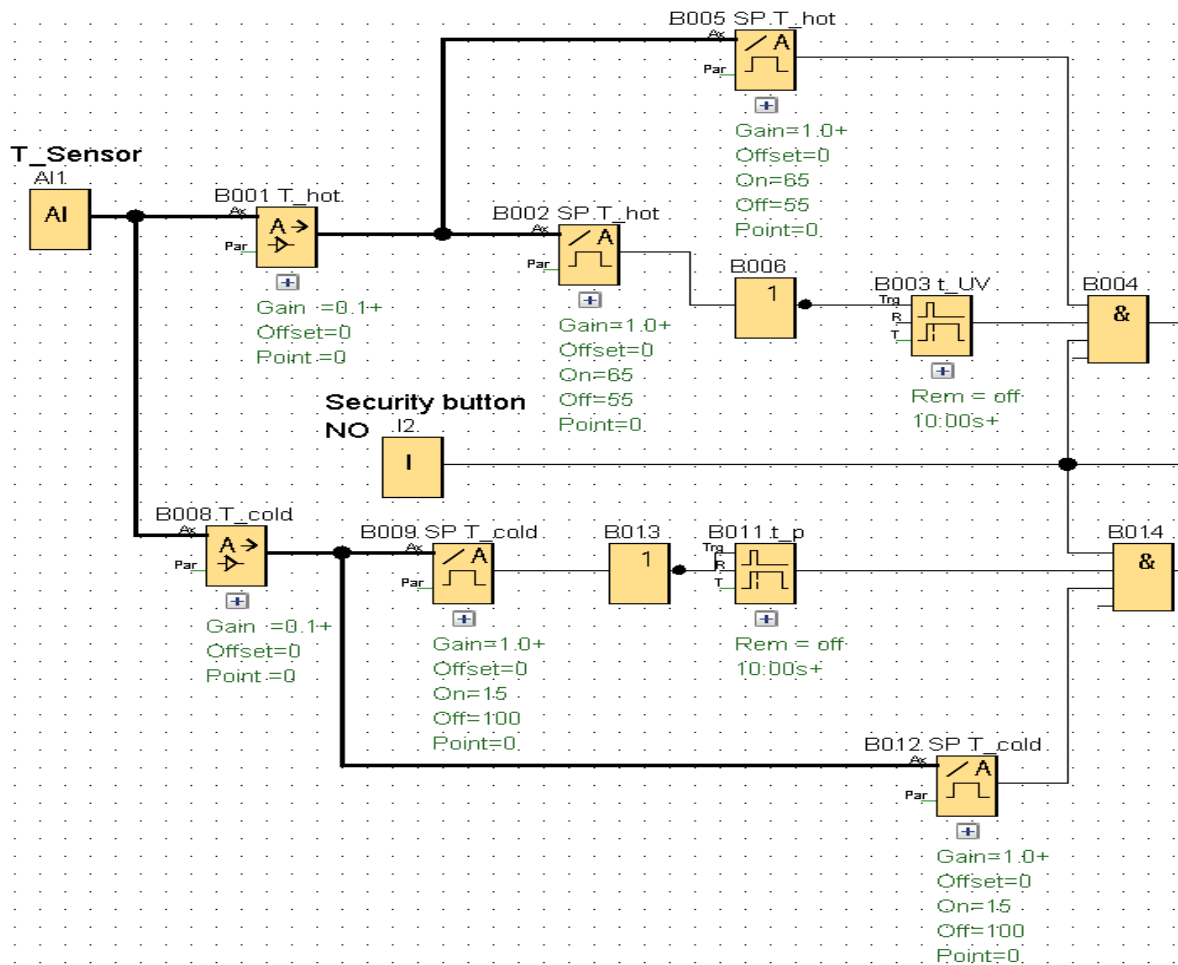
En la Figura 2.28, se aprecia una vista general del código para que el PLC ejecute el Ciclo B del Cuadro 1.17 para el EEMA. Posteriormente, se detalló cada sección de este.



**Figura 2.28.** Vista general del código de automatización del Ciclo B del EEMA para ensayos de envejecimiento de asfaltos.

El código expuesto en la Figura 2.29, se dividió en dos secciones: el algoritmo introducción (Figura 2.29) y el algoritmo de ejecución (Figura 2.30).

Primeramente, el algoritmo de introducción procesa los datos del sensor de temperatura conforme a lo explicado en torno a la Figura 2.27, tanto las lecturas a baja temperatura (código bajo la línea del *Security button*) como las de alta temperatura (código arriba de la línea del *Security button*).

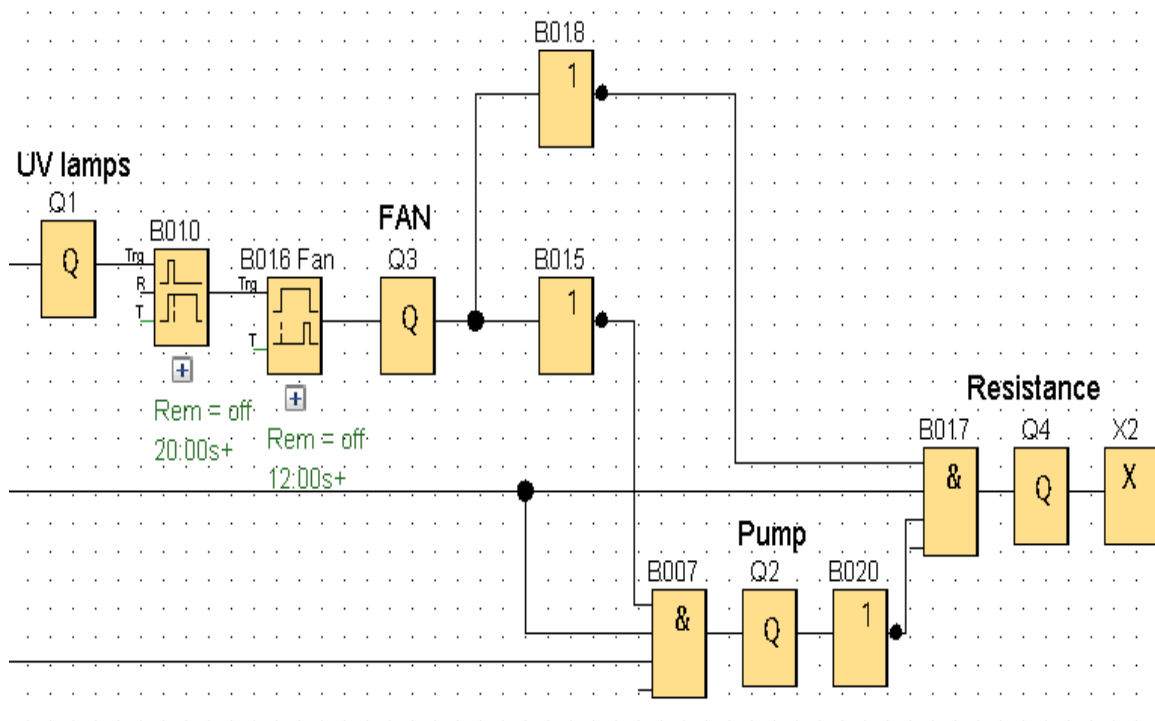


**Figura 2.29.** Algoritmo de introducción de base para el funcionamiento automático del EEMA.

Una vez que los datos del sensor fueron procesados, la señal, tanto en la ruta de calor, como en la ruta fría, se dividen hacia dos funciones de valor umbral. El conmutador de valor umbral que entra directamente a la función AND introduce la condición de activación con base en una temperatura dada; el conmutador de valor umbral que ingresa a la función NOT permite que al alcanzarse el valor umbral se envíe un pulso al bloque de retardo en la desconexión, lo que activa dicho bloque.

Adicionalmente, el pulsador de las puertas de tipo normalmente abierto, al estar las puertas cerradas envía una señal de activación a la función AND. Con base en lo anterior, la función AND recibe tres señales de activación, por lo que permite el paso de una señal durante el tiempo que el retardo en la conexión permite.

Ambas rutas (la de calor y la fría) del algoritmo de introducción, concluyen en una función AND que al reunir los requisitos de baja o alta temperatura, envía una señal que activa el algoritmo de ejecución (Figura 2.30), el cual posee una ruta de calor y una ruta fría.



**Figura 2.30.** Algoritmo de ejecución para el funcionamiento automático del EEMA.

Para la ruta de calor del algoritmo de ejecución, la señal de activación que proviene del bloque AND ingresa al bloque Q1, lo que activa las lámparas UV durante el tiempo fijado en la función retardo a la desconexión.

Una vez concluido el tiempo del bloque Q1 se desactiva y el efecto activación/desactivación libera un pulso que activa la función B010 de retardo a la desconexión que consecuentemente activa la función B016 de retardo a la conexión. La combinación de ambos bloques produce que al terminar el ciclo de radiación del EEMA, un ventilador (Q3) se encienda y disipe el

calor del horno hasta la temperatura que active el algoritmo de introducción de la ruta fría y, posteriormente, el algoritmo de ejecución de la ruta fría.

Debido a lo anterior, la señal que sale del bloque del ventilador Q3, ingresa a dos funciones NOT, tal que los siguientes bloques AND no reciban señales de activación durante el funcionamiento del ventilador.

Cuando la temperatura baja lo suficiente para satisfacer los requisitos de la función AND del algoritmo de introducción y, además, el ventilador queda inactivo, el bloque Q2, que corresponde a la bomba, se activa durante el tiempo determinado en la función de retardo a la desconexión del algoritmo de introducción de la ruta fría.

Seguidamente, cuando la bomba se apaga, la señal de desactivación ingresa a un bloque NOT para que la señal se convierta de tipo activación al ingresar a la función AND previa al bloque Q4 (resistencia del horno). Dicho bloque AND recibe también una señal de activación convertida proveniente de la desactivación del ventilador y una señal de activación cuando las puertas están cerradas, lo cual permite al horno volver a una operación de calentamiento hasta que se repita el subciclo de calor.

Todas las funciones AND que implicaron la activación de los bombillos (Q1), la bomba (Q2), el ventilador (Q3) o la resistencia (Q4), se encuentran condicionadas al pulsador de tipo normalmente abierto (NO), que se encuentra en las puertas del EEMA. Esto responde a una medida de seguridad, ya que al estar las puertas abiertas, todo funcionamiento del EEMA se detiene.

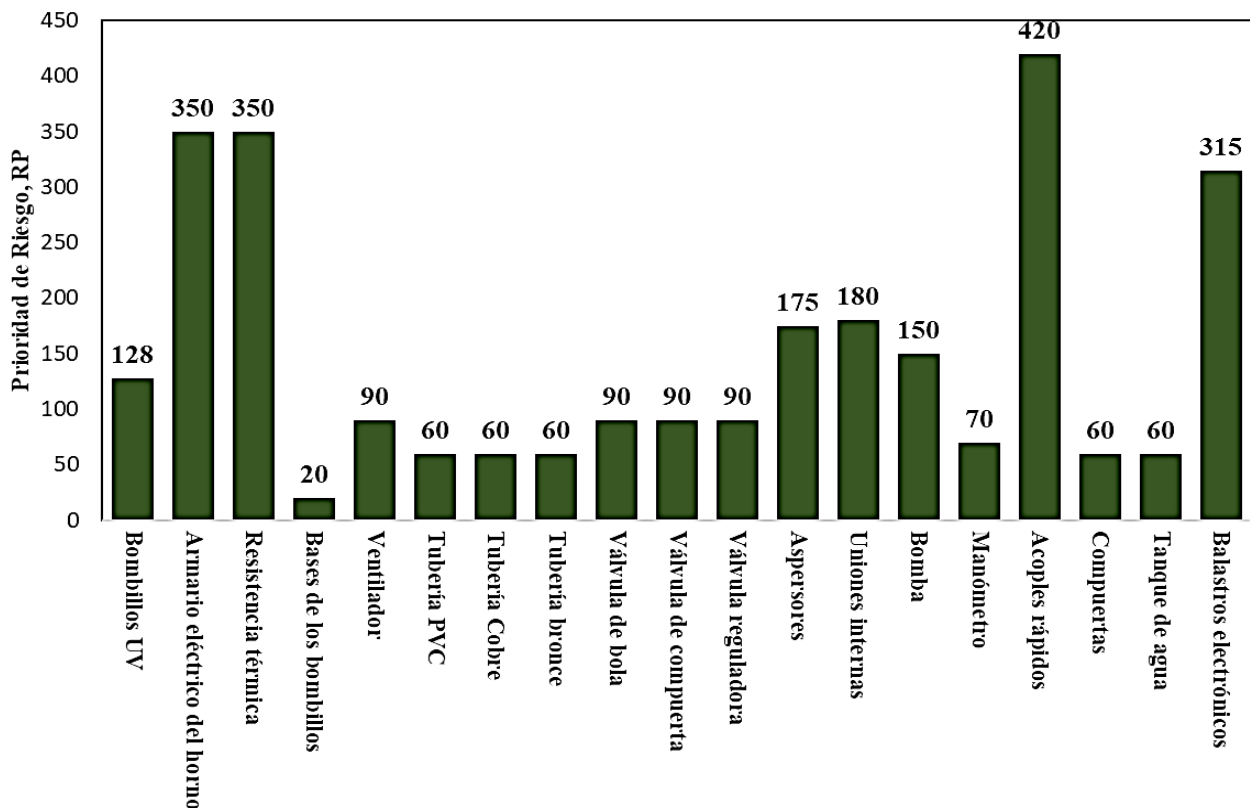
Por otro lado, se emplearon tiempos de segundos para los bloques de retardo en la conexión y en la desconexión en la ejecución de simulaciones, a modo de estudiar el comportamiento del algoritmo sin tener que esperar alrededor de cuatro horas por simulación.

Los resultados de la simulación se aprecian en las Figuras E.1, E.2, E.3, E.4 y E.5, del Apéndice E (las líneas azules implican señales de inactividad y las líneas rojas son señales de activación).

### 2.3.5. Análisis del DFMEA del EEMA

Con base en el estudio de riesgos aplicado a los componentes mencionados en la sección 2.2.5, a través de las escalas de los Cuadros 2.4, 2.5 y 2.6, se obtuvo el DFMEA que se aprecia en las Figuras Y.19, Y.20, Y.21, Y.22, Y.23 y Y.24 de los Anexos del Capítulo 2.

A modo de resumen de la información del DFMEA, en la Figura 2.31, se presentan las PR máximas por componente.



**Figura 2.31.** Prioridades de Riesgo (PR) máximas obtenidas a partir del DFMEA del EEMA por componentes.

A partir de la Figura 2.31, se determinó que los componentes eléctricos (a excepción de los bombillos UV y sus bases), constituyen los elementos de mayor riesgo en el diseño del EEMA, esto debido a que las modificaciones realizadas al horno convectivo original implican el uso de agua.

Adicionalmente, el horno convectivo original no era un equipo diseñado para altos volúmenes de agua, por lo que el riesgo de cortos circuitos se determinó como prioritario en materia de

prevención de incidentes y la mayoría de las medidas de seguridad se aplicaron entorno a dicho riesgo.

Con base en lo anteriormente expuesto, en el DFMEA de la Figura Y, se emplearon como medidas de prevención, el mantenimiento periódico de los componentes eléctricos, su adecuado aislamiento, el uso del multímetro para monitorear superficies energizadas y el sello de las uniones con posibilidad de filtración de aguas.

Por otro lado, para los componentes de trasiego, las medidas preventivas se centraron en la inspección de fugas, derrames o filtraciones, así como en el funcionamiento correcto de los aspersores, la bomba, las válvulas y el manómetro, ya que, como principal incidente, se determinó el golpe de ariete, el cual puede dañar significativamente el sistema de aspersión y lesionar al usuario del ensayo debido a la proyección de materiales.

Como medida preventiva adicional con base en la sección 2.1.5, se incorporó rotulación de seguridad en el EEMA (Figura 2.32). El uso de guantes apropiados previene posibles electrocuciones, el uso de gafas oscuras UV, protege los ojos de las radiaciones no ionizantes de los bombillos UV.



**Figura 2.32.** Rotulación de seguridad y uso obligatorio de indumentaria para el uso del EEMA.

### 2.3.6. Ajustes en los sistemas de radiación y aspersión

Seguidamente, se detallan los aspectos relevantes en los ajustes a los parámetros de ensayo y se presentan los cuadros con los escalamientos actualizados.

#### a. Ajustes al sistema de radiación

Para recalculer los niveles de irradiancia del sistema de radiación se empleó la herramienta *UV-C Calculator PURITEC HNS* de Osram GmbH (OSRAM, 2021).

Cabe destacar que la herramienta brinda el tiempo de exposición para esterilizar una superficie, sin embargo, brinda también la irradiancia a un radio de un metro para un solo bombillo. Los detalles de la configuración para el cálculo y los resultados se observan en la Figura 2.33.

#### UV-C calculation tool for surface cleaning with HNS lamps

Please select your product

HNS 15W G13

Please enter the number of lamps being used

3

Please enter the distance between lamp and surface in cm (max. 1000 cm)\*

50

Please select the microorganism to be eliminated

SARS-CoV-2

Calculate

#### Your result

|  |         |
|--|---------|
| Distance (m)   | 0.5     |
| UV-C irradiance at 1 metre (W/m <sup>2</sup> )                   | 0.5     |
| UV-C irradiance at 2.5 metres (W/m <sup>2</sup> )                | 0.08    |
| Organism type  | Virus   |
| UV-C dose (J/m <sup>2</sup> )                                    | 10.48   |
| Operation time to obtain a disinfection rate of 99.9% (hh:mm:ss) | 0:00:02 |

**Figura 2.33.** Configuración de la herramienta UV-C Calculator utilizando el modelo de bombillo Osram HNS 15 W G13.

Si bien se implementó el uso de tres bombillos en la herramienta de la Figura 2.33, esta aplicación solo brinda la irradiancia de un bombillo a un radio de referencia, ya que se puede notar que el radio introducido no coincide con la referencia para la irradiancia a un metro.



Un comportamiento similar aplica con la cantidad de bombillos: la irradiancia no varía al incrementar o reducir la cantidad de bombillos, por lo que se consideró el valor de  $0.5 \text{ W/m}^2$  como una irradiancia estándar a un radio de un metro.

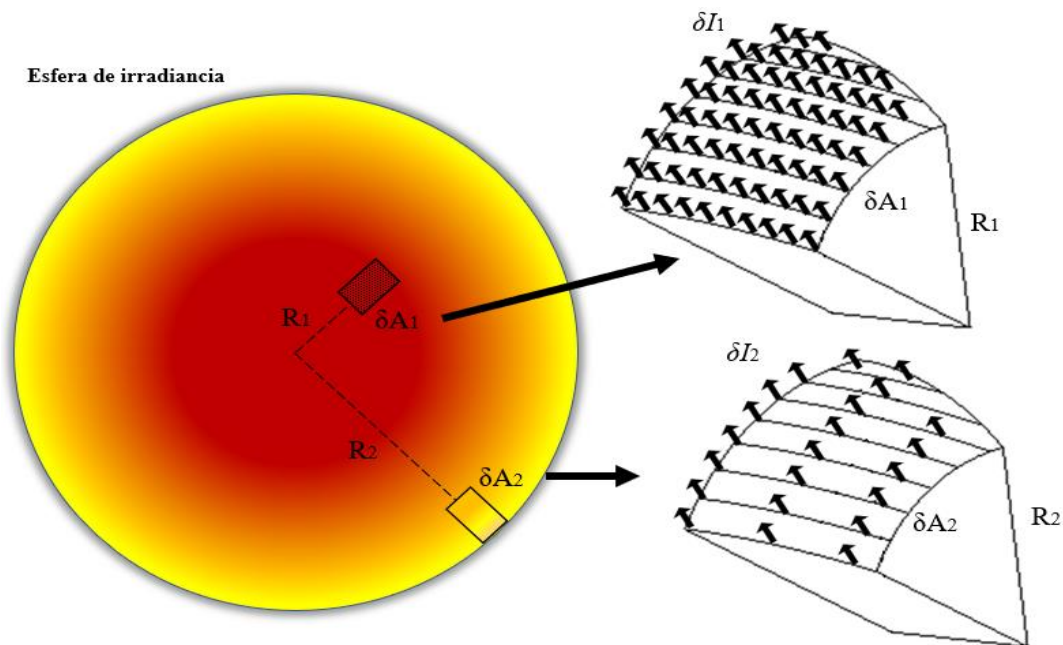
Adicionalmente, la relación entre el radio de la esfera de irradiancia y la irradiancia se reafirma en la herramienta de la Figura 2.33, ya que se proporciona una referencia a 2.5 m, la cual se demuestra al tomar como base la referencia a un metro en los cálculos que se derivan de la Ecuación 2.1.

$$I_{ref} = \frac{P_o}{A_e} = \frac{P_o}{4\pi R d^2} = 0.5 \frac{W}{m^2}, \text{ con } R d = 1 \text{ m} \quad (2.1)$$

$$P_o = 0.5 \frac{W}{m^2} \cdot 4\pi(1 \text{ m})^2 = 6.2832 \text{ W}$$

$$I_{Rd=2.5 \text{ m}} = \frac{6.2832 \text{ W}}{4\pi(2.5 \text{ m})^2} = 0.0800 \frac{W}{m^2}, \text{ con } R_l = 2.5 \text{ m}$$

Como se observó en los cálculos a partir de la Ecuación 2.1, se obtiene el valor de referencia proporcionado por el suplidor a 2.5 m. Esto se explica con base en la Figura 2.34.

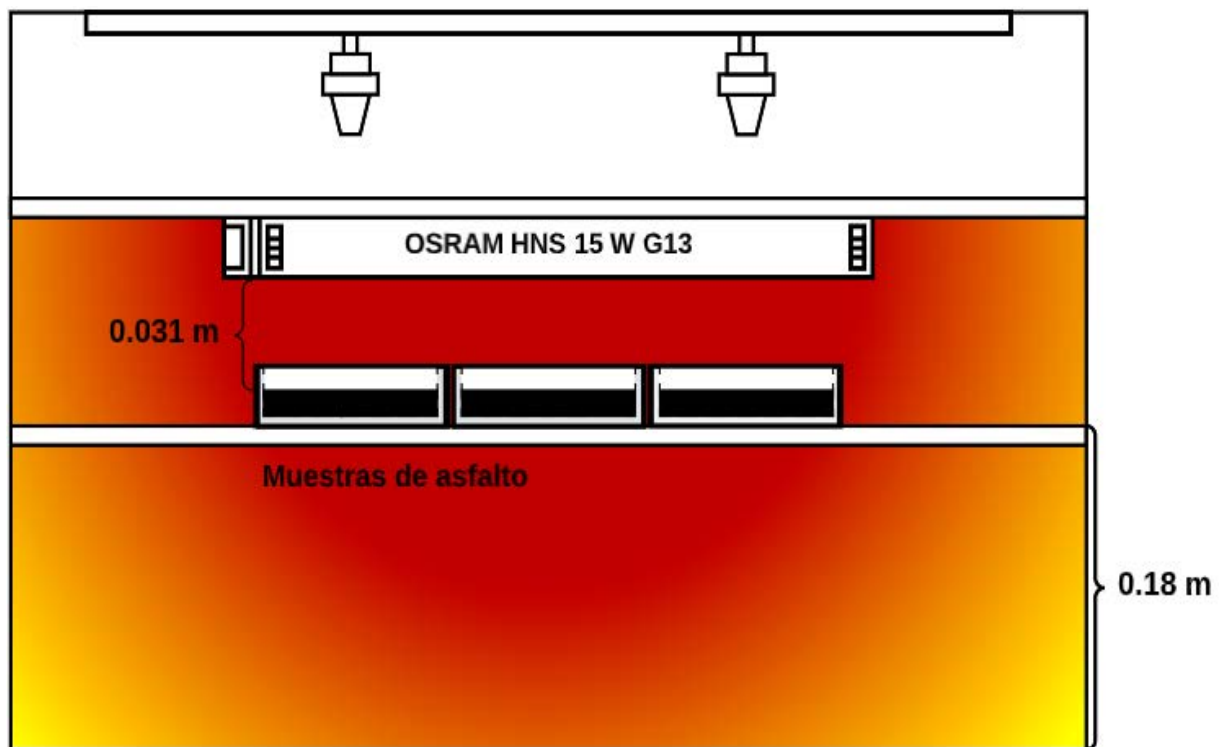


**Figura 2. 34.** Esfera de irradiancia y análisis gráfico de la intensidad de flujo de potencia aplicado en un par de áreas infinitesimales a distintas distancias del centro luminoso.

Como se observó en la Figura 2.34, la irradiancia se manifiesta como un gradiente que depende de la distancia entre el punto de análisis y el centro luminoso: cuanto más próximo el punto de referencia se encuentre del centro, la esfera de irradiancia es de menor diámetro y, consecuentemente, el área de irradiancia es menor, por lo que la tasa de potencia entre el área (irradiancia) es mayor.

El principio expuesto con antelación se empleó para compensar la baja irradiancia de los Osram HNS 15 W G13, ya que, según las referencias brindadas por el suplidor, se infiere que el modelo irradiancia espectral sigue un comportamiento similar a la Figura 1.22 (picos de irradiancia) y no el de una campana de irradiancia como la de la Figura 1.21.

La importancia de ajustar y compensar la baja irradiancia radica en brindar tiempos de escalamiento viables, para propiciar ensayos de menos de 100 horas para simular un año en lugar de 10.000 horas para el mismo tiempo. En la Figura 2.35 se observa la distribución propuesta para el ajuste de irradiancia.



**Figura 2.35.** Posición de las muestras asfálticas respecto a los bombillos UV en el EEMA para aproximar los tiempos de escalamiento propuestos en el Cuadro 1.11.

La distancia de separación que se muestra en la Figura 2.35, es la medida real que se tomó al posicionar los portamuestras en el EEMA. Seguidamente, mediante el algoritmo empleado en los cálculos que derivaron de la Ecuación 2.1, se obtuvo una irradiancia por cada bombillo de  $520.29 \text{ W/ m}^2$ .

Seguidamente, al emplear tres bombillos Osram HNS 15 W G13 y aplicar la irradiancia conjunta al escalamiento de los datos de irradiancia mostrados previamente en el Cuadro 1.6, se obtuvieron nuevos tiempos de escalamiento, los cuales se presentan en el Cuadro 2.7.

**Cuadro 2.7.** Tiempos de exposición corregidos para alcanzar el acumulado de radiación UV anual para las regiones de baja, media y alta irradiancias, mediante la emisión de tres bombillos OSRAM HNS 15 W G13.

| Regiones generales según el<br>IRS | Tiempo de exposición,<br>$t_{EXP}/ (\text{h})^{***}$ | Tiempo de exposición,<br>$t_{EXP}/ (\text{días})^{***}$ |
|------------------------------------|--|---|
| Baja Irradiancia                   | 44.97 → <b>38.65</b>                                 | 1.87 → <b>1.61</b>                                      |
| Media Irradiancia                  | 51.94 → <b>44.64</b>                                 | 2.16 → <b>1.86</b>                                      |
| Alta Irradiancia                   | 56.67 → <b>48.71</b>                                 | 2.36 → <b>2.03</b>                                      |

#### b. Ajustes al sistema de aspersión

Para el ajuste en el escalamiento de las precipitaciones se implementaron dos cambios. El primero en un reajuste al área y volumen de los portamuestras, ya que los portamuestras diseñados (ver Figura X.3 de los Anexos del Capítulo 1) presentan 11.6 cm de diámetro y los implementados en la construcción final son de 11.4 cm, además la altura de los portamuestras de diseño es de 1.1 cm, mientras que la de los portamuestras implementados es de 5 cm.

Como resultado del ajuste geométrico, se obtuvo una superficie de portamuestra de  $0.0102 \text{ m}^2$  y un volumen de 0.5104 L. El segundo cambio para el ajuste del escalamiento fue obtener el tiempo promedio de llenado como se describió en la sección 2.2.6.

Se empleó la media de los tiempos, pues se estimó como el equilibrio entre el sobrellenado de los portamuestras más expuestos a los aspersores y el retraso de llenado en los portamuestras con una posición menos favorable. La variabilidad que las posiciones de las muestras pueden

generar en los resultados experimentales se analizó en el Capítulo 3. Los datos de los tiempos de llenado se recopilan en el Cuadro 2.8.

**Cuadro 2.8.** Tiempos de llenado por portamuestra obtenidos durante la prueba de aspersión.

| Número de Portamuestra | Tiempo de llenado,<br>$t_{full}$ (s) | Tiempo de llenado,<br>$t_{full}$ (min) |
|------------------------|--------------------------------------|--|
| 1                      | 97                                   | 1.62                                   |
| 2                      | 241                                  | 4.02                                   |
| 3                      | 173                                  | 2.88                                   |
| 4                      | 184                                  | 3.07                                   |
| 5                      | 385                                  | 6.42                                   |
| 6                      | 115                                  | 1.92                                   |
| Promedio               | 199.17                               | 3.32                                   |

Como resultado de los ajustes geométricos y de tiempo de llenado, se empleó el cociente del volumen del portamuestra entre el producto del área del portamuestra por el tiempo promedio de llenado en minutos, con lo que se obtuvo un valor de 15.06 L/ m<sup>2</sup>·min para la intensidad de flujo de llenado.

Con la intensidad de Flujo de llenado, se reajustaron los valores de escalamiento de precipitaciones que se mostraron en el Cuadro 1.14, con lo cual se obtuvieron los factores de escalamiento pluvial (FEP) del Cuadro 2.9.

**Cuadro 2.9.** Tiempos de funcionamiento del sistema de aspersión corregidos para alcanzar el acumulado anual de precipitaciones por región.

| Regiones generales según el IH | Factor de escalamiento pluvial, FEP/ (min/ año)** | Factor de escalamiento pluvial, FEP/ (h/ año)** |
|--------------------------------|---|---|
| Seca                           | <del>175.5</del> → 127.0                          | <del>2.93</del> → 2.12                          |
| Húmeda Seca                    | <del>259.5</del> → 187.8                          | <del>4.33</del> → 3.13                          |
| Húmeda                         | <del>343.8</del> → 248.8                          | <del>5.73</del> → 4.15                          |
| Muy Húmeda                     | <del>357.2</del> → 258.5                          | <del>5.95</del> → 4.31                          |

Por último, con los valores corregidos de los Cuadros 2.7 y 2.9, se corrigieron los ciclos de ensayo mostrados previamente en el Cuadro 1.17, con lo que se obtuvo el Cuadro 2.10.

**Cuadro 2.10.** Ciclos de ensayos corregidos para el envejecimiento acelerado con base en factores meteorológicos costarricenses escalados a un año de exposición a la intemperie.

| <b>Ciclo</b>  | <b>A</b> | <b>B</b> | <b>C</b> | <b>D</b> | <b>E</b> | <b>F</b> | <b>G</b> | <b>H</b> | <b>I</b> | <b>J</b> |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tiempo del subciclo de calor y luz, $t_c/$ (h)                          | 3        | 3        | 3.5      | 3        | 3        | 2.6      | 2.6      | 2.6      | 3        | 2.6      |
| <b>Tipo de radiación</b>  | UVC      | UVC      | UVC      | UVC      | UVC      | UVC      | UVC      | UVC      | UVC      | UVC      |
| <b>Longitud de onda, <math>\lambda/</math> (nm)</b>                     | 240      | 240      | 240      | 240      | 240      | 240      | 240      | 240      | 240      | 240      |
| <b>Temperatura del subciclo de calor, <math>T_c/</math> (°C)</b>        | 64±2.5   | 58±2.5   | 64±2.5   | 64±2.5   | 46±2.5   | 64±2.5   | 58±2.5   | 64±2.5   | 64±2.5   | 64±2.5   |
| <b>Tiempo del subciclo de condensación, <math>t_s/</math> (min)</b>     | 8.5      | 8.5      | 8.5      | 13       | 13       | 13       | 17       | 17       | 17       | 18       |
| <b>Temperatura del subciclo de condensación, <math>T_s/</math> (°C)</b> | 19±2.5   | 15±2.5   | 19±2.5   | 19±2.5   | 8±2.5    | 19±2.5   | 15±2.5   | 19±2.5   | 19±2.5   | 19±2.5   |
| <b>Total de subciclos de radiación</b>                                  | 15       | 15       | 15       | 15       | 15       | 15       | 15       | 15       | 15       | 15       |
| <b>Total de subciclos de precipitación</b>                              | 15       | 15       | 15       | 15       | 15       | 15       | 15       | 15       | 15       | 15       |

### 2.3.7. Alcances operacionales del EEMA

Con base en todo el proceso de diseño y construcción del EEMA se establecieron como parámetros manipulables la radiación UV, la temperatura alta y las precipitaciones mediante los aspersores. Sin embargo, con base en la propuesta del proyecto presente, el prototipo final

del EEMA no contempló los parámetros de concentración de dióxido de carbono y manipular bajas temperaturas, además, de la implementación del PLC.

Lo anterior se debió a causas encontradas durante la investigación y al alcance del presupuesto para la elaboración del prototipo del EEMA. Respecto al parámetro de dióxido de carbono, se encontró en la literatura que su acción sobre el envejecimiento de los asfaltos es nula debido a la baja interacción química sólido-gas y a la baja reactividad de la molécula en sí (Vargas & Reyes, 2010).

Seguidamente, se decidió emplear el ciclo B para el desarrollo del Capítulo 3, que corresponde a la simulación acelerada de las condiciones meteorológicas del Valle Central (donde el EEMA se ubica), por lo que se estimó utilizar la temperatura ambiente como valor inferior de temperatura

## 2.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los estudios realizados para el diseño del EEMA, se concluyeron los siguientes aspectos:

- Fue posible la construcción funcional y segura del EEMA para simular ensayos de precipitaciones a temperatura ambiente y de radiación UV a altas temperaturas, con base en los factores climáticos costarricenses escalados del Capítulo 1. Relacionado con esto, se redactó un manual de buenas prácticas en el manejo del EEMA.
- Se comprobó la relación inversamente proporcional entre el nivel de irradiancia de los bombillos UV y el radio de irradiancia definido como la separación entre las fuentes luminosas y las muestras, lo cual implica que se pueden lograr mayores grados de oxidación al aumentar la proximidad de las muestras hacia la fuente de radiación.
- Se determinaron como alcances operacionales del EEMA la manipulación de los parámetros de alta temperatura, radiación y precipitaciones.

Con base en el proceso de construcción y evaluación del EEMA, se recomiendan los siguientes aspectos:

- Se recomienda para un futuro diseño del EEMA, la implementación de un sistema de protección contra la humedad para los bombillos UV o instalar bombillos UV resistentes a la humedad directa de modo que no perjudique su operabilidad con el fin de implementar el PLC a un bajo costo.
- Debido a la relación comprobada entre el radio de irradiancia y la irradiancia, se recomienda la creación de una escala geométrica que relacione la proximidad de las muestras a la fuente luminosa y el grado de irradiancia a modo de brindarle al analista una herramienta visual sobre la dosis de irradiancia a la que se expondrían las muestras al colocarlas a determinada distancia de los bombillos.
- Se recomienda realizar la comprobación térmica del EEMA a temperaturas mayores con el fin de mejorar la aproximación de las temperaturas del volumen de trabajo a las temperaturas estipuladas para los ciclos de radiación.

- Para el código del PLC se recomienda la introducción de código que permita proyectar en la pantalla del dispositivo un menú con opciones para escoger el ciclo que se desea ejecutar a modo de mejorar la interacción con el usuario.
- Se recomienda realizar estudios sobre la capacidad de suministro del tanque de agua del EEMA con el fin de encontrar una alternativa para reducir el tamaño.
- Se recomienda el uso de sellos de poliuretano como el *duretán* para la instalación de implementos de seguridad contra el agua en el EEMA, ya que mostraron tolerancia a la radiación en la cámara de ensayo.



## 2.5. NOMENCLATURA

### Siglas

|        |   |
|--------|---|
| AASHTO | <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> |
| AII    | Entrada analógica del sensor de temperatura                               |
| ASTM   | <i>American Society for Testing Materials</i>                             |
| AWM    | <i>Accelerated Weathering Machine</i>                                     |
| BCCR   | Banco Central de Costa Rica   |
| BTG    | <i>Bulbtronics Group</i>  |
| CCSS   | Caja Costarricense del Seguro Social                                      |
| DFMEA  | Análisis del Modo de Fallas y Efectos en Diseños                          |
| EEMA   | Equipo de envejecimiento por meteorización de los asfaltos                |
| FDOT   | <i>Florida Department of Transportation Research</i>                      |
| FEP    | Factor de escalamiento pluvial, <i>min/ año</i>                           |
| FUP    | Diagrama de funciones   |
| HVS    | Simulador de vehículos pesados  |
| INS    | Instituto Nacional de Seguros   |
| IRS    | índice de radiación solar, <i>adim</i>                                    |
| IVA    | Impuesto sobre el valor agregado  |
| KOP    | Esquema de contactos  |
| NEMA   | <i>National Environment Management Authority</i>                          |
| NO     | Pulsador normalmente abierto  |
| NPT    | <i>National Pipe Thread</i>   |
| PAV    | <i>Pressure Aging Vessel</i>  |
| PLC    | Controlador lógico programable  |
| RTFO   | <i>Rolling Thin Film Oven</i>   |
| SP     | <i>Set point</i>  |
| UDF    | Función personalizada   |
| UV     | Ultravioleta  |
| UVC    | Ultravioleta C  |

### Mayúsculas

|                |   |
|----------------|---|
| A <sub>e</sub> | Área de irradiancia, <i>m<sup>2</sup></i>       |
| D              | Detección                                       |
| I1             | Entrada 1 del PLC                               |
| I2             | Entrada 2 del PLC para el pulsador de la puerta |

|           |   |
|-----------|---|
| $I_{ref}$ | Irradiancia de referencia, $W/m^2$                    |
| L1        | Alimentación al PLC                                   |
| N         | Neutro del PLC  |
| O         | Ocurrencia  |
| $P_o$     | Potencia nominal de la bombilla, $W$                  |
| Q1        | Salida PLC de los bombillos UV                        |
| Q2        | Salida PLC de la bomba periférica                     |
| Q3        | Salida PLC del ventilador                             |
| Q4        | Salida PLC de la resistencia térmica                  |
| Rd        | Radio de irradiancia, $m$                             |
| S         | Severidad   |
| T         | Temperatura, $^{\circ}C$                              |
| $T_c$     | Temperatura del subciclo de calor, $^{\circ}C$        |
| $T_s$     | Temperatura del subciclo de condensación, $^{\circ}C$ |

**Minúsculas**

|            |  |
|------------|--|
| tc         | Tiempo del subciclo de calor y luz, $h$  |
| $t_{EXP}$  | Tiempo de exposición, $h$                |
| $t_{full}$ | Tiempo de llenado, $s$                   |
| ts         | Tiempo del subciclo de condensación, $h$ |

**Griegas**

|           |                       |
|-----------|-----------------------|
| $\lambda$ | Longitud de onda, $m$ |
|-----------|-----------------------|

**Subíndice**

|      |                                 |
|------|---------------------------------|
| c    | Indica subciclo de calor        |
| e    | Indica esfera de irradiancia    |
| EXP  | Indica exposición               |
| full | Indica valor de llenado         |
| o    | Indica nominal cuando va con P  |
| ref  | Indica valor de referencia      |
| s    | Indica subciclo de condensación |

## 2.6. BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO. (2016). ASTM D2872-04 Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt ( Rolling Thin-Film Oven Test ). *Annual Book of ASTM Standards, C*, 1–6. <https://doi.org/10.1520/D2872>
- AASHTO. (2017). Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials of Soils and Aggregate Materials. *ASTM Compass*. <https://compass-astm-org.ezproxy.sibdi.ucr.ac.cr/download/ca118c34-56ff-4517-98b8-64adc5b7b8ea.35327.pdf>
- ASTM. (2013). Standard Guide for Addressing Variability in Exposure Testing of Nonmetallic. *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/G0141-09R13.2>
- ASTM. (2016a). Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet ( UV ) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials. *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/G0154-16.2>
- ASTM. (2016b). Standard Terminology Relating to Natural and Artificial Weathering Tests of Nonmetallic Materials. *ASTM International*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/G0113-16.2>
- ASTM. (2017a). Standard Practice for Conditioning and Handling of Nonmetallic Materials for Natural and Artificial Weathering Tests. *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/G0147-17.2>
- ASTM. (2017b). Standard Test Method for Accelerated Weathering Test Conditions and Procedures for Bituminous Materials ( Fluorescent UV and Condensation. *Current, 04*(March 2000), 1–2. <https://doi.org/10.1520/D4799>
- ASTM. (2018a). Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV), ASTM International, West Conshohocken, PA. *Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*, *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 12(2016), 28–12. <https://doi.org/10.1520/D6521-19A.1>
- ASTM. (2018b). Standard Test Method for Failure End Point in Accelerated and Outdoor Weathering of. *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/D1670>
- ASTM. (2019a). Standard Practice for Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources. *ASTM International*, 15(ASTM G151-19), 1–11. <https://doi.org/10.1520/G0151-19.2>
- ASTM. (2019b). Standard Practice for Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources. *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/G0151-19.2>
- ASTM. (2019c). Standard Practice for Preparation of Test Panels for Accelerated and Outdoor Weathering of Bituminous Coatings. *ASTM International*, *ASTM D1669*.

- <https://doi.org/10.1520/D1669>
- Behera, M., & Behera, B. (2016). *Design Failure Modes and Effects Analysis ( DFMEA ) of a Human Powered Recumbent Vehicle*. 5(04), 27–32. <https://www.ijert.org/research/design-failure-modes-and-effects-analysis-dfmea-of-a-human-powered-recumbent-vehicle-IJERTV5IS040105.pdf>
- CCSS. (2005). *Manual de señalización institucional*. [http://www.siacss.com/Downloads/Biblioteca\\_Virtual/Reglamento\\_y\\_Normativas/2005\\_Manual\\_de\\_Senalizacion\\_CCSS.pdf](http://www.siacss.com/Downloads/Biblioteca_Virtual/Reglamento_y_Normativas/2005_Manual_de_Senalizacion_CCSS.pdf)
- FDOT. (2007). *Florida Department of Transportation Research*. 49(850), 977. <http://www.dot.state.fl.us/research-center>
- INS. (2012). *Señalización en el trabajo*. Instituto Nacional de Seguros, Departamento de Gestión Empresarial En Salud Ocupacional, San José, Costa Rica. <https://doi.org/10.5406/j.ctvh9vvn.9>
- LanammeUCR. (2020). *Método para la Comprobación de Equipo de Acondicionamiento Térmico* (No. 05; IT-AG-20).
- Leiva, F., Camacho, E., & Aguiar, J. (2016). Simulación de variables climáticas en ensayos de daño acelerado de pavimentos a escala natural. *Revista Infraestructura Vial*, 18, 20–29. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/infraestructura/v18n32/2215-3705-infraestructura-18-32-00020.pdf>
- Ospino, A. (2020). *Programación del Mini Logo Siemens 230 RC*. <https://www.youtube.com/watch?v=kU7vgITE9kk&list=PL6oQqKuTgGfLLYjVTPsh97bw65hrxDenQ>
- Q-Lab. (2005). *Cámara de Intemperismo Acelerado: Especificaciones*. Q-Lab: LU-0819.3 SP.
- Shi, P., Dai, Z., Zhu, H., Gao, Q., Li, X., & Shen, J. (2019). Nanoscaled Characteristics of Recovered Asphalt Binders from Weathered Asphalt Mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, 47(5), 20180340. <https://doi.org/10.1520/jte20180340>
- Siemens. (2020). *Ayuda en pantalla* (V8.3.0). LOGO! Soft Comfort.
- Vargas, X., & Reyes, F. (2010). El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *Ingeniería e Investigación*, 30(3), 27–44.

## 2.7. APÉNDICES

### Apéndice C: Presupuesto para la construcción del EEMA

**Cuadro C.1.** Desglose de los costos en materiales para la construcción del EEMA.

| Material  | Cantidad | Medida   | Precio    | Moneda | Costo total colones | Proveedor final          |
|---|----------|----------|-----------|--------|---------------------|--------------------------|
| <b>Sistema de Aspersión:</b>  |          |          |           |        |                     |                          |
| Bomba periférica<br>Toolcraft TC26666 ½<br>HP*                        | 1        | unidad   | 33,886.50 | CRC    | ₡ 33,886.50         | EPA                      |
| Bombillos UV OSRAM<br>HNS 15 W G13**                                  | 10       | unidades | 5.95      | USD    | ₡ 39,805.50         | BTG                      |
| Tanque de agua de 55<br>gal   | 1        | unidad   | 6,070.80  | CRC    | ₡ 6,070.80          | Construplaza             |
| Manómetro de Glicerina<br>de (0 – 100) psi,<br>Macho*                 | 1        | unidad   | 4,985.00  | CRC    | ₡ 4,985.00          | Tubocobre<br>S.A.        |
| Válvula reguladora de<br>presión de ½” y de (15 –<br>75) psi, hembra* | 1        | unidad   | 29,780.00 | CRC    | ₡ 29,780.00         | Tubocobre<br>S.A.        |
| Válvula de bola 1”*   | 1        | unidad   | 8,260.00  | CRC    | ₡ 8,260.00          | Tubocobre<br>S.A.        |
| Válvula de compuerta<br>1”*   | 1        | unidad   | 5,785.50  | CRC    | ₡ 5,785.50          | Tubocobre<br>S.A.        |
| Aspersores de bombas<br>atomizadoras de ¼”<br>NPT                     | 4        | unidades | 4,347.89  | CRC    | ₡ 17,391.56         | Agroinsumos<br>Mora S.A. |
| Tubo PVC 1” Sch. 40*  | 3        | m        | 4,045.50  | CRC    | ₡ 12,136.50         | EPA                      |
| Tubo PVC ½” Sch. 40*  | 6        | m        | 1,290.50  | CRC    | ₡ 7,743.00          | EPA                      |
| Tubo Cobre 3/8”   | 3        | m        | 2,949.30  | CRC    | ₡ 8,847.90          | Enfogue S.A.             |
| Uniones tubo-tubería en<br>bronce ¼” NPT con<br>sello mecánico        | 12       | unidades | 1,479.00  | CRC    | ₡ 17,748.00         | Enfogue S.A.             |
| Teflón de 1”*   | 1        | unidad   | 1,522.50  | CRC    | ₡ 1,522.50          | EPA                      |
| Teflón de ½”*   | 1        | unidad   | 200.10    | CRC    | ₡ 200.10            | EPA                      |
| Codo HG Sch. 40 ½”*   | 3        | unidades | 630.75    | CRC    | ₡ 1,892.25          | EPA                      |
| Codo HG Sch. 40 1”*   | 3        | unidades | 1,213.65  | CRC    | ₡ 3,640.95          | EPA                      |
| Reducción tipo<br>campana HG 1” x ½”<br>Sch. 40*                      | 1        | unidad   | 804.75    | CRC    | ₡ 804.75            | EPA                      |

**Cuadro C.1 (Continuación).** Desglose de los costos en materiales para la construcción del EEMA.

| <b>Material</b>   | <b>Cantidad</b> | <b>Medida</b> | <b>Precio</b> | <b>Moneda</b> | <b>Costo total colones</b> | <b>Proveedor final</b> |
|---|-----------------|---------------|---------------|---------------|----------------------------|------------------------|
| Reducción tipo campana bronce ½" x ¼" NPT                 | 1               | unidad        | 4,350.00      | CRC           | ₡ 4,350.00                 | Enfogue S.A.           |
| Tees hembra bronce ¼" NPT                                 | 4               | unidades      | 2,175.00      | CRC           | ₡ 8,700.00                 | Enfogue S.A.           |
| Tee macho unión tubería con sello mecánico, bronce ¼" NPT | 1               | unidad        | 2,175.00      | CRC           | ₡ 2,175.00                 | Enfogue S.A.           |
| Tee HG hembra Sch. 40 1"*                                 | 1               | unidad        | 1,848.75      | CRC           | ₡ 1,848.75                 | EPA                    |
| Tee HG hembra Sch. 40 ½"*                                 | 1               | unidad        | 674.25        | CRC           | ₡ 674.25                   | EPA                    |
| Gaza doble ¾"   | 5               | unidades      | 78.30         | CRC           | ₡ 391.50                   | EPA                    |
| Uniones hembra (tubo) – macho (tubería) PVC Sch. 40 1"*   | 19              | unidades      | 730.80        | CRC           | ₡ 13,885.20                | EPA                    |
| Uniones hembra (tubo) – macho (tubería) PVC Sch. 40 1"*   | 8               | unidades      | 200.10        | CRC           | ₡ 1,600.80                 | EPA                    |
| Pintura blanca anticorrosiva 1/4 galón*                   | 1               | unidad        | 5,959.50      | CRC           | ₡ 5,959.50                 | EPA                    |
| <b>Sistema de radiación:</b>                              |                 |               |               |               |                            |                        |
| Cable de fibra de vidrio 12 AWG 600V 250 °C               | 12              | m             | 2,144.80      | CRC           | ₡ 25,737.60                | Electro MAZ LTDA       |
| Balastro electrónico 1x17 W                               | 3               | unidades      | 3,480.00      | CRC           | ₡ 10,440.00                | EPA                    |
| Base para fluorescentes                                   | 6               | unidades      | 648.15        | CRC           | ₡ 3,888.90                 | EPA                    |
| <b>Tratamiento de muestras:</b>                           |                 |               |               |               |                            |                        |
| Portamuestras aluminio                                    | 6               | unidades      | 2,182.22      | CRC           | ₡ 13,093.32                | Alumindustria LTDA     |
| <b>Totales sin impuestos</b>                              |                 |               |               |               |                            |                        |
| Total materiales UCR                                      |                 |               |               |               | ₡ 134,605.55               |                        |
| Total materiales cuenta propia                            |                 |               |               |               | ₡ 158,640.08               |                        |

**Cuadro C.1 (Continuación).** Desglose de los costos en materiales para la construcción del EEMA.

| <b>Material</b>   | <b>Cantidad</b> | <b>Medida</b> | <b>Precio</b> | <b>Moneda</b> | <b>Costo total colones</b> | <b>Proveedor final</b> |
|---|-----------------|---------------|---------------|---------------|----------------------------|------------------------|
| <b>Impuestos:</b>                                       |                 |               |               |               |                            |                        |
| Total Impuesto UCR<br>(IVA: 2 %)                        |                 |               |               |               | ₡ 2,692.11                 |                        |
| Total Impuesto Corriente (IVA: 13 %)                    |                 |               |               |               | ₡ 20,623.21                |                        |
| <b>Costo total de materiales constructivos del EEMA</b> |                 |               |               |               | <b>₡ 316,560.95</b>        |                        |

\* Montos con fondos UCR.

\*\* Proveedor externo (tipo de cambio: ₡664.58 al 22/04/2022)..

## Apéndice D: Datos de comprobación térmica

**Cuadro D. 1.** Datos de temperatura para la comprobación térmica del EEMA en el volumen de trabajo definido en la Figura 2.10.

| Lectura | Tiempo, $t/(min)$ | Temperatura A, $TA/ (^{\circ}C)$ | Temperatura B, $TB/ (^{\circ}C)$ | Temperatura C, $TC/ (^{\circ}C)$ | Temperatura D, $TD/ (^{\circ}C)$ |
|---------|-------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1       | 0                 | 23.8                             | 24.6                             | 24.1                             | 24.5                             |
| 2       | 5                 | 33.7                             | 35.8                             | 43.9                             | 44.8                             |
| 3       | 10                | 46.3                             | 49.8                             | 57.5                             | 57.5                             |
| 4       | 15                | 59.1                             | 59.7                             | 69.2                             | 68.5                             |
| 5       | 20                | 58.7                             | 62.3                             | 63.4                             | 71.5                             |
| 6       | 25                | 56.8                             | 58.9                             | 58.3                             | 63.5                             |
| 7       | 30                | 54.2                             | 55.3                             | 55.9                             | 59.1                             |
| 8       | 35                | 54.7                             | 56.0                             | 56.1                             | 60.2                             |
| 9       | 40                | 54.3                             | 55.8                             | 55.6                             | 59.9                             |
| 10      | 45                | 54.1                             | 55.4                             | 56.0                             | 59.8                             |
| 11      | 50                | 53.9                             | 55.4                             | 55.3                             | 60.1                             |
| 12      | 55                | 53.9                             | 55.6                             | 55.9                             | 60.0                             |
| 13      | 60                | 54.0                             | 55.6                             | 55.1                             | 60.1                             |
| 14      | 65                | 53.4                             | 55.0                             | 55.0                             | 59.3                             |
| 15      | 70                | 53.5                             | 55.0                             | 54.8                             | 58.9                             |
| 16      | 75                | 53.7                             | 55.5                             | 55.6                             | 59.9                             |
| 17      | 80                | 53.7                             | 55.3                             | 55.5                             | 59.7                             |
| 18      | 85                | 53.6                             | 55.1                             | 55.0                             | 59.2                             |
| 19      | 90                | 53.2                             | 55.1                             | 54.9                             | 59.4                             |
| 20      | 95                | 53.7                             | 55.5                             | 55.2                             | 59.6                             |
| 21      | 100               | 53.7                             | 55.3                             | 55.2                             | 59.7                             |
| 22      | 105               | 53.4                             | 55.2                             | 55.0                             | 59.4                             |
| 23      | 110               | 53.6                             | 55.3                             | 54.9                             | 59.6                             |
| 24      | 115               | 53.6                             | 55.2                             | 54.9                             | 59.2                             |
| 25      | 120               | 53.4                             | 55.1                             | 54.6                             | 58.9                             |
| 26      | 125               | 53.3                             | 55.0                             | 54.8                             | 59.0                             |
| 27      | 130               | 53.5                             | 55.5                             | 54.9                             | 59.6                             |
| 28      | 135               | 53.9                             | 55.5                             | 55.7                             | 59.8                             |
| 29      | 140               | 53.8                             | 55.6                             | 55.3                             | 59.9                             |
| 30      | 145               | 54.0                             | 55.7                             | 55.6                             | 60.2                             |
| 31      | 150               | 53.6                             | 55.5                             | 55.1                             | 59.4                             |



**Cuadro D.1 (Continuación).** Datos de temperatura para la comprobación térmica del EEMA en el volumen de trabajo definido en la Figura 2.10.

| Lectura | Tiempo,<br><i>t</i> /(min) | Temperatura A,<br><i>TA</i> / (°C) | Temperatura B,<br><i>TB</i> / (°C) | Temperatura C,<br><i>TC</i> / (°C) | Temperatura D,<br><i>TD</i> / (°C) |
|---------|----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 32      | 155                        | 53.5                               | 55.2                               | 55.1                               | 59.0                               |
| 33      | 160                        | 53.5                               | 54.9                               | 54.8                               | 58.9                               |
| 34      | 165                        | 53.3                               | 55.0                               | 55.3                               | 59.0                               |
| 35      | 170                        | 53.3                               | 54.9                               | 54.7                               | 58.8                               |
| 36      | 175                        | 53.4                               | 54.9                               | 54.9                               | 58.8                               |
| 37      | 180                        | 53.7                               | 55.4                               | 55.5                               | 59.6                               |
| 38      | 185                        | 53.9                               | 55.4                               | 54.8                               | 59.2                               |
| 39      | 190                        | 53.5                               | 55.1                               | 54.8                               | 58.8                               |
| 40      | 195                        | 53.8                               | 55.2                               | 54.8                               | 59.2                               |
| 41      | 200                        | 53.5                               | 55.3                               | 55.0                               | 59.4                               |
| 42      | 205                        | 53.9                               | 55.7                               | 55.4                               | 59.8                               |
| 43      | 210                        | 53.5                               | 55.1                               | 54.9                               | 59.0                               |
| 44      | 215                        | 54.1                               | 55.8                               | 56.1                               | 59.9                               |
| 45      | 220                        | 53.7                               | 55.3                               | 55.1                               | 59.7                               |
| 46      | 225                        | 53.9                               | 55.8                               | 55.3                               | 60.0                               |
| 47      | 230                        | 53.7                               | 55.3                               | 55.2                               | 59.7                               |
| 48      | 235                        | 53.6                               | 54.9                               | 54.8                               | 58.9                               |
| 49      | 240                        | 53.6                               | 55.6                               | 55.7                               | 59.2                               |
| 50      | 245                        | 53.6                               | 55.6                               | 55.4                               | 59.6                               |
| 51      | 250                        | 53.5                               | 55.6                               | 55.3                               | 59.2                               |
| 52      | 255                        | 53.4                               | 55.0                               | 54.8                               | 58.7                               |
| 53      | 260                        | 53.5                               | 55.0                               | 54.8                               | 58.9                               |
| 54      | 265                        | 53.6                               | 55.2                               | 54.8                               | 59.0                               |
| 55      | 270                        | 53.5                               | 55.0                               | 54.7                               | 59.0                               |
| 56      | 275                        | 53.5                               | 54.7                               | 54.8                               | 58.6                               |
| 57      | 280                        | 54.3                               | 55.8                               | 55.5                               | 59.8                               |
| 58      | 285                        | 54.2                               | 56.0                               | 56.1                               | 60.2                               |
| 59      | 290                        | 28.4                               | 34.3                               | 27.2                               | 31.7                               |
| 60      | 295                        | 26.9                               | 31.1                               | 24.0                               | 27.7                               |
| 61      | 300                        | 24.4                               | 28.0                               | 25.9                               | 26.3                               |
| 62      | 305                        | 23.4                               | 26.2                               | 22.6                               | 24.9                               |
| 63      | 310                        | 23.3                               | 25.7                               | 24.5                               | 25.5                               |
| 64      | 315                        | 22.7                               | 24.8                               | 23.8                               | 24.6                               |
| 65      | 320                        | 21.2                               | 20.9                               | 21.0                               | 21.0                               |

**Cuadro D.1 (Continuación).** Datos de temperatura para la comprobación térmica del EEMA en el volumen de trabajo definido en la Figura 2.10.

| <b>Lectura</b> | <b>Tiempo, <math>t/(min)</math></b> | <b>Temperatura A, <math>TA/ (^{\circ}C)</math></b> | <b>Temperatura B, <math>TB/ (^{\circ}C)</math></b> | <b>Temperatura C, <math>TC/ (^{\circ}C)</math></b> | <b>Temperatura D, <math>TD/ (^{\circ}C)</math></b> |
|----------------|-------------------------------------|--|--|--|--|
| 66             | 325                                 | 20.6   | 20.3   | 20.4   | 20.5   |
| 67             | 330                                 | 20.3   | 20.2   | 20.2   | 20.4   |
| 68             | 335                                 | 20.2   | 20.2   | 20.1   | 20.3   |
| 69             | 340                                 | 20.2   | 20.2   | 20.1   | 20.3   |
| 70             | 345                                 | 20.2   | 20.2   | 20.2   | 20.4   |
| 71             | 350                                 | 20.2   | 20.2   | 20.2   | 20.4   |
| 72             | 355                                 | 20.2   | 20.4   | 20.2   | 20.5   |
| 73             | 360                                 | 20.3   | 20.4   | 20.3   | 20.6   |
| 74             | 365                                 | 20.3   | 20.5   | 20.4   | 20.7   |
| 75             | 370                                 | 20.4   | 20.5   | 20.5   | 20.7   |
| 76             | 375                                 | 19.0   | 27.6   | 18.9   | 19.8   |

## Apéndice E: Resultados de simulación en LOGO! Soft Comfort

**Cuadro E.1.** Resultados booleanos de simulación en LOGO! Soft Comfort de las funciones lógicas implementadas en el programa de automatización del EEMA.

| Lazo de control                         | Sensor de temperatura, AI1 | Pulsador de puerta NO, I2 | SP alta Temperatura, SP_T_hot | SP baja Temperatura, SP_T cold | Q1 <sup>a</sup> | Q2 <sup>b</sup> | Q3 <sup>c</sup> | Q4 <sup>d</sup> |
|---|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Introdutorio De calor                   | 1                          | 1                         | 0                             | 0                              | 0               | 0               | 0               | 1               |
| Ciclo de Radiación                      | 1                          | 1                         | 1                             | 0                              | 1               | 0               | 0               | 1               |
| Introdutorio Frío                       | 1                          | 1                         | 0                             | 1                              | 0               | 0               | 1               | 0               |
| Ciclo de Precipitación                  | 1                          | 1                         | 0                             | 0                              | 0               | 0               | 1               | 0               |
| Compuertas abiertas (lazo de seguridad) | 1                          | ← 0 →                     | 0                             | 0                              | 0               | 0               | 0               | 0               |

<sup>a</sup> Bombillos UV (Q1)

<sup>b</sup> Bomba periférica (Q2)

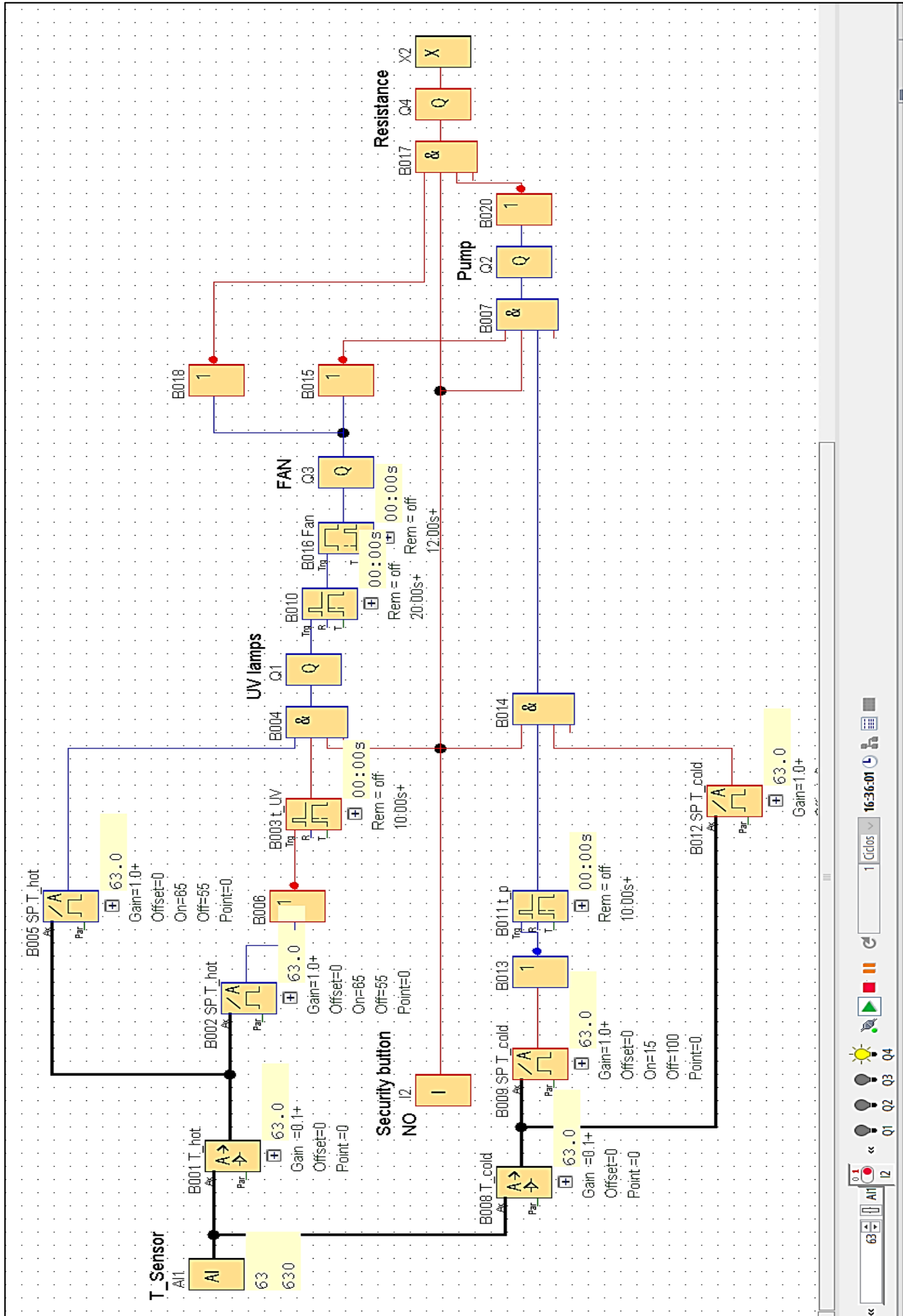
<sup>c</sup> Ventilador (Q3)

<sup>d</sup> Resistencia térmica (Q4)

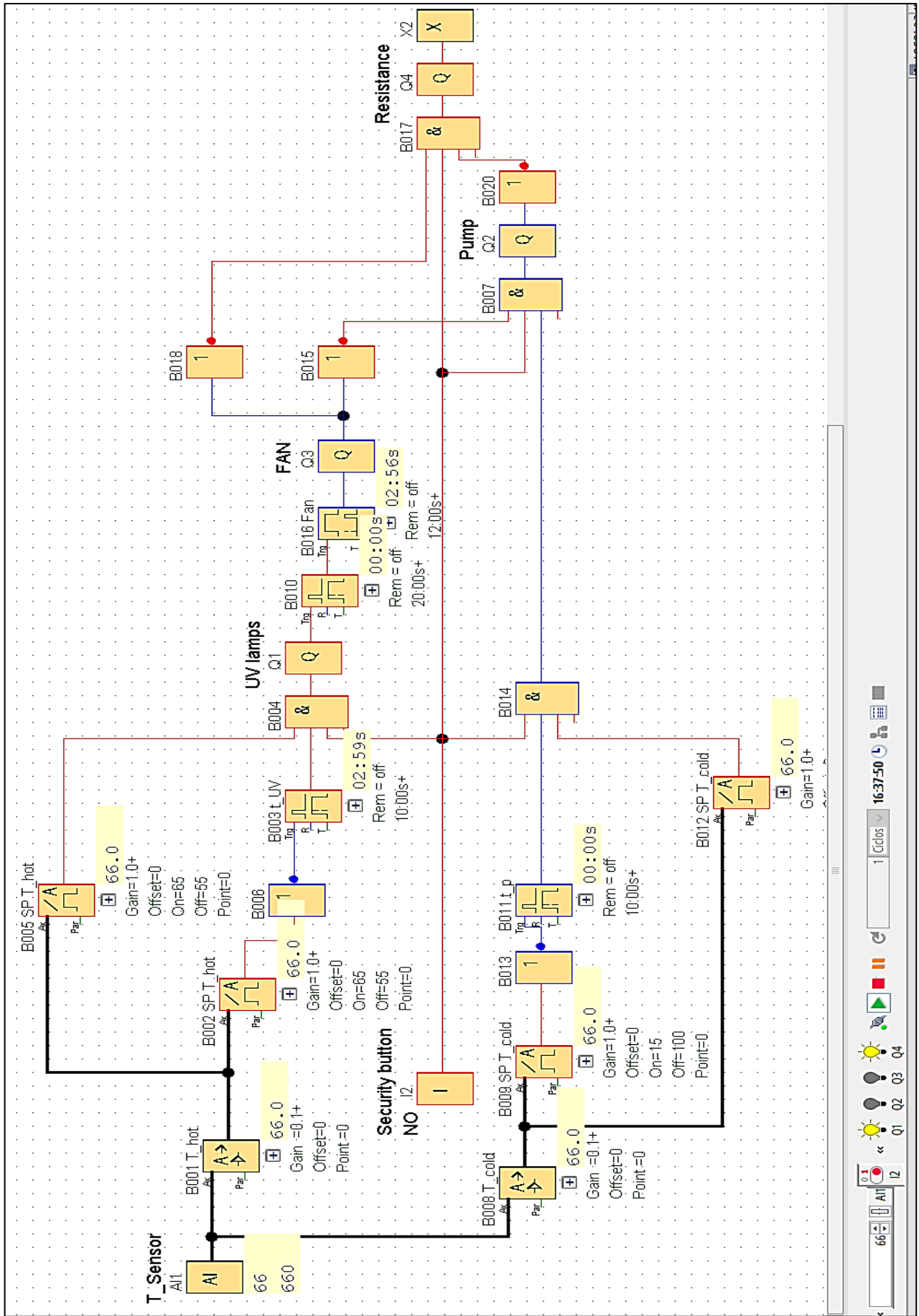
En las siguientes páginas se incorporan los resultados gráficos de simulación, pero los títulos de cada figura se adjuntan en el Cuadro E.2, debido al uso de cada página para la resolución del algoritmo.

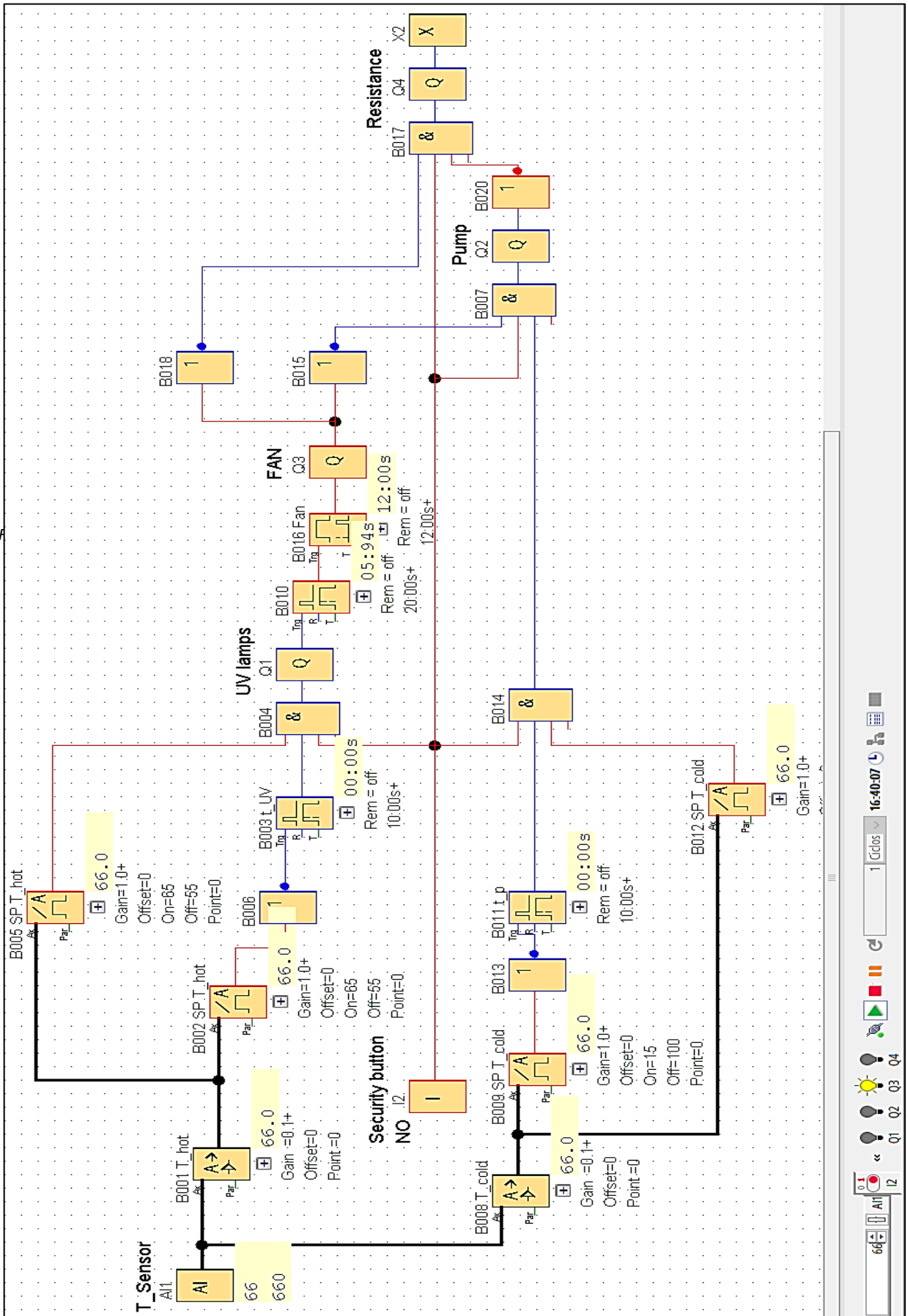
**Cuadro E.2.** Descripción de las figuras de la simulación del programa del EEMA.

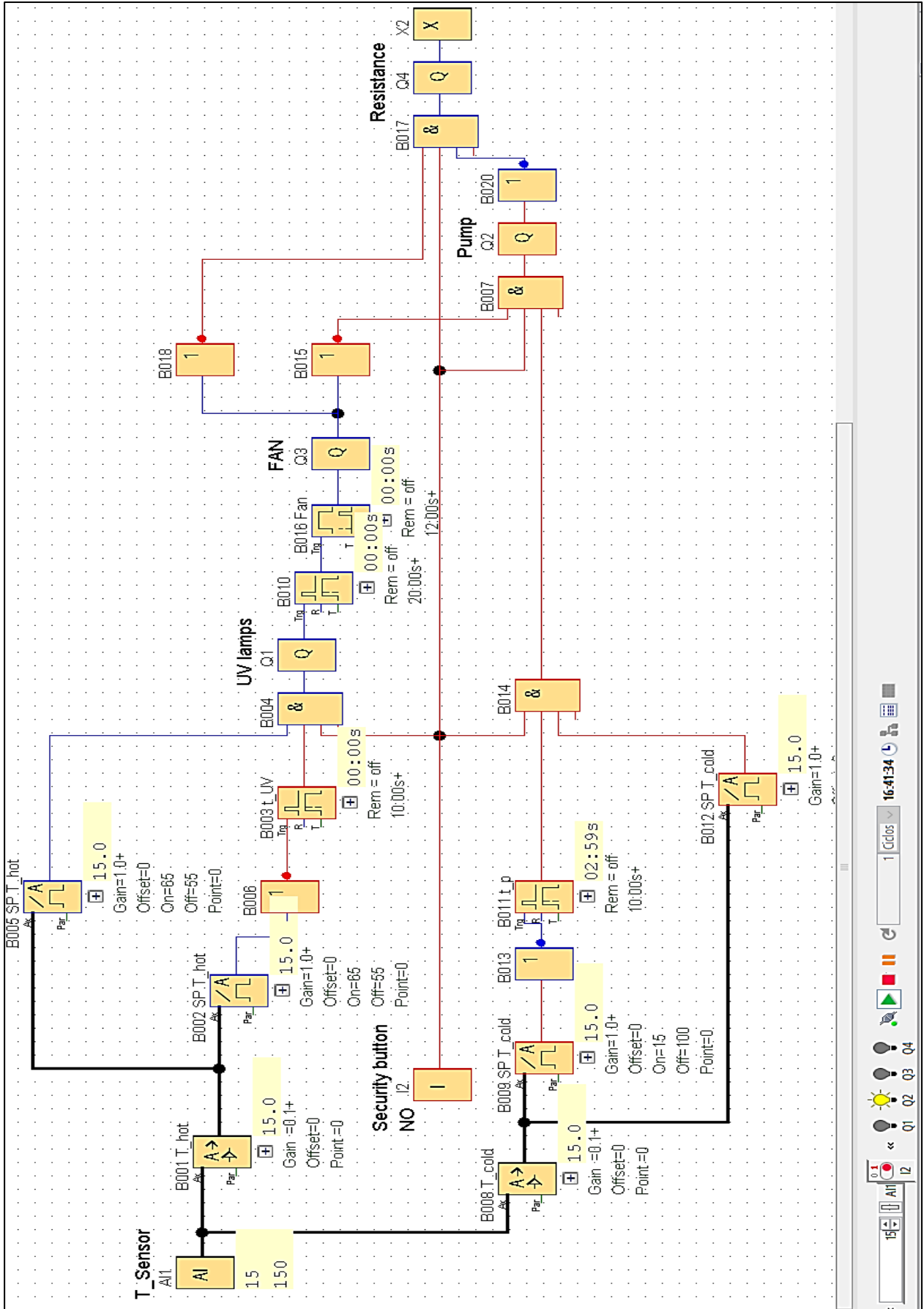
| Número de Figura | Descripción                                | Página |
|------------------|--|--------|
| E.1              | Simulación del lazo introductorio de calor | 170    |
| E.2              | Simulación del lazo de radiación           | 171    |
| E.3              | Simulación del lazo introductorio frío     | 172    |
| E.4              | Simulación del ciclo de precipitación      | 173    |
| E.5              | Simulación del lazo de seguridad           | 174    |

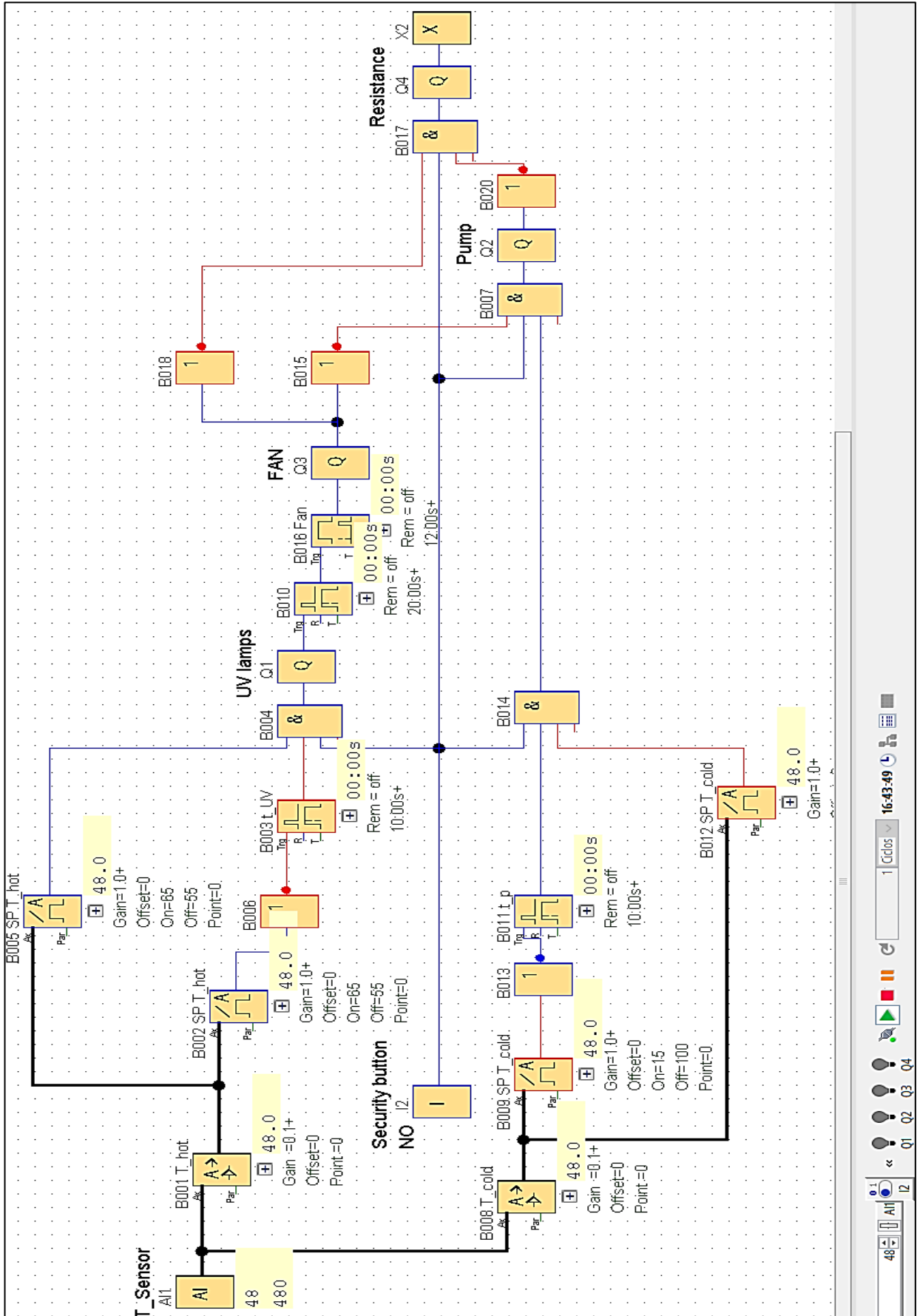


63 630 AI1 I2  
16:36:01 1 Cldos  
Q1 Q2 Q3 Q4  
16:36:01 1 Cldos













## CAPÍTULO 3

# El efecto de envejecimiento del EEMA sobre los asfaltos a partir de factores climáticos costarricenses

### 3.1. MARCO TEÓRICO

Para evaluar el efecto de envejecimiento acelerado del EEMA sobre muestras asfálticas se requiere del conocimiento sobre el estado original del espécimen, de indicadores físicos y químicos que brinden evidencia de envejecimiento, además de técnicas analíticas que permitan cuantificar o calificar dicha evidencia.

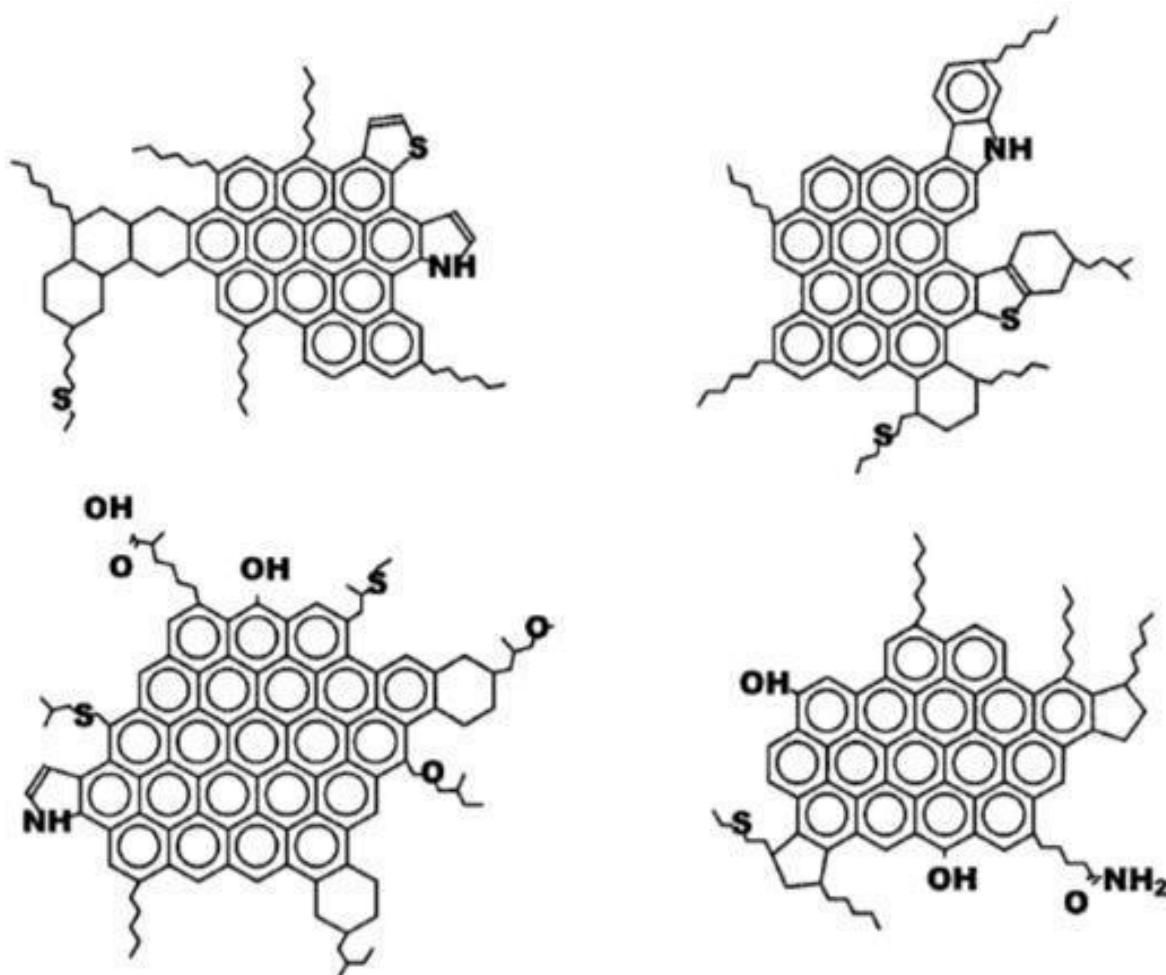
Por ello, en las secciones se abordan aspectos teóricos sobre el asfalto, indicadores de envejecimiento y algunas técnicas usuales en el estudio del envejecimiento de muestras asfálticas.

#### 3.1.1. Composición química del asfalto

El asfalto proviene de las fracciones más pesadas del petróleo. La composición química, las estructuras y los pesos moleculares del asfalto son muy variados, sin embargo, es posible agrupar los constituyentes en los siguientes grupos: 1) Saturados, 2) resinas, 3) aromáticos y 4) asfaltenos. Al conjunto de los grupos anteriores se les conoce como SARA (Delgado, 2006).

En los asfaltos, los componentes mayoritarios son los asfaltenos y las resinas, pues su mayor peso molecular e interacciones intermoleculares les confiere un punto de ebullición mayor a diferencia de los saturados y aromáticos simples, los cuales tienden a volatilizarse (Delgado, 2006).

Como se aprecia en la Figura 3.1, a nivel estructural, los asfaltenos se constituyen principalmente por un núcleo de anillos aromáticos (entre 4 y 20 anillos bencénicos) ligados con cadenas alquílicas y cicloalcanos, además se incluyen compuestos heterocíclicos con azufre, nitrógeno y oxígeno (Groenzin, & Mullins, 1999; Speight, 1984).



**Figura 3. 1.** Ejemplos de estructuras moleculares de asfaltenos.

Fuente: (Delgado, 2006)

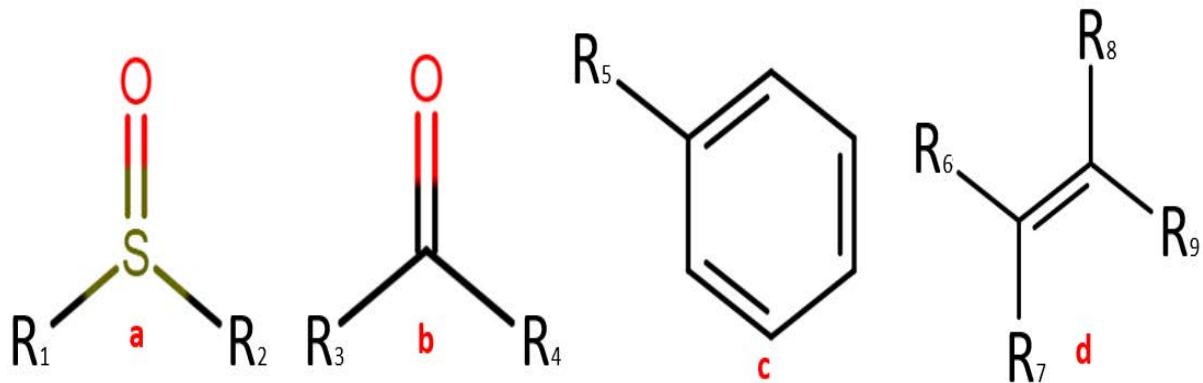
El concepto más aceptado para definir los asfaltenos consiste en aquellos compuestos que forman parte de la fracción pesada del crudo y que son solubles en tolueno o benceno e insolubles en un exceso de n-alcanos como el pentano o el heptano (Delgado, 2006).

Respecto a los heteroátomos presentes en los asfaltenos, estos se asocian en grupos funcionales como carboxilos, cetonas, aldehídos, benzotiofenos, dibenzotiofenos, naftenobenzotiofenos, sulfuros arílicos, sulfuros alquílicos y sulfuros alquil-arílicos (Delgado, 2006; Speight, 1984). Cabe destacar que, un aproximado del 40 % del carbono presente en los asfaltenos es aromático (es decir, de baja reactividad) y que el carbono total presenta una relación de 1:1.1 con el hidrógeno (Groenzin & Mullins, 1999).

### 3.1.2. Indicadores químicos de envejecimiento en asfaltos

El envejecimiento de los asfaltos produce un aumento de compuestos aromáticos, insaturados y moléculas con oxígeno, como los carbonilos en sus diversas clasificaciones, además de un incremento en los sulfóxidos y moléculas de polibutadieno (Shi *et al.*, 2019).

En la Figura 3.2 se observan los principales grupos funcionales que se forman como resultado de la reacción de envejecimiento en el asfalto.



**Figura 3. 2.** Grupos funcionales relacionados al envejecimiento de asfaltos: a) sulfóxidos; b) carbonilos; c) grupos aromáticos; d) grupos insaturados.

Fuente: (Villegas *et al.*, 2018)

Como consecuencia del incremento de los grupos funcionales que se observan en la Figura 3.2 con antelación se produce un aumento en la rigidez del asfalto debido a que dichos grupos funcionales cuentan con mayor concentración de enlaces dobles, que son más cortos y restringen el movimiento molecular. Además, los compuestos de la Figura 3.2 al incorporar heteroátomos electronegativos como el oxígeno, se propicia la formación de interacciones intermoleculares más intensas (Baldi *et al.*, 2017).

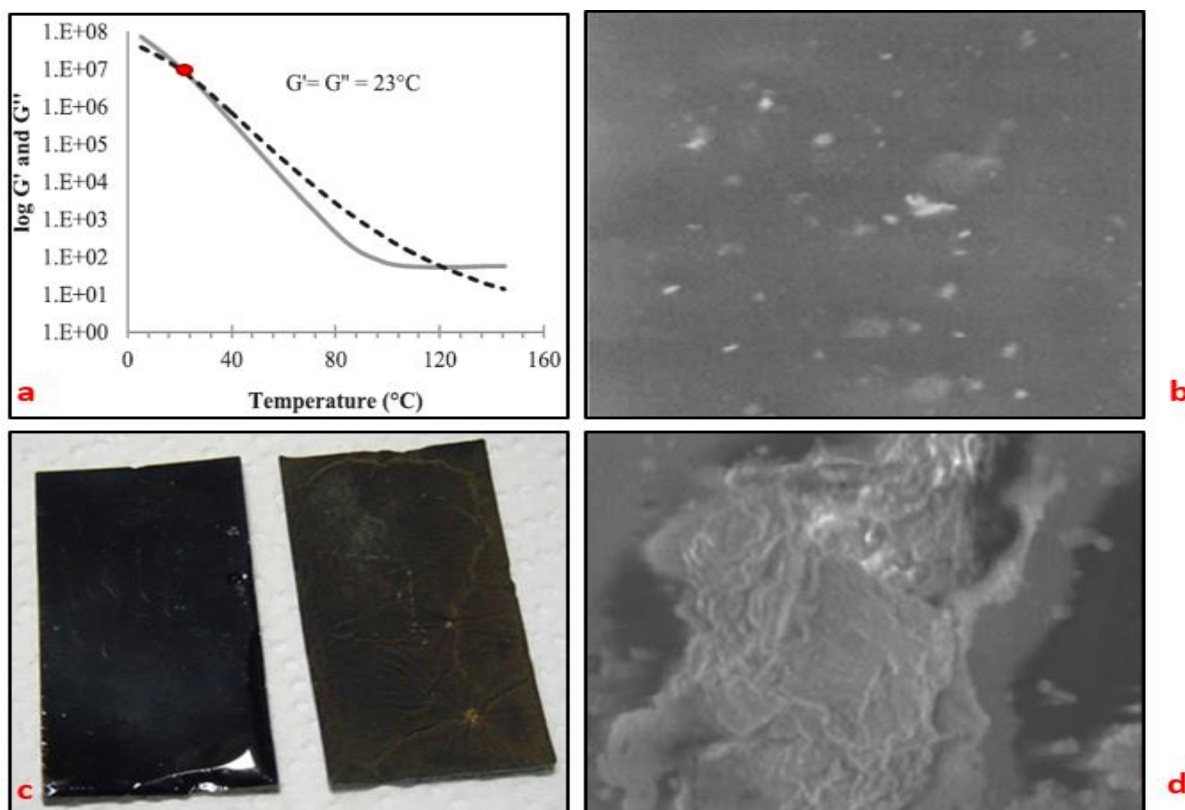
Con todo lo expuesto, los asfaltos envejecidos pierden sus propiedades flexibles que le permiten dispersar la carga sin quebrarse, por ello se considera que la presencia de grandes cantidades de los compuestos de la Figura 3.2 se relaciona con el envejecimiento de asfaltos (Villegas *et al.*, 2018).

### 3.1.3. Indicadores físicos de envejecimiento en asfaltos

Durante el envejecimiento de los asfaltos es posible evidenciar cambios físicos en las muestras tales como la pérdida de brillo superficial y el aumento de la rigidez (Vargas & Reyes, 2010).

Entre los indicadores físicos de envejecimiento de los asfaltos se destacan la temperatura de entrecruzamiento (que a partir de ahora se denotará como CXT), y evaluaciones cualitativas como el grado de opacidad, imágenes superficiales a microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés), entre otros indicadores (Verani et al., 2020; Mazumder *et al.*, 2018; Villegas *et al.*, 2018; Nciri *et al.*, 2017; Kathari, 2016).

En la Figura 3.3 se aprecian resultados experimentales de indicadores físicos como la CXT, imágenes SEM y el grado de opacidad.



**Figura 3. 3.** Resultados experimentales de indicadores físicos en asfaltos envejecidos: a) CXT de una muestra de asfalto envejecido a la intemperie; b) Imagen superficial SEM del asfalto original; c) Grado de opacidad; d) Imagen superficial SEM de un asfalto envejecido Fuente: (Mazumder *et al.*, 2018; Villegas *et al.*, 2018)

La CXT como un indicador de envejecimiento se interpreta como el valor de temperatura a partir del cual la componente viscosa predomina sobre la componente elástica en la reología del asfalto. Un valor de CXT inferior a 10 °C es usual para asfaltos no envejecidos (Villegas *et al.*, 2018).

La principal diferencia entre ambas componentes radica en que un mayor comportamiento elástico tiende a transformar la energía producida por el flujo vehicular o las cargas puntuales en fracturas de los pavimentos asfálticos. Por otro lado, un mayor comportamiento viscoso permite a los pavimentos asfálticos disipar la energía recibida sin sufrir daños o deformaciones permanentes (Villegas *et al.*, 2018).

En resumen, con base en la Figura 3.3 y lo expuesto anteriormente, son indicativos físicos de envejecimiento de muestras asfálticas las siguientes condiciones:

- Valores de CXT mayores a 10 °C.
- Opacidad de muestras.
- Patrones de fisuras, granos o bloques en imágenes SEM.

#### **3.1.4. Técnicas para el estudio del envejecimiento de los asfaltos**

Para evaluar los indicadores expuestos en las secciones 3.1.2 y 3.1.3 para el envejecimiento de los asfaltos, existen técnicas y equipos cuantitativos como la Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FT-IR, por sus siglas en inglés), el reómetro de corte dinámico (DSR, por sus siglas en inglés), la Espectroscopía de Rayos X de Energía Dispersiva (EDX, del inglés) y la Espectroscopía de Radiación Magnética Nuclear para Carbono 13 (RMN-C<sup>13</sup>) y para Hidrógeno (RMN-H) (Verani *et al.*, 2020; Mazumder *et al.*, 2018; Villegas *et al.*, 2018; Atencia, 2011).

Además, existen técnicas cualitativas como la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, del inglés) y la evaluación visual del grado de opacidad (Villegas *et al.*, 2018). A continuación se detallan las técnicas cuantitativas y cualitativas que se mencionaron anteriormente.

##### **a. FT-IR**

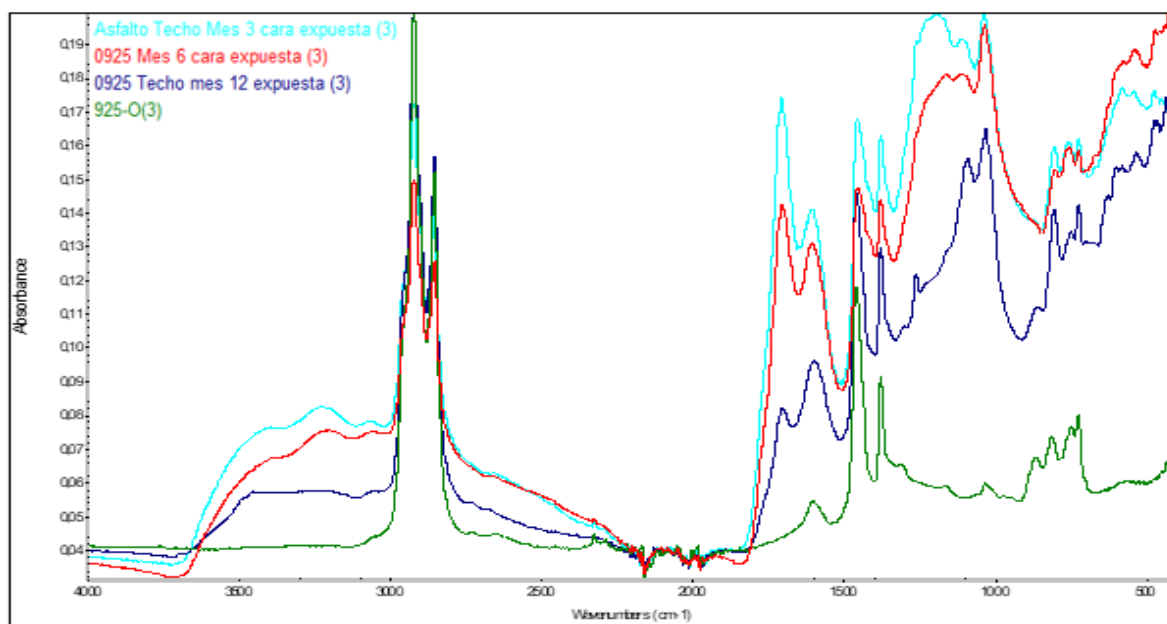
La espectroscopía infrarroja se fundamenta en las vibraciones de estiramiento y flexión que presentan los enlaces químicos. La frecuencia de estas vibraciones ocurre dentro de las frecuencias de la radiación infrarroja (Bruice, 2008).

Con base en lo expuesto, al irradiar sustancias con radiación infrarroja de un espectrofotómetro, se genera un efecto de amplitud de la señal en las longitudes de onda del

espectro que coinciden con las que presentan determinados enlaces químicos de grupos funcionales. La intensidad de dicha amplitud se grafica como absorbancia o transmitancia, lo que permite obtener un espectro característico de un compuesto análogo a la huella dactilar de un individuo (Shriner *et al.*, 2004).

Esta técnica permite evaluar los grupos funcionales del asfalto, lo cual es de utilidad ya que, como se mencionó en la sección 3.1.2, la presencia de grupos como carbonilos, sulfóxidos, aromáticos e insaturaciones se relaciona con el envejecimiento en asfaltos.

En la Figura 3.4 se observa la forma característica de espectros infrarrojos de muestras asfálticas: el espectro 925-O(3), corresponde a la muestra original sin envejecimiento y los espectros de tres, seis y doce meses corresponden a la muestra de asfalto envejecida a la intemperie durante dichos meses (Villegas *et al.*, 2018).



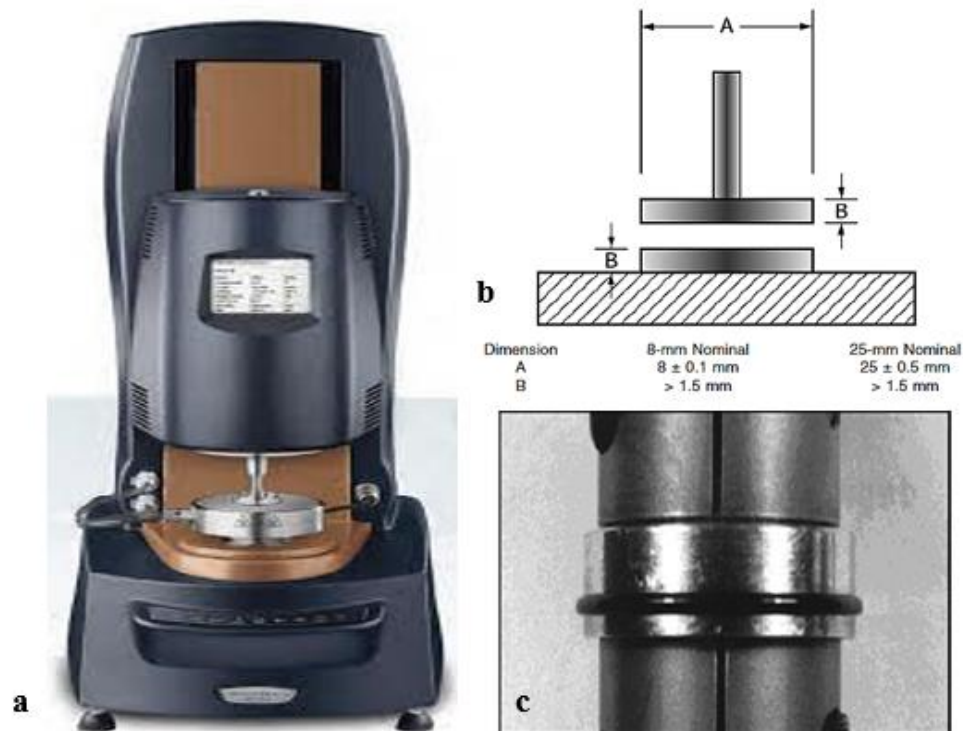
**Figura 3. 4.** Espectros infrarrojos del asfalto 925 original y envejecido a la intemperie a tres, seis y doce meses.

Fuente: (Villegas *et al.*, 2018)

### b. DSR

El DSR es un equipo que permite estudiar la reología de muestras asfálticas mediante la aplicación de esfuerzos cortantes repetitivos bajo condiciones de temperatura y cargas usuales para pavimentos asfálticos en servicio (Villegas, 2020).

Las propiedades reológicas se determinan mediante la relación entre las fuerzas cortantes oscilantes aplicadas a una muestra de asfalto colocada entre dos platos paralelos, como se aprecia en la Figura 3.5.c, y la deformación. De dicha relación se mide el módulo complejo y el ángulo de fase (LanammeUCR, 2019).



**Figura 3. 5.** Reómetro de corte dinámico: a) Vista general del equipo; b) Diagrama de los platos paralelos; c) Ejemplo de colocación de una muestra asfáltica.  
Fuente: (ASTM, 2015; LanammeUCR, 2019)

Según la norma ASTM D7175 (2015), entre los parámetros configurables para los ensayos en el DSR se encuentran el barrido o rango de temperaturas, la velocidad de calentamiento, la frecuencia, el porcentaje de deformación y la geometría de los platos.

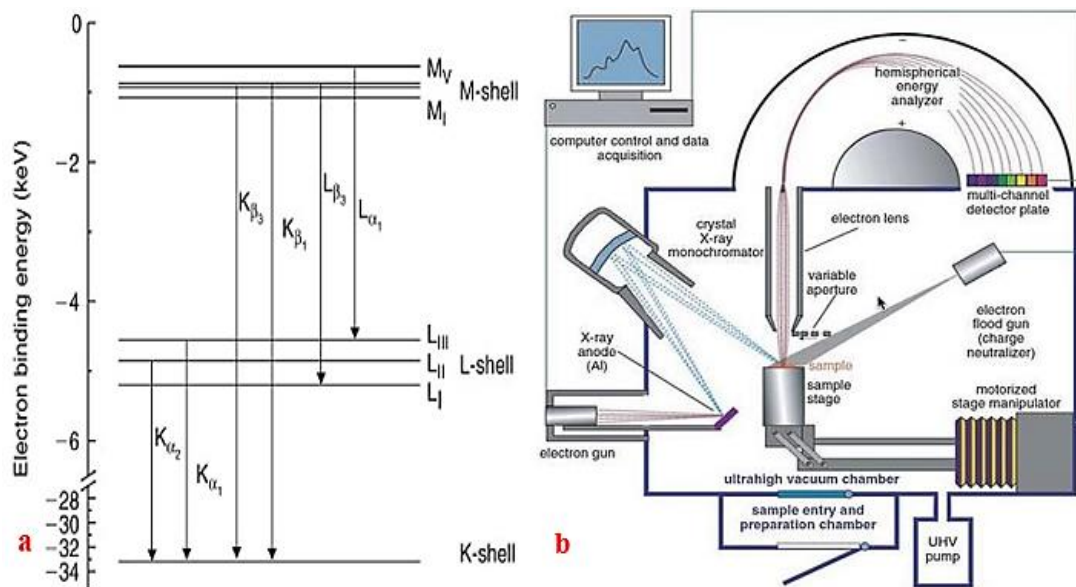
### c. EDX y SEM

La EDX es una técnica analítica que permite la caracterización química-elemental de los materiales. Se fundamenta en irradiar una muestra con un rayo de electrones, como resultado, parte de la energía es absorbida por los átomos de la muestra, lo cual produce un estado de excitación electrónica, en consecuencia, los electrones más energéticos saltan a un orbital de mayor energía (ThermoFisher, 2022).



Seguidamente, los saltos a orbitales más energéticos en la nube electrónica continúan hasta que un electrón sale de la nube como efecto de la disipación de la energía. Respecto a los orbitales vacíos que resultan de los saltos energéticos, son llenados por electrones más internos que alcanzan excitación energética, con lo que se produce una diferencia de potencial que se libera como rayos X (ThermoFisher, 2022).

Los rayos X producidos por la diferencia de potencial son recolectados por un detector de rayos X que envía la información al procesador del equipo con la cual se grafica una función del conteo de electrones por segundo contra la energía captada. De ello se obtiene un espectro característico para cada elemento (ThermoFisher, 2022). En la Figura 3.6 se aprecia de forma gráfica el proceso de cuantificación de una EDX.



**Figura 3. 6.** Proceso de la espectroscopía de energía dispersiva de rayos X: a) Detalle de los saltos de electrones excitados a orbitales energéticos; b) Esquema de procesamiento de la señal de los rayos X para la graficación del espectro elemental.

Fuente: (Mogk, 2022; Potts, 2005)

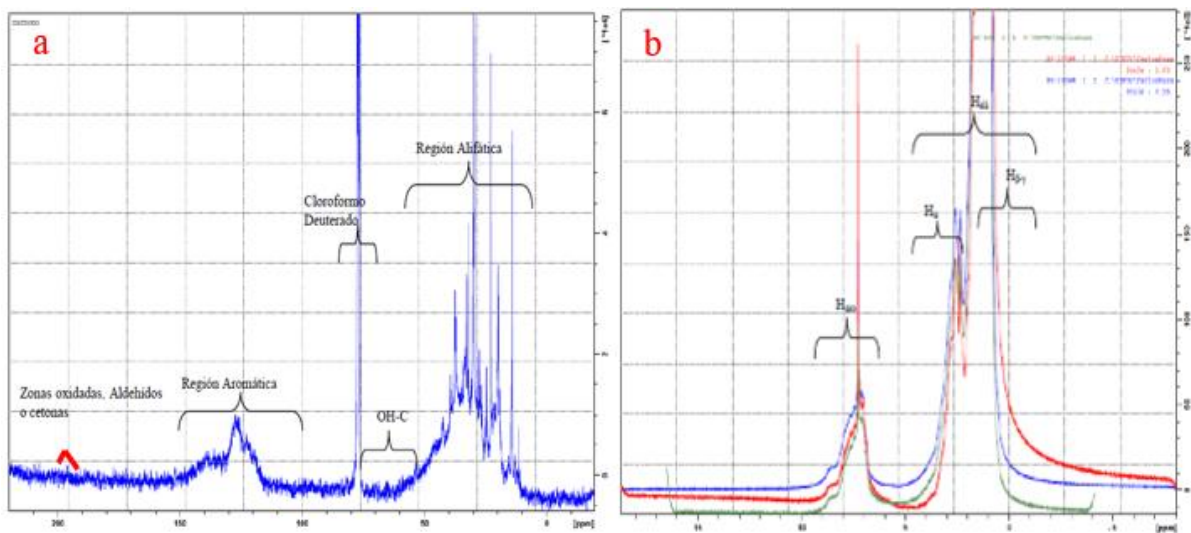
Por otro lado, las imágenes de la superficie de un material empleando SEM se obtienen mediante el mismo fenómeno descrito para la EDX, solo que la imagen se conforma de la información proveniente de electrones retro-dispersados, secundarios y la energía dispersiva de los rayos X. Además, se requiere que la muestra sea conductora de corriente, lo cual puede ajustarse en muestras aislantes al recubrir con oro (ICMM, 2010).

#### d. RMN-C<sup>13</sup> y RMN-H

En este tipo de espectroscopía se aplica un campo magnético el cual contribuye a la alineación favorable (estado espín  $\alpha$ ) o contraria (estado espín  $\beta$ ) de los momentos magnéticos nucleares en una molécula (Bruice, 2008).

De este modo se establece una relación entre el diferencial de energía entre ambos espines y el campo magnético aplicado, a su vez dicho diferencial energético se ve ligado a la estructura molecular del compuesto en estudio, por lo que mediante esta técnica se pueden identificar las estructuras de carbonos e hidrógenos en un compuesto orgánico (Bruice, 2008).

En la Figura 3.7 se aprecian dos espectros RMN de muestras de asfalto. La importancia de esta técnica en el estudio del envejecimiento del asfalto es que brinda un espectro detallado a nivel estructural sobre los arreglos de los átomos de carbono e hidrógeno en los compuestos SARA que conforman el asfalto, lo que permite analizar cambios estructurales y su relación con los cambios en las propiedades físicas.



**Figura 3. 7.** Espectros RMN de una muestra de asfalto sometida a diferentes tiempos de inmersión en agua como tratamiento oxidativo acelerado: a) RMN-C; b) RMN-H.  
Fuente: (Atencia, 2011)



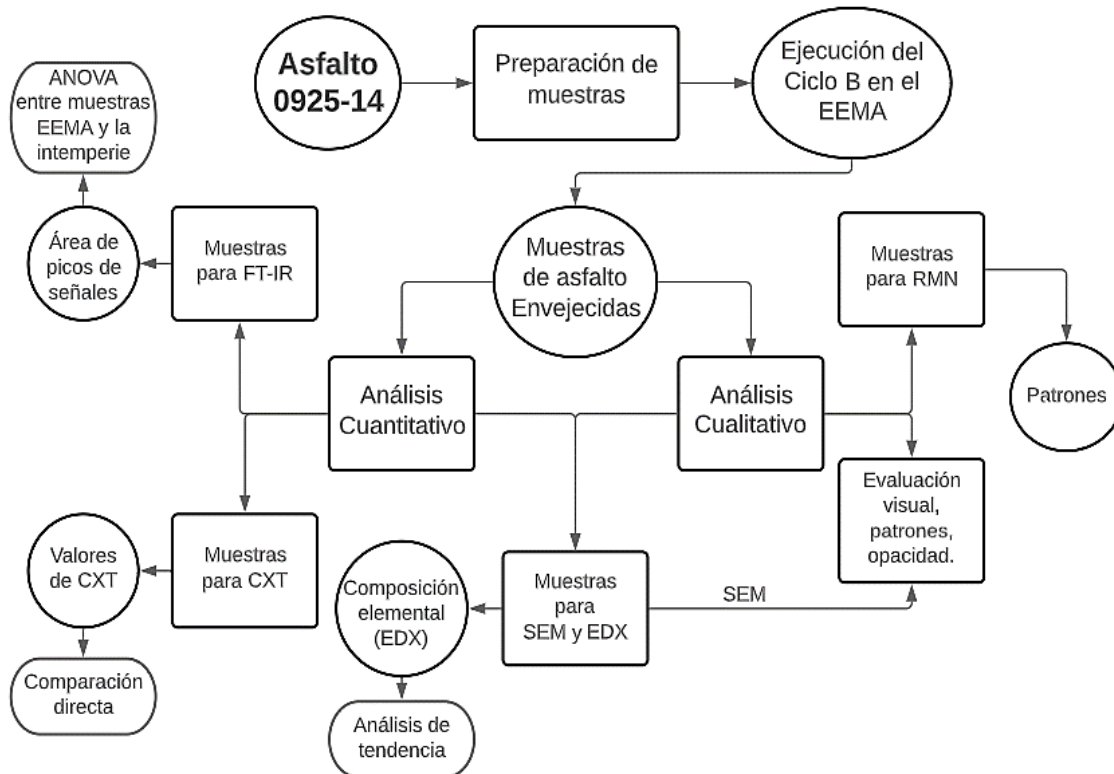
## 3.2. METODOLOGÍA

Como objetivo final del proyecto de investigación presente se requiere determinar el efecto de envejecimiento del EEMA sobre muestras asfálticas. Para ello, se propone la metodología que se describe a continuación.

### 3.2.1. Rutas experimentales para evaluar el desempeño del EEMA

Para evaluar los alcances del EEMA en el envejecimiento de muestras asfálticas se propone emplear las condiciones de ensayo del Ciclo B del Cuadro 2.10. Adicionalmente se seleccionó el asfalto 0925-14, como espécimen para las muestras de ensayo, ya que el LanammeUCR cuenta con datos de espectros infrarrojos y valores de CXT de este tipo de asfalto envejecido a la intemperie.

En la Figura 3.8 se detallan las rutas experimentales para la evaluación del envejecimiento de muestras de asfalto 0925-14 en el EEMA.



**Figura 3. 8.** Esquema de análisis para los datos experimentales de muestras envejecidas en el EEMA.

En los apartados siguientes se detallan cada una de las rutas experimentales y su objetivo en el estudio del desempeño del EEMA como un equipo para simular los factores de la intemperie en ensayos de envejecimiento.

### 3.2.2. Características del asfalto 0925-14

De forma preliminar al desarrollo experimental en el EEMA se obtuvieron las propiedades físicas del asfalto 0925-14 mediante lo reportado en el informe técnico: “*Estudio del proceso físico- de la oxidación y su incidencia en el daño por humedad de asfaltos*” de la Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP) del LanammeUCR (2017). En el Cuadro 3.1, se presentan las propiedades físicas del asfalto 0925-14 y el método de ensayo empleado por el laboratorio.

**Cuadro 3. 1.** Propiedades físicas del asfalto 0925-14.

| Propiedad                   | Método de ensayo |        | Valor         | Unidades           |
|-----------------------------|------------------|--------|---------------|--------------------|
|                             | AASHTO           | ASTM   |               |                    |
| Densidad (25 °C)            | T 228            | D 70   | 1.027 ± 0.001 | g/ cm <sup>3</sup> |
| Gravedad específica         | T 228            | D 70   | 1.030 ± 0.001 | N/A                |
| Punto de inflamación        | T 48             | D 92   | 337 ± 11      | °C                 |
| Viscosidad absoluta (60 °C) | T 202            | D 2171 | 3359 ± 71     | P                  |

### 3.2.3. Preparación de muestras

Para la preparación de muestras asfálticas para ensayar en el EEMA se requiere de los siguientes materiales, instrumentos, valores y cristalería:

- Un volumen de un galón de asfalto 0925-14. Se requiere menos por ensayo, pero se asegura un sobre estimado preventivo.
- Seis portamuestras del EEMA.
- Un Beaker, para facilitar el vertido en los portamuestras.
- Un agitador de vidrio
- Guantes térmicos.
- Una estufa a 135 °C como mínimo.
- Una balanza granataria.
- La densidad del asfalto 0925-14.
- Un espesor objetivo para las muestras.

Primeramente, es necesario determinar un espesor objetivo para el llenado de los portamuestras. Luego, mediante la Ecuación 3.1 (ver también la página 13 del Manual del EEMA en los anexos del Capítulo 2), la densidad del asfalto 0925-14 y las dimensiones de los portamuestras, se calcula la cantidad de masa requerida para lograr el espesor definido.

$$M_{req} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot E \cdot \rho_{asfalto}}{4} \quad (3.1)$$

Donde,

$M_{req}$ : Masa requerida para el espesor objetivo, g.

D: Diámetro del portamuestras, cm.

E: Espesor objetivo, cm.

$\rho_{asfalto}$ : Densidad del asfalto, g/ cm<sup>3</sup>.

Con base en un espesor objetivo de 1 cm, un diámetro de portamuestras de 11.6 cm y la densidad del asfalto 0925-14 del Cuadro 3.1, se obtiene que la masa requerida por muestra de ensayo en el EEMA es de 108.5 g ± 0.1 g.

Por otro lado, para manipular el asfalto se requiere llevarlo a fluidez sin perjudicar sus propiedades químicas o físicas de forma permanente. Esto se logra al calentar el asfalto en una estufa a 135 °C hasta que sea fácil de agitar (ASTM, 2019c).

En paralelo al proceso de precalentamiento del asfalto, se requiere que el Beaker para verter en los portamuestras del EEMA se encuentre en la estufa, para evitar la pérdida de fluidez al verter el asfalto en un Beaker frío.

Seguidamente, se colocan y taran los portamuestras sobre una balanza granataria y se vierte en ellos el asfalto caliente con la precaución de obtener la masa requerida para el espesor objetivo. Una vez alcanzada la masa requerida, se golpean los portamuestras contra una superficie plana para eliminar burbujas ocluidas y, por último se dejan enfriar a temperatura ambiente.

En la Figura 3.9, se aprecian el asfalto 0925-14 original, parte de los materiales en la preparación de las muestras y los especímenes colocados en los portamuestras.



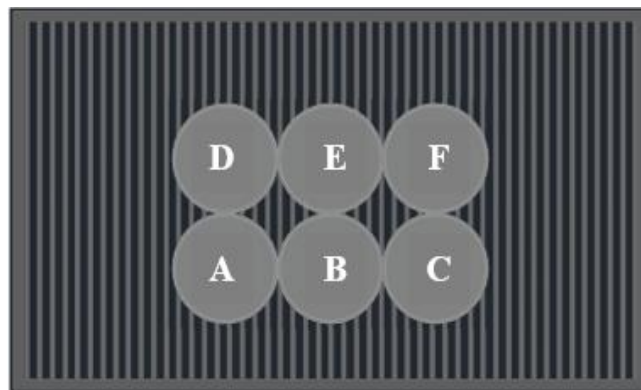
**Figura 3. 9.** Proceso de preparación de muestras: a) Muestra original; b) Pesaje de muestra vertida; c) Muestras para ensayar.

### 3.2.4. Ejecución del Ciclo B del EEMA

Se ejecutarán ensayos manuales cronometrados a los tiempos establecidos en el Cuadro 2.10 para el ciclo B siguiendo el procedimiento descrito en las Figuras de la Y.11 a la Y.19 de los anexos del Capítulo 2.

En la Figura 3.10 se presenta la distribución de las muestras asfálticas para el ciclo B en el EEMA. Por otro lado, se consideró la división del ciclo B para simular tres tiempos de ensayo y aplicar cada uno a un par de muestras mediante la siguiente distribución:

- Muestras A y D: 4 subciclos de radiación y precipitaciones para escalar tres meses a la intemperie.
- Muestras B y E: 8 subciclos de radiación y precipitaciones para escalar seis meses a la intemperie.
- Muestras C y F: 15 subciclos de radiación y precipitaciones para escalar un año a la intemperie.



**Figura 3. 10.** Distribución y rotulación de muestras asfálticas para el ensayo de envejecimiento en el EEMA

Posteriormente, las muestras envejecidas se analizarán mediante una ruta cuantitativa y otra cualitativa, como se describe en las secciones siguientes. En la Figura 3.11 se observan las muestras durante el ensayo en el EEMA.



**Figura 3. 11.** Muestras asfálticas en proceso de envejecimiento en el EEMA: a) Muestras C y F durante el subciclo de radiación, y b) Muestras B, C, E y F durante el subciclo de precipitación.

### 3.2.5. Análisis cuantitativo de muestras envejecidas

Para la ruta de análisis cuantitativo se platearon los ensayos de EDX, FT-IR y CXT. El orden expuesto para los ensayos va del menor al mayor requerimiento de muestra, esto con el fin de garantizar suficiente muestra envejecida para todos los estudios planteados.

En los apartados siguientes se detallan los tratamientos de datos planeados para las técnicas mencionadas en el párrafo anterior con el fin de establecer los alcances del EEMA en el envejecimiento de muestras asfálticas.

### 3.2.6. Medición y tratamiento de datos EDX

Los ensayos de EDX se llevarán a cabo en el Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas (CIEMIC) por personal calificado en el microscopio electrónico. Para la preparación de muestras EDX se emplea una espátula de metal para raspar una muestra de asfalto envejecido, luego se coloca sobre una cinta para muestras que está adherida al



portamuestras del microscopio electrónico. En la Figura 3.12, se aprecia el microscopio electrónico para la medición de las muestras para EDX.



**Figura 3. 12.** Microscopio electrónico del CIEMIC.

Fuente: (Guerrero, 2013)

Seguidamente, para los análisis EDX se correrán las muestras sin recubrimiento alguno, sin embargo, para muestras SEM se aplicará un recubrimiento de oro para mejorar la resolución de las imágenes (esto se detalla más adelante). En la Figura 3.13, se observan las muestras preparadas para los análisis EDX y SEM.



**Figura 3. 13.** Muestras preparadas para los análisis EDX y SEM.

El uso de la técnica EDX es reciente en el LanammeUCR, por lo que no se poseen datos de este tipo para muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a la intemperie para comparar contra los resultados del EEMA.

Debido a ello, las mediciones se centrarán en determinar la composición másica de los elementos superficiales de las muestras asfálticas de cada tiempo de ensayo en el EEMA por triplicado.

### **3.2.7. Medición de espectros FT-IR**

Los ensayos de FT-IR se llevarán a cabo en el LanammeUCR. Para realizar las mediciones en el espectroscopio infrarrojo se deben realizar tres fases a saber: una de preparación del equipo y el software, otra de toma de la muestra y obtención del espectro y, por último, una de limpieza para continuar ensayos o terminar el uso del espectroscopio.

#### **a. Fase de preparación del espectroscopio infrarrojo**

Primero, se accede al software *OMNIC 9* de Thermo Fisher Scientific Inc. Con ello el espectroscopio infrarrojo se enciende, seguido de ello, se selecciona el modo con transformada de Fourier. Por otro lado, se quita la espuma de protección del cristal del espectroscopio y se procura el contacto suave entre el cristal y la prensa de muestras con el fin de recolectar el espectro del aire.

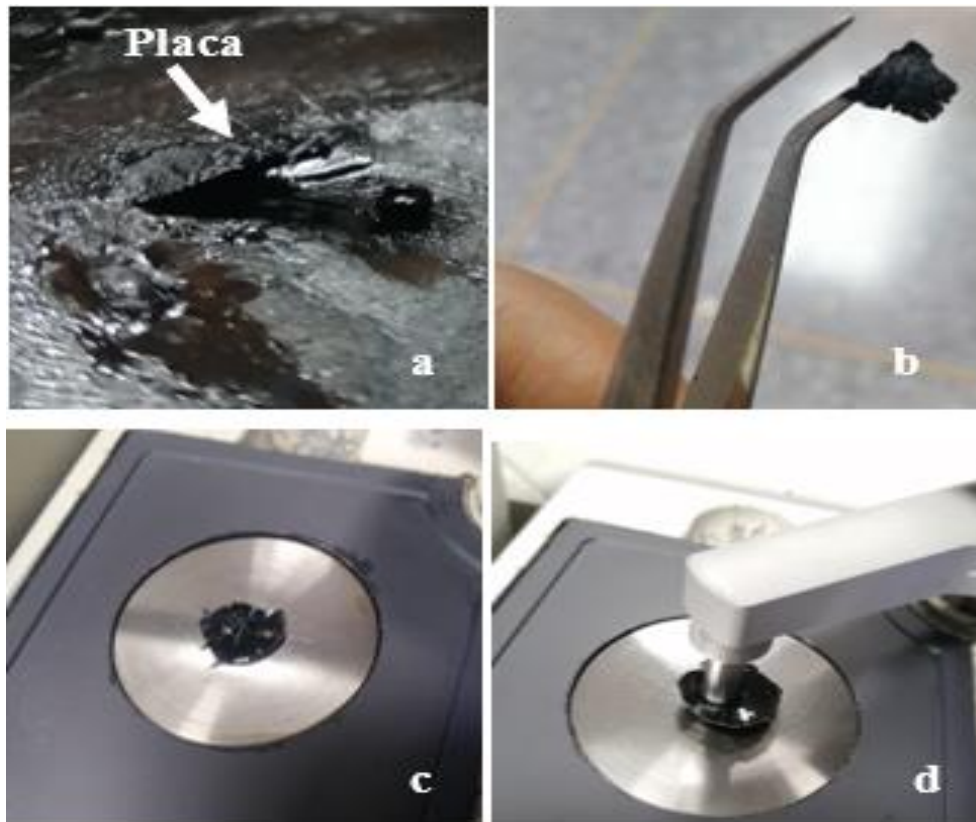
Cabe destacar que si el espectro del aire presenta una señal intensa entre los  $2300\text{ cm}^{-1}$  y los  $2500\text{ cm}^{-1}$ , que corresponde al dióxido de carbono (Shriner *et al.*, 2004) o si es el primer ensayo por realizar con el espectroscopio infrarrojo luego de una semana de reposo, se debe purgar el equipo dejando pasar un flujo de nitrógeno durante cinco minutos.

#### **b. Fase de muestreo y medición en el espectroscopio infrarrojo**

Para la preparación de muestras se emplea un cúter, etanol al 70 %, pinzas, toallas de papel, un par de Beakers de 50 mL y líquido naranja para disolver asfalto. Primero, se llena un Beaker a la mitad con etanol y se sumerge la hoja del cúter en el etanol y, de forma inmediata, realiza un corte circular y de media profundidad (5 mm aproximadamente) al asfalto envejecido del portamuestras, con la precaución de no mojar con etanol la superficie envejecida.

El etanol previene que el asfalto se adhiera al cúter. Seguidamente, se sumergen las pinzas en etanol e inmediatamente, se levanta la placa de asfalto envejecido, se coloca la cara envejecida

de la muestra sobre el cristal y se prensa hasta que al girar la tuerca de la punta de prensado suene un ruido de “clic”. En la Figura 3.14 se detalla parte del proceso de muestreo.



**Figura 3. 14.** Proceso de muestreo: a) Corte de placa de muestra; b) Extracción de la muestra; c) Centrado de la muestra en el cristal; d) Prensado de la muestra para análisis.

Seguidamente, para la medición del FT-IR, en la interfaz de *OMINC 9* se presiona el comando “*Col Smp*” y se espera hasta el equipo complete la lectura de la muestra. Luego, se evalúa que el espectro no tenga exceso de ruido, es decir, que las líneas no sean excesivamente dentadas, con el fin de aceptar la medición.

Finalmente, se plantean realizar siete mediciones repartidas entre los dos especímenes de un tiempo de envejecimiento dado (incluyendo el asfalto original). En el Cuadro 3.2 se aprecia la distribución de repeticiones entre las parejas de muestras para un tiempo dado en orden aleatorio de medición para satisfacer el principio de independencia, ya que, como se explicará más adelante, se propone un diseño de experimentos tipo ANOVA para comparar equivalencias estadísticas.

**Cuadro 3. 2.** Orden de mediciones de los espectros FT-IR para las muestras asfálticas tipo 0925-14 envejecidas en el EEMA.

| Original | Tres meses | Seis meses | Doce meses |
|----------|------------|------------|------------|
| O        | A          | E          | C          |
| O        | A          | E          | C          |
| O        | D          | B          | C          |
| O        | D          | B          | F          |
| O        | A          | E          | F          |
| O        | A          | E          | F          |
| O        | D          | B          | F          |

### c. Fase de limpieza del espectroscopio infrarrojo

Para la limpieza de la muestra asfáltica primero se remueve la mayor cantidad posible de muestra empleando papel toalla. Seguidamente, se aplica líquido naranja sobre el plato donde está el cristal y se deja reposar.

Por otro lado, se vierte líquido naranja en un Beaker de 50 mL hasta la mitad de su capacidad y se introduce la punta de la prensa del espectroscopio infrarrojo. Mientras tanto, se limpia el líquido naranja del plato donde está el cristal, si quedan restos de asfalto, se repite el proceso de limpieza.

Una vez que mediante la acción del líquido naranja y las toallas de papel se remueva todo el asfalto, se realizan tres lavados con etanol y tres secados con toallas simultáneamente, con el fin de evitar que queden restos de líquido naranja que puedan alterar la medición de los espectros de otras muestras. Por último, se deja reposar por un minuto la punta de la prensa y el plato con el cristal del espectroscopio infrarrojo; con esto se promueve la evaporación de trazas de etanol remanentes.

### 3.2.8. Medición y tratamiento de datos FT-IR

Con base en los espectros obtenidos según la distribución del Cuadro 3.2 y mediante la herramienta “*Peak area tool*” del programa *OMNIC 9*, se establece la medición de áreas de pico mayores a 0.01 para las señales propuestas en el Cuadro 3.3. La correspondencia de las señales se tomó de lo expuesto por Shriner *et al.* (2004) y Bruice (2008).

**Cuadro 3. 3.** Longitudes de onda de interés en el estudio de muestras asfálticas envejecidas.

| Longitud de Onda,<br>$\lambda$ ( $cm^{-1}$ ) | Grupo Funcional   |
|--|---|
| 3650 – 3200                                  | <b>O – H: Alcoholes y Fenoles</b>   |
| 3100 – 3020                                  | <b>C = C – H: Alcanos y alquenos (estiramiento)</b>   |
| 2960 – 2850                                  | <b>C – C – H</b>  |
| 2820 y 2720                                  | <b>R-COH: Aldehídos</b>   |
| 1780 – 1650                                  | <b>C = O: Carbonilos</b>  |
| 1680 – 1550                                  | <b>C = C / C = N / -Anillo<sub>benceno</sub> / N – O / Heteroaromáticos</b>                     |
| 1500 – 1420                                  | <b>-Anillo<sub>benceno</sub> / -CH<sub>3</sub> / -CH<sub>2</sub>- / -CH- / Heteroaromáticos</b> |
| 1385 – 1360                                  | <b>Heteroaromáticos / Sulfatos orgánicos</b>  |
| 1350 – 1170                                  | <b>S = O: Sulfóxidos (sulfonas)</b>   |
| 1050   | <b>S = O: Sulfóxidos</b>  |
| 990 – 910                                    | <b>Si – H / P – OH: Hidruro de silicio y ácidos fosfóricos</b>                                  |
| 890 – 800                                    | <b>N = O: Nitritos y nitratos (estiramiento)</b>  |
| 730 – 675                                    | <b>N = O: Nitritos y nitratos (flexión)</b>   |

Seguidamente, con las mediciones de las áreas de picos se calculan los índices de carbonilo, hidroxilo, insaturaciones y sulfóxidos de las muestras asfálticas del Cuadro 3.2, según las Ecuaciones 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 que se muestran a continuación (Rojas, 2020).

$$I_{C=O} = \frac{A_{1780-1650}}{A_{total}} \quad (3.2)$$

$$I_{OH} = \frac{A_{3650-3200}}{A_{total}} \quad (3.3)$$

$$I_{Insat} = \frac{A_{1680-1550} + A_{1500-1420}}{A_{total}} \quad (3.4)$$

$$I_{S=O} = \frac{A_{1350-1170} + A_{1050}}{A_{total}} \quad (3.5)$$

Donde,

$I_{C=O}$ : Índice de carbonilo, adim.

$I_{OH}$ : Índice de hidroxilo, adim.

$I_{Insat}$ : Índice de insaturaciones, adim.

$I_{S=O}$ : Índice de sulfóxidos, adim.

- $A_{1780-1650}$ : Área del pico de carbonilo,  $\text{cm}^2$
- $A_{3650-3200}$ : Área del pico de hidroxilo,  $\text{cm}^2$
- $A_{1680-1550}$ : Área del pico de insaturaciones 1,  $\text{cm}^2$
- $A_{1500-1420}$ : Área del pico de insaturaciones 2,  $\text{cm}^2$
- $A_{1350-1170}$ : Área del pico de sulfóxidos 1,  $\text{cm}^2$
- $A_{1050}$ : Área del pico de sulfóxidos 2,  $\text{cm}^2$
- $A_{\text{Total}}$ : Área total de picos de un espectro infrarrojo,  $\text{cm}^2$

Adicionalmente, se propone comparar los índices anteriores de las muestras envejecidas en el EEMA con los índices que se obtendrán a partir de los espectros por solicitar al LanammeUCR para el asfalto 0925-14 envejecido a la intemperie para el proyecto “*Evaluación de la oxidación de asfaltos mediante ensayos acelerados y condiciones reales de campo*” de Baldi *et al.* (2017).

La comparación mencionada en el párrafo anterior se realizará mediante cuatro ANOVA aplicados a cada índice de envejecimiento y se compararán los tres tiempos de envejecimiento en el EEMA contra los tiempos equivalentes en la intemperie. En todas las comparaciones, las hipótesis planteadas son las que describe la Ecuación 3.6.

$$\begin{aligned}
 H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n \\
 H_1: \mu_i \neq \mu_j; \text{ para algún grupo } i \neq j
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Donde,

$H_0$ : Hipótesis nula.

$H_1$ : Hipótesis alternativa.

$\mu$ : Media de un conjunto de datos.

La hipótesis nula plantea la igualdad estadística entre medias para un conjunto de datos comparados. Por otro lado, la hipótesis alternativa indica, que al menos un grupo del conjunto de datos comparados, es estadísticamente diferente al resto (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Cabe destacar que para garantizar la confiabilidad del estudio, se realizarán las pruebas de supuestos para el ANOVA, es decir, se verificará que los datos sean normales, independientes

y con igual variabilidad (Gutiérrez & De la Vara, 2008). Además, se empleará una significancia del 5 %.

Con base en lo anterior, si alguno de los estudios planteados acepta la hipótesis alternativa, se aplicará el estadístico de Tukey con el fin de determinar exactamente, cuáles parejas de datos presentan igualdad estadística significativa (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Por último, los estudios estadísticos propuestos con antelación se llevarán a cabo mediante el software Minitab® 18 y se considera de interés prioritario, las equivalencias estadísticas entre pares de datos EEMA-intemperie.

### 3.2.9. Muestreo y parámetros para mediciones CXT

Las mediciones de la CXT en el reómetro de corte dinámico (DSR), se realizarán en el LanammeUCR por personal técnico calificado, ya que el equipo es de uso exclusivo del personal del laboratorio. El muestreo para el ensayo de CXT se realiza mediante la misma metodología que la expuesta en el apartado 3.2.7.b, a excepción que la placa de muestra asfáltica removida se coloca en un Beaker de 50 mL y se deben colocar suficientes placas para ocupar al menos una cuarta parte del volumen del Beaker.

Posteriormente, se entregan las muestras a la analista del LanammeUCR y se indican los parámetros de ajuste y medición del DSR que se muestran en el Cuadro 3.4, los cuales son los mismos que los empleados para el proyecto “*Evaluación de la oxidación de asfaltos mediante ensayos acelerados y condiciones reales de campo*” de Baldi *et al.* (2017).

**Cuadro 3. 4.** Parámetros del DSR para la medición de la CXT en muestras asfálticas.

| Parámetro                  | Valor        | Anotaciones  |
|----------------------------|--------------|--|
| Barrido de temperatura     | 5 °C – 70 °C | El barrido puede terminar al apreciar la CXT y alcanzar 5 °C más |
| Velocidad de calentamiento | 0.5 °C/ min  | N/A  |
| Frecuencia                 | 10 rad/ s    | N/A  |
| Deformación                | 1 %          | N/A  |
| Geometría                  | 8 mm         | N/A  |

Las muestras por ensayar corresponden a los especímenes original, A, B y C con dos repeticiones cada uno, las cuales se promediarán para un total de cuatro valores de CXT.

### 3.2.10. Tratamiento de datos CXT

Para los datos CXT se aplicará una comparación directa con los valores reportados por Baldi *et al.* (2017), para los tiempos de seis meses y doce meses, ya que son los datos disponibles para el asfalto 0925-14 envejecido a la intemperie.

Con el fin de obtener un valor de CXT preciso, se aplicará el ángulo de fase como base de cálculo, ya que cuando equivale a 45° indica el punto preciso de corte entre las componentes viscosa y elástica. Por ello, se propone emplear la técnica de interpolación (ver Ecuación 3.7) para los conjuntos de datos que no presenten el valor exacto de ángulo de fase de 45°.

$$\frac{CXT - T_1}{T_2 - T_1} = \frac{45^\circ - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1} \quad (3.7)$$

Donde,

CXT: Temperatura de entrecruzamiento, °C.

$\theta_1$ : Ángulo de fase inferior a 45°, adim.

$\theta_2$ : Ángulo de fase superior a 45°, adim.

$T_1$ : Temperatura inferior a la CXT, °C.

$T_2$ : Temperatura superior a la CXT, °C.

Por último, se considerarán valores de CXT superiores a 10 °C como indicativo de envejecimiento, según lo planteado por Villegas *et al.* (2018).

### 3.2.11. Análisis cualitativo de muestras envejecidas

Para la ruta de análisis cualitativo se establecieron los ensayos de RMN y SEM, además de la inspección física de las muestras. En los apartados siguientes se detallan aspectos de muestreo, medición y análisis de los datos por recabar.

### 3.2.12. Muestreo y análisis de mediciones RMN

Las mediciones de espectros RMN se llevarán a cabo en la Escuela de Química de la UCR por personal capacitado, ya que el uso del espectroscopio de radiación magnética nuclear es restringido al personal del laboratorio.



Para el muestreo de especímenes de asfalto envejecidos para aplicar en el espectroscopio RMN se siguió la misma metodología que la planteada en el apartado 3.2.7.b, a excepción que el pesaje se realiza en una balanza analítica y directo a un tubo Eppendorf pre tarado. En este caso, la masa requerida es de 0.1000 g y se muestrearon los especímenes: original, D, E y F.

En la Figura 3.15 se muestra el proceso de muestreo para las mediciones en el espectroscopio RMN. Para el análisis de los espectros RMN, se propone interpretar las diferencias entre los espectros de los especímenes envejecidos en el EEMA con el fin de determinar alguna estructura que se asocie al envejecimiento de los asfaltos. Cabe destacar que no se poseen espectros RMN de muestras envejecidas en la intemperie por el LanammeUCR, por lo que el énfasis de este análisis es exploratorio.



**Figura 3. 15.** Proceso de muestreo de especímenes para RMN: a) Tubo Eppendorf; b) Balanza analítica; c) Colocación del Eppendorf para pesaje; d) Muestras listas para RMN.

En el Cuadro 3.5 se aprecian los rangos de señales RMN-H y RMN-C<sup>13</sup> comunes para compuestos insaturados (Bruice, 2008; Shriner *et al.*, 2004), lo cual se relaciona con muestras envejecidas.

**Cuadro 3. 5.** Señales RMN de grupos orgánicos insaturados de interés.

| Desplazamiento químico RMN-H, $\delta/$ (ppm) | Grupo asociado      | Desplazamiento químico RMN-C <sup>13</sup> , $\delta/$ (ppm) | Grupo asociado |
|---|---------------------|--|----------------|
| 0.5 - 3.5                                     | Alquilos, alcoholes | 5 – 40   | Alquilos       |
| 1.6 – 1.9                                     | Alílicos            | 45 – 90  | Alcohol        |
| 2.1 – 2.6                                     | Cetonas y ésteres   | 60 – 90  | Alquinos       |
| 2.5 – 3.1                                     | Acetileno           | 105 – 130  | Nitrilos       |
| 6.0 – 9.5                                     | Aromáticos          | 120 – 140  | Aromáticos     |

### 3.2.13. Muestreo y análisis de mediciones SEM

El procedimiento de muestreo y medición de especímenes para SEM es igual al que se muestra en el apartado 3.2.6, puesto que para las mediciones SEM y EDX el equipo empleado es el mismo en ambos casos, es decir, el microscopio electrónico. Las mediciones SEM se realizarán en el CIEMIC por personal capacitado, ya que el microscopio electrónico es de uso exclusivo del personal del laboratorio.

Para efectos de mejorar la resolución de imágenes SEM y debido a que el asfalto no es conductor, se planteó el aplicar un recubrimiento de oro, el cual permite aplicar un mayor voltaje en el espécimen en estudio para mejorar la calidad de las imágenes. Cabe destacar que las imágenes capturadas se realizarán a los 300, 1000 y 5000 aumentos.

Debido a que el LanammeUCR no posee datos SEM de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a la intemperie, el análisis de las imágenes por obtener es exploratorio, sin embargo, se enfatiza en la formación de patrones, grietas, granos, entre otros.

### 3.2.14. Inspección visual de muestras envejecidas

Para la inspección de las muestras envejecidas en el EEMA se evaluarán aspectos como la opacidad, la dureza, patrones superficiales y comparación visual con las muestras envejecidas a la intemperie por Baldi *et al.* (2017) en la Figura 3.3.c.

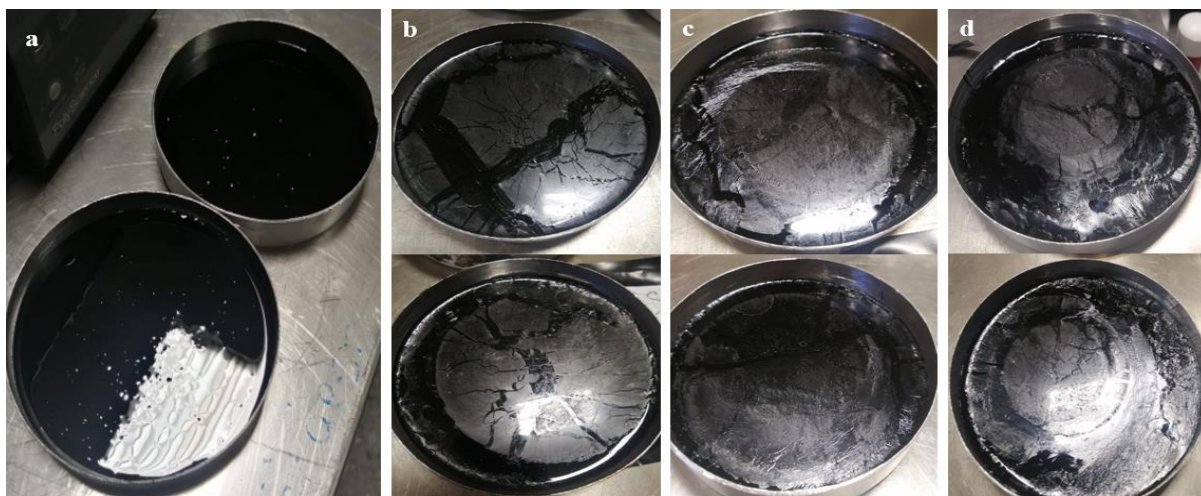


### 3.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en la metodología propuesta en la sección 3.2 para la determinar el efecto de envejecimiento del EEMA sobre muestras asfálticas, se analizaron los siguientes resultados experimentales.

#### 3.3.1. Evaluación visual de muestras envejecidas

Posterior al envejecimiento de las muestras asfálticas en el EEMA se recabaron imágenes sobre el deterioro evidenciado, las cuales se agrupan en la Figura 3.16.



**Figura 3. 16.** Muestras asfálticas posterior a los ensayos en el EEMA: a) Originales; b) Equivalente a tres meses; c) Equivalente a seis meses; d) Equivalente a doce meses.

Con base en la Figura 3.16, se observó un aumento en la opacidad superficial con forme aumentó el tiempo de envejecimiento en el EEMA, sin embargo, se pueden evidenciar caminos superficiales con asfalto aparentemente intacto (AAI).

Los caminos de AAI son más amplios en las muestras de tres meses equivalentes, son mínimos en las muestras de seis meses equivalentes y son medianamente comunes en las muestras equivalentes a un año.

Adicionalmente, la rugosidad superficial cualitativa de las muestras incrementa directamente proporcional al tiempo de envejecimiento equivalente, lo cual sugiere un probable fenómeno de desplazamiento de líquidos por una diferencia de densidad debida a la exposición continua de altas temperaturas.

Con base en lo anterior, se planteó que el asfalto durante el envejecimiento comienza por endurecer una capa fina superficial, como se aprecia en la Figura 3.16.b, la cual cede ante el movimiento propio de los cambios de densidad en el resto del asfalto. Esto provoca la formación de caminos de AAI.

Seguidamente, como un efecto de acumulación de asfalto envejecido, la tensión superficial en las muestras de seis meses equivalentes (Figura 3.16.c) es suficiente para mantener una capa envejecida de mayor superficie, sin embargo, como efecto de la acumulación las arrugas superficiales se hacen más evidentes.

Por otro lado, en las muestras de un año equivalente (Figura 3.16.d) se vuelven a hacer presentes los caminos de AAI en una menor medida a los presentes en las muestras de tres meses equivalentes, pero mayor a los presentes en las de seis meses.

Esto se debe a que el efecto de acumulación que propicia arrugas superficiales para las muestras de un año equivalente es lo suficiente como para centrar las interacciones superficiales en placas que se desplazan por la diferencia de densidad, lo cual vence la tensión superficial y permite la presencia de caminos.

En contraste con las muestras envejecidas a la intemperie por Baldi *et al.* (2017), las cuales se aprecian en la Figura 3.3.c, no se observaron los mismos patrones debido a que para esa investigación los especímenes poseían un espesor aproximado de 1 mm, lo cual difiere de las muestras envejecidas en el EEMA de 1 cm de espesor.

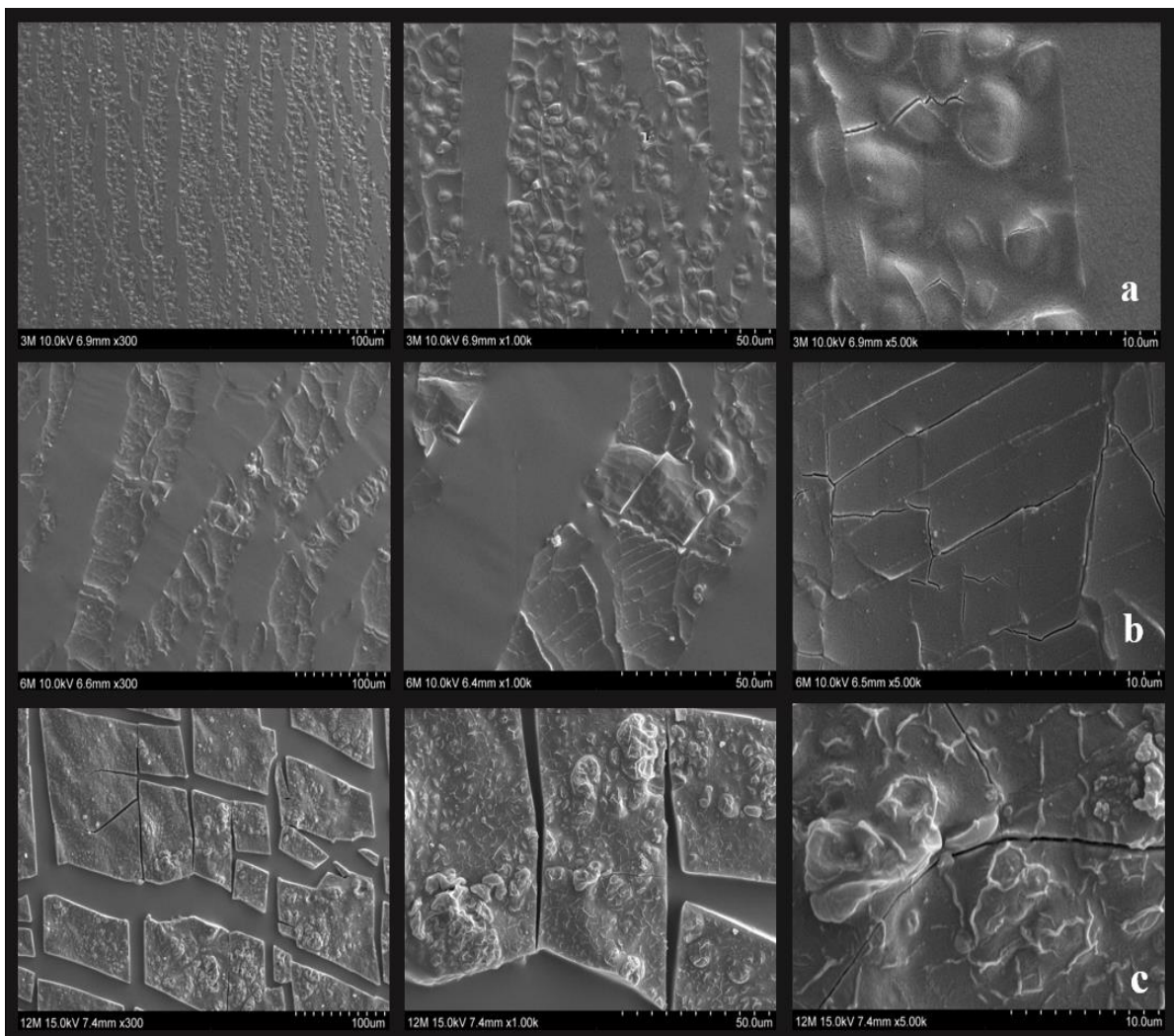
Con ello, se estima que las muestras de Baldi *et al.* (2017) al presentar un espesor muy bajo y un área superficial inferior a las muestras del EEMA, restringieran la capacidad del movimiento del asfalto interno, lo cual impediría la presencia de caminos y favorecería la acumulación de asfalto envejecido.

Lo anterior es consistente con el aspecto del asfalto de la Figura 3.3.c, ya que al incrementarse el efecto acumulativo, se propicia una mayor opacidad y rugosidad superficial. Por último, la coloración amarillenta del asfalto de la Figura 3.3.c se puede relacionar a la acumulación de

polvo superficial, esto porque dicha muestra fue envejecida a la intemperie, lo cual queda por fuera de los factores que puede simular el EEMA.

### 3.3.2. Análisis SEM de muestras envejecidas en el EEMA

Las imágenes que se capturaron mediante el microscopio electrónico de barrido para las muestras asfálticas envejecidas en el EEMA se observan en la Figura 3.17. No se presenta una imagen de la muestra original, ya que al ser muy suave el haz de electrones la perforó.



**Figura 3. 17.** Imágenes SEM de muestras asfálticas envejecidas en el EEMA, aumentos de 300, 1000 y 5000 de izquierda a derecha: a) Tres meses equivalentes; b) Seis meses equivalentes; c) Un año equivalente.

Primeramente para las muestras de tres meses equivalentes (Figura 3.17.a) se aprecia una superficie granulada (asfalto envejecido) y lisa (AAI) de forma intercalada y en partes

aproximadamente iguales. Los patrones asemejan un desgarramiento sin bloques granulados definidos, además, no se aprecia un espesor lo suficientemente ancho en las secciones granuladas, lo cual es consistente con una menor cantidad de asfalto envejecido acumulado.

Por otro lado, para las muestras de seis meses equivalente (Figura 3.17.b) se aprecia un patrón semejante al de las muestras de tres meses equivalentes con la excepción que las secciones de AAI se encuentran ligeramente arrugadas en los especímenes de seis meses equivalentes, lo cual coincide con lo mostrado en la Figura 3.16.c, en donde los caminos de AAI presentan una opacidad ligeramente mayor a los de la Figura 3.16.b.

Además, en la Figura 3.17.b se aprecian para los 1000 y 5000 aumentos estructuras de placas de asfalto envejecido más definidas y los caminos de AAI se muestran más anchos, lo que responde al movimiento fluido superficial como efecto de las diferencias de densidad que permite la acumulación de asfalto envejecido y la exposición de asfalto interno para envejecimiento.

Respecto a las imágenes SEM de asfalto envejecido a un año equivalente (Figura 3.17.c) se aprecia un efecto de acumulación más pronunciado, lo que coincide con lo expuesto en la sección 3.3.1. Como resultado de ello, las placas de asfalto envejecido se diferencian mejor del AAI, presentan espesores mayores y se forman estructuras granuladas.

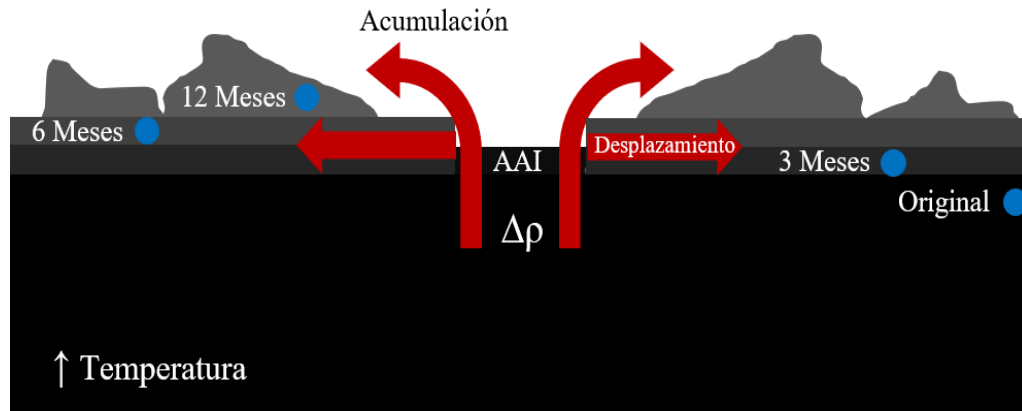
Adicionalmente, la tensión superficial de asfalto envejecido pierde significancia, lo que permite a los caminos de AAI definirse con menor envejecimiento, pues presentan una superficie más homogénea a los caminos de las muestras de seis meses equivalentes.

Lo anterior es consistente con el aspecto del asfalto de la Figura 3.16.d, donde la opacidad de los caminos se redujo, pero la superficie presenta secciones arrugadas más definidas. Todo ello contribuye al desplazamiento de placas envejecidas de forma análoga a las placas tectónicas sobre el magma terrestre.

El desplazamiento de placas envejecidas propicia la interacción entre placas, como se muestra en la Figura 3.17.c a los 5000 aumentos, en donde se empiezan a apreciar la formación de

valles, planicies y picos de material envejecido, los cuales a nivel macroscópico conforman las arrugas perceptibles a simple vista en las muestras de un año equivalentes.

En la Figura 3.18 se representa un esquema que explica los movimientos sólidos y líquidos con respecto al tiempo de exposición de las muestras de asfalto 0925-14 envejecidos de forma acelerada en el EEMA.



**Figura 3. 18.** Proceso físico de envejecimiento del asfalto 0925-14 en el EEMA

En resumen, el proceso de envejecimiento del asfalto 0925-14 en el EEMA se compone de las transferencias de masa por acumulación y desplazamiento, en donde la tensión superficial decrece con el paso del tiempo y el espesor es proporcional al tiempo de envejecimiento.

### 3.3.3. Análisis de espectros RMN

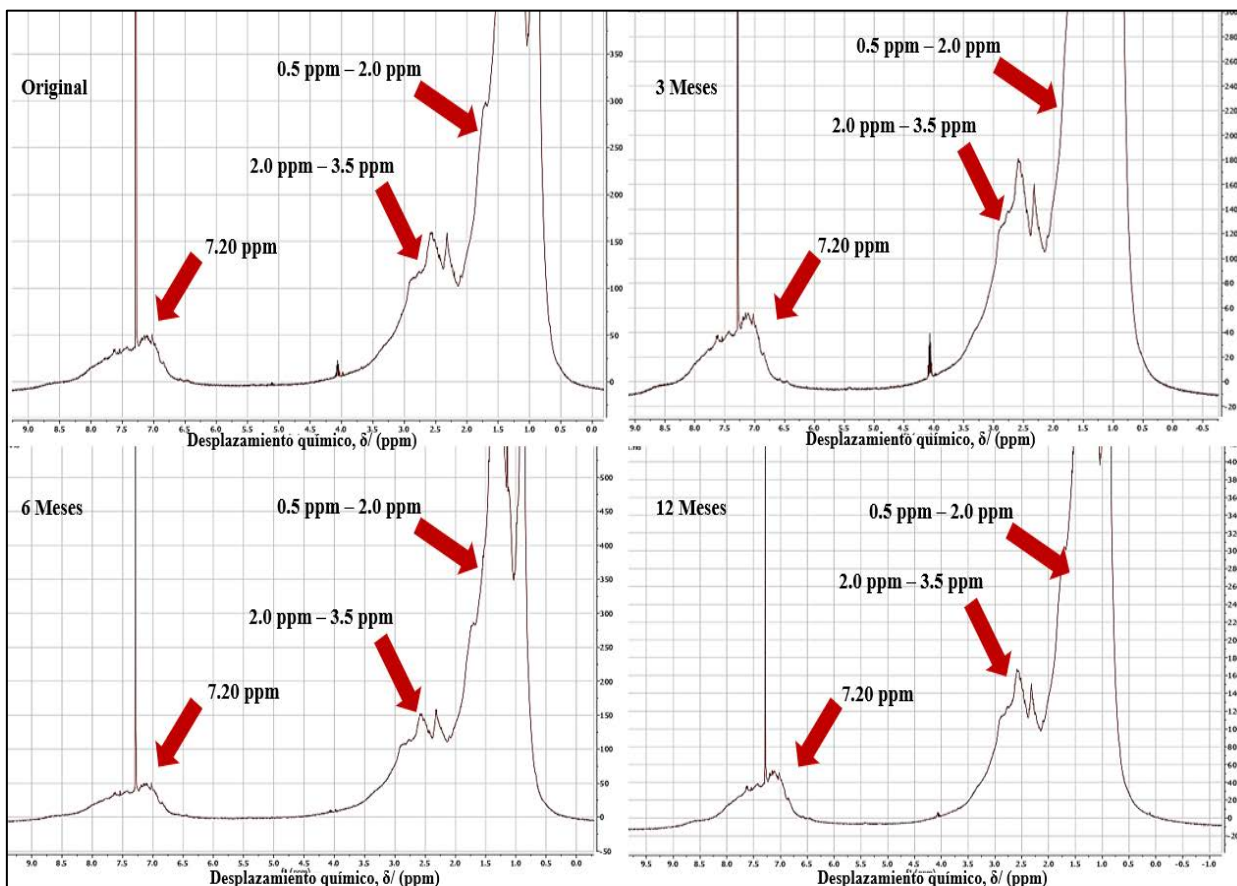
El análisis de los espectros RMN se desarrolla en dos secciones que corresponden a los espectros medidos, es decir, los espectros RMN-H y RMN-C<sup>13</sup>. Los resultados experimentales y su análisis sobre las muestras de asfalto 0925-14, se muestran en los siguientes apartados.

#### a. Análisis de espectros RMN-H

Los espectros RMN-H recabados se muestran en la Figura 3.19, en donde se observan señales concordantes a las estructuras clásicas de los asfaltenos, es decir, un grupo denso de señales aromáticas entorno a los 7.20 ppm.

El alto valor de desplazamiento químico del conglomerado de grupos aromáticos de los asfaltenos se debe a la concentración de la densidad electrónica, la cual protege a los protones de la radiación magnética, por lo que se requieren campos más intensos para la detección de dichas señales (Bruice, 2008).





**Figura 3. 19.** Espectros RMN-H de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA.

Por otro lado, en la Figura 3.19, se aprecian señales significativas en los rangos de 0.5 ppm a 3.5 ppm, las cuales corresponden a grupos funcionales como alcoholes, cetonas, ésteres, alquinos y sustituyentes alquílicos. Sin embargo, tanto las señales aromáticas como las de los grupos funcionales múltiples se presentaron en todas las muestras asfálticas envejecidas en el EEMA y en los especímenes originales.

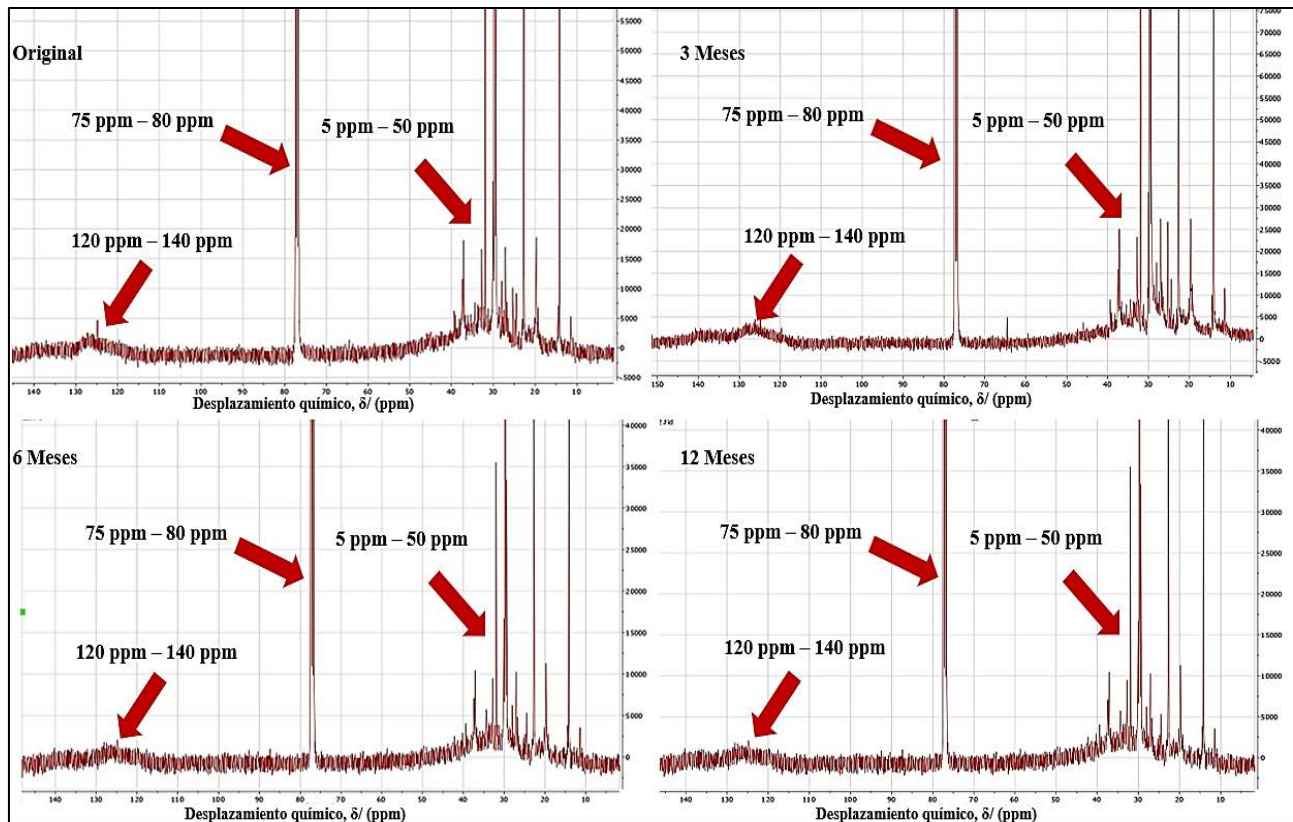
Con base en lo anterior, se determinó que los espectros RMN-H no brindaron información suficiente sobre el avance en el grado de envejecimiento de las muestras asfálticas 0925-14, pese a las diferencias físicas descritas en las secciones 3.3.1 y 3.3.2.

Por último, al comparar los espectros obtenidos en la Figura 3.19 con los espectros que se muestran en la Figura 3.7.b de Atencia (2011), se observan las mismas señales, lo cual

confirma que mediante la técnica RMN-H no se pueden apreciar diferencias moleculares significativas para el grado de avance en el envejecimiento de muestras asfálticas.

### b. Análisis de espectros RMN-C<sup>13</sup>

Los espectros RMN-C<sup>13</sup> obtenidos para las muestras asfálticas envejecidas en el EEMA se muestran en la Figura 3.20.



**Figura 3.20.** Espectros RMN-C de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA.

En los espectros de la Figura 3.20 se aprecian las señales características de los asfaltenos, es decir, sustituyentes alquílicos entre los 5 ppm y los 45 ppm y un conglomerado de aromáticos entre los 120 ppm y los 140 ppm. El pico común entre los 75 ppm y los 80 ppm corresponde al cloroformo deuterado que se empleó para las mediciones RMN.

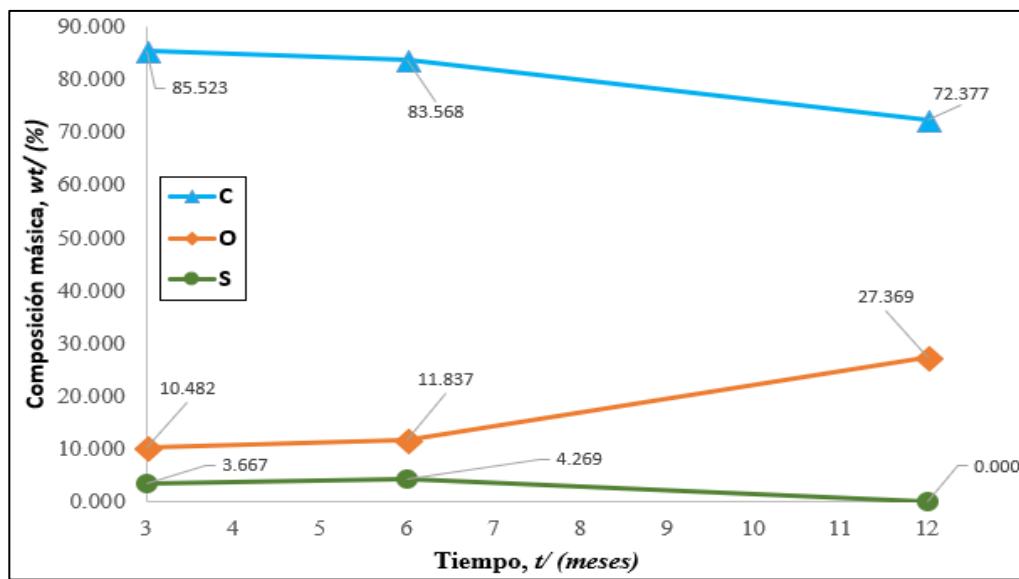
Adicionalmente, cuando se compararon los espectros de la Figura 3.20 entre sí, se determinó que no existen diferencias apreciables que permitan evaluar el grado de avance en el envejecimiento. Además, cuando se comparan los espectros RMN-C<sup>13</sup> de la Figura 3.20 con el de la Figura 3.7.a de Atencia (2011), la única diferencia radica en que para las muestras

envejecidas en el EEMA, la señal de aromáticos (120 ppm – 140 ppm) es menos definida que la mostrada en la Figura 3.7.a.

Finalmente, se concluye que ninguna de las técnicas RMN brindó información significativa que permita evaluar los alcances de envejecimiento de muestras asfálticas en el EEMA.

### 3.3.4. Análisis de datos EDX

En la Figura 3.21 se muestran los valores de las composiciones másicas elementales para las muestras asfálticas de cada tiempo de ensayo en el EEMA. La Figura 3.21 se basa en los datos tabulados en el Cuadro G.1 del Apéndice G.



**Figura 3.21.** Variación de la composición másica elemental de la superficie de muestras asfálticas 0925-14 contra el tiempo de envejecimiento en el EEMA.

Con base en lo que se muestra en la Figura 3.21 existe un incremento de la composición elemental del oxígeno a medida que las muestras asfálticas se someten a mayores tiempos de envejecimiento.

El comportamiento descrito con antelación coincide con lo obtenido a nivel físico en las Figuras 3.16 y 3.17, puesto que un incremento del oxígeno en la composición de las muestras es un indicador de oxidación, lo que propicia estructuras con más enlaces con oxígeno, lo cual aumenta la dureza de un material y lo hace más quebradizo. La oxidación es uno de los mecanismos de envejecimiento de los asfaltos que se muestra en la Figura 1.3 del Capítulo 1.

Seguidamente, el aumento de dureza de un material producto de la oxidación se debe a que los enlaces moleculares con átomos de oxígeno son más cortos que los enlaces carbono-carbono (Shackelford, 2005) y una composición rica en oxígeno aumenta la probabilidad de enlaces dobles con carbono, que como resultado generan grupos como carbonilos, asociados al envejecimiento del asfalto.

Por otro lado, el descenso de la composición de carbono en las muestras (Figura 3.21) se debió a tres efectos: uno matemático, otro químico y la pérdida de volátiles. En primer lugar el efecto matemático responde a que cualquier aumento de la composición de otro elemento, influye en la razón entre el carbono y la masa total de elementos superficiales de la muestra.

Luego, el efecto químico corresponde a una reacción de polimerización radicalaria producido por el efecto conjunto de la temperatura y la radiación UV. Esta reacción corresponde a otro de los mecanismos de envejecimiento de los asfaltos (Figura 1.3), la cual comienza cuando un iniciador radical (generalmente un peróxido o algún compuesto de nitrilo) se rompe de forma homolítica y genera radicales que generan una reacción en cadena (Bruice, 2008).

Con base en lo anterior y debido a la variedad de los compuestos SARA en los asfaltos, el iniciador radical contiene entre sus partes oxígeno, que además es buen nucleófilo, lo cual promueve un entrelazamiento de los compuestos SARA donde el oxígeno funciona como puente, lo que brinda a las superficies asfálticas envejecidas una mayor riqueza de oxígeno en su composición.

La pérdida de volátiles como efecto en el descenso de la composición de carbono consiste en uno de los mecanismos de envejecimiento de los asfaltos (Figura 1.3) y su factor causante son las altas temperaturas empleadas en el EEMA, lo cual propicia que los hidrocarburos con bajo punto de ebullición se volatilicen y, en consecuencia, se reduce la composición de carbono en la superficie del asfalto.

Para el caso del azufre en el asfalto, no se observa un patrón definido, ya que la tendencia es creciente para los tres y seis meses equivalentes en el EEMA, pero para los doce meses no se

detectó la presencia de azufre. Se plantea que este comportamiento se debe al mecanismo de envejecimiento que el EEMA ejerció sobre las muestras asfálticas.

Respecto al mecanismo planteado con antelación, el EEMA aplica subciclos de calor con radiación, los cuales favorecen la ruptura homolítica de iniciadores de polimerización oxigenados. Además, con base en la Figura 3.21, el oxígeno disponible en la muestra asfáltica siempre es superior al azufre.

Con base en lo planteado anteriormente, las reacciones de oxidación predominaron en el mecanismo de envejecimiento del EEMA y a medida que más asfalto envejecido se acumuló de forma superficial, las muestras presentaron un efecto semejante a la pasividad del aluminio que redujo la significancia del azufre en la composición superficial.

Adicionalmente, se sugiere que una fuente importante de azufre en los asfaltos envejecidos a intemperie como lo muestran los espectros IR de Baldi *et al.* (2017), los cuales se discutirán más adelante, es el agua de lluvia, que en ambientes urbanos posee un grado de acidez mayor al agua potable utilizada para los ensayos en el EEMA.

El grado de acidez del agua pluvial proviene de compuestos con sulfóxidos emitidos por el uso de combustibles fósiles (Bruice, 2008). Si bien, no se realizaron mediciones EDX en los asfaltos de Baldi *et al.* (2017), sí se observaron señales intensas para sulfóxidos en los espectros IR.

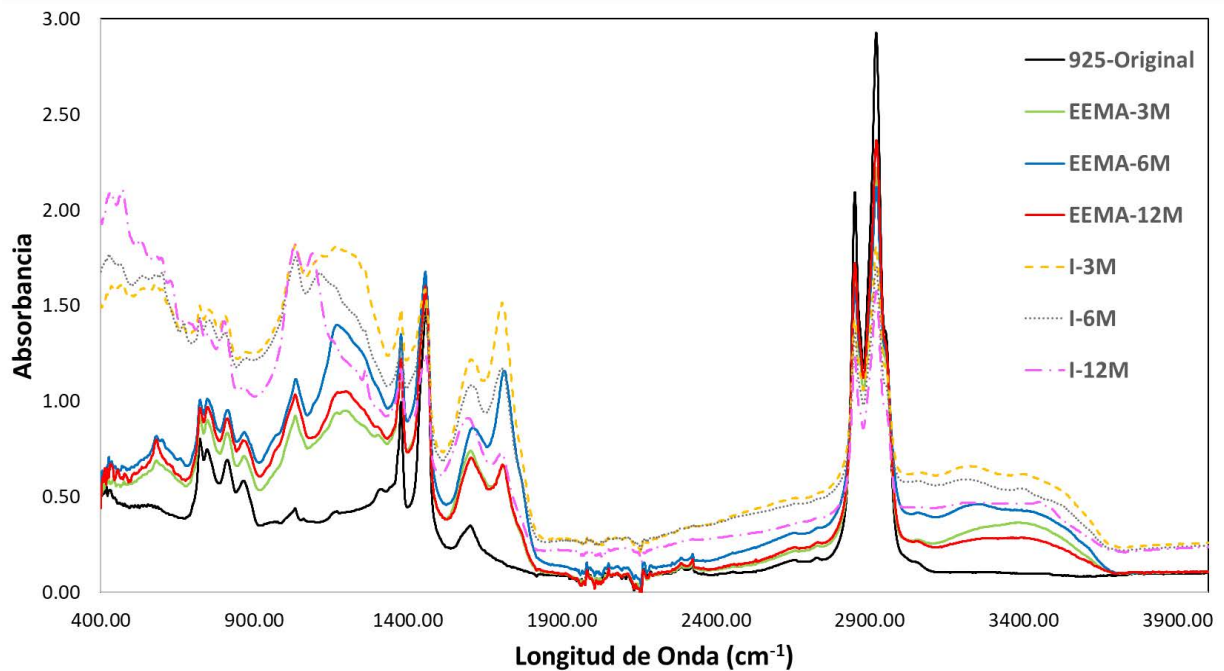
En conclusión, se determinó que el EEMA aumentó el oxígeno en la composición de las muestras asfálticas a medida que los tiempos de ensayo eran más prolongados, lo que indica una tendencia al envejecimiento de asfaltos a través de los mecanismos de oxidación, polimerización con iniciadores oxigenados y de la pérdida de volátiles debido a la reducción del carbono en la composición.

### **3.3.5. Análisis de datos FT-IR**

Para un adecuado procesamiento de los espectros IR obtenidos primero se comprobó que tuvieran una baja variabilidad. Para ello, se superpusieron los espectros de cada tiempo por separado a modo de realizar una inspección visual. Una mayor coincidencia entre espectros

implica menor variabilidad. Con base en lo expuesto anteriormente, se aprecia que desde la Figura F.1 hasta la Figura F.7 del Apéndice F, existe buena coincidencia cualitativa entre los espectros de asfaltos envejecidos en el EEMA y a la intemperie.

Por otro lado, en la Figura 3.22, se observa la comparación entre los espectros IR promedio de cada tiempo equivalente de envejecimiento en el EEMA y los espectros IR promedio de cada tiempo de envejecimiento a la intemperie de las muestras asfálticas de Baldi *et al.* (2017).



**Figura 3.22.** Comparación de espectros IR de muestras de asfalto 0925-14 envejecidas a la intemperie y en el EEMA contra el estado original del asfalto.

Con base en la Figura 3.22, se observa que para los asfaltos envejecidos a la intemperie la señal de carbonilos (entre los  $1780\text{ cm}^{-1}$  –  $1650\text{ cm}^{-1}$ ) es máxima a los tres meses, decrece a los seis meses y es mínima en los doce meses. Por otro lado, para los asfaltos envejecidos en el EEMA, los carbonilos son máximos en los seis meses y mínimos a los doce meses.

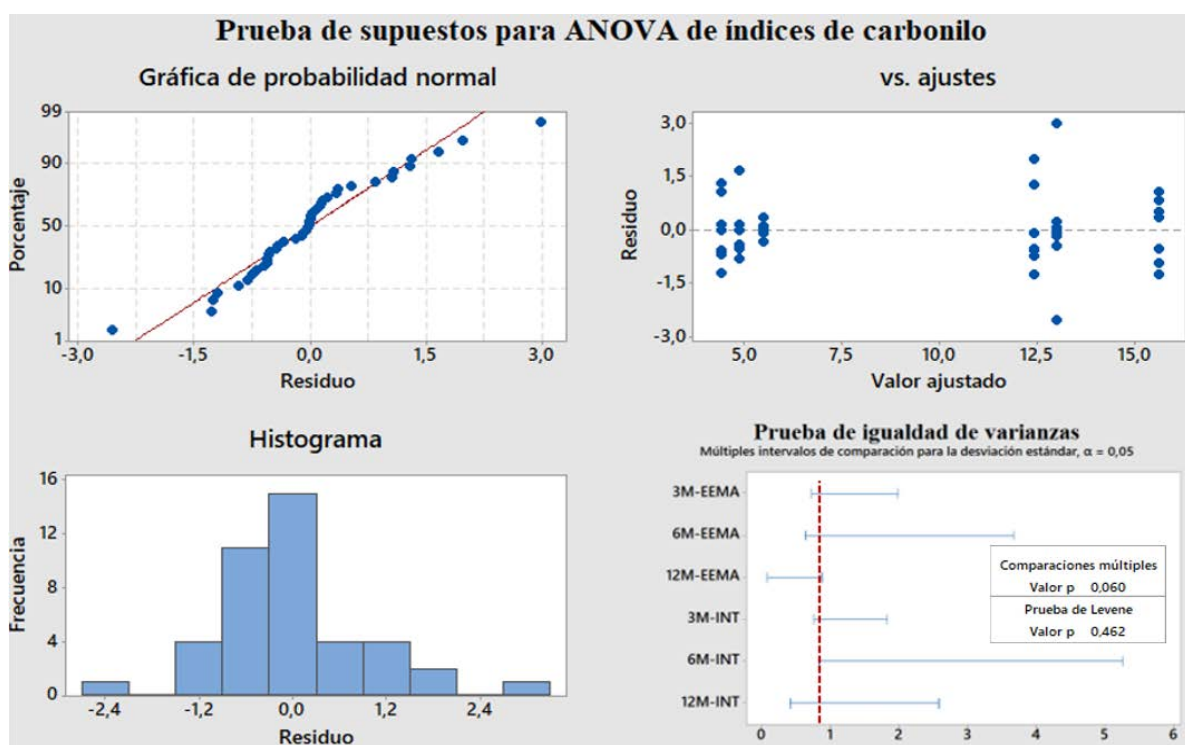
Adicionalmente, se aprecia que para las señales de los sulfóxidos ( $1350\text{ cm}^{-1}$  –  $1170\text{ cm}^{-1}$  y  $1050\text{ cm}^{-1}$ ), el crecimiento de la señal es superior en asfaltos envejecidos a la intemperie en comparación con los envejecidos en el EEMA, lo cual coincide con lo expuesto en la sección 3.3.4 sobre el descenso de azufre en la composición elemental.

Seguidamente, se aprecia en la Figura 3.22 que alrededor de los  $2900\text{ cm}^{-1}$ , señal que corresponde a los volátiles, existe una reducción para ambas rutas de envejecimiento; para las señales de insaturaciones y aromáticos ( $1680\text{ cm}^{-1} - 1420\text{ cm}^{-1}$ ) se observa un crecimiento en ambas rutas de envejecimiento, esto sucede también para las señales de hidroxilos ( $3650\text{ cm}^{-1} - 3200\text{ cm}^{-1}$ ), las cuales se relacionan a la humedad en la muestra.

Sin embargo, con el fin de cuantificar los alcances del EEMA en el envejecimiento de muestras asfálticas en comparación con la intemperie, se evaluó la equivalencia estadística de los índices de carbonilo, hidroxilo, insaturaciones y sulfóxidos (ver Cuadros G.6 y G.7), los cuales se obtuvieron al aplicar las Ecuaciones 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 a los datos de los Cuadros F.6, F.7, F.8 y F.9. Los análisis estadísticos se explican en los siguientes apartados.

#### a. Análisis del índice de carbonilo

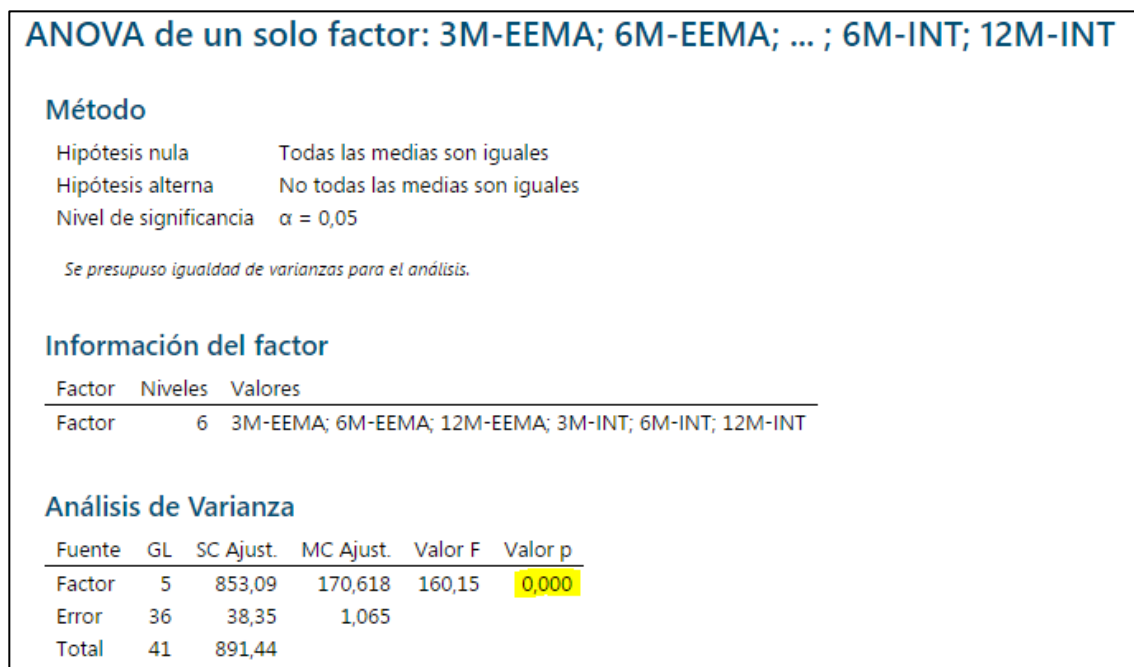
Primeramente, en la Figura 3.23 se aprecian los estudios estadísticos para la comprobación de supuestos para el ANOVA por índice de carbonilo.



**Figura 3.23.** Comprobación de los supuestos de independencia, normalidad e igualdad de varianza para los datos de los índices de carbonilo de las muestras asfálticas envejecidas en el EEMA y a la intemperie.

Con base en la Figura 3.23, se determinó que los datos de índices de carbonilo EEMA-Intemperie satisfacen los requisitos para la ejecución de un ANOVA, ya que los datos son normales, independientes y, mediante las pruebas de Comparaciones Múltiples y Levene se obtuvieron valores p de 0.060 y 0.462 respectivamente, lo cual valida la igualdad de varianzas por ser ambos valores mayores a la significancia establecida del 5 %.

Debido a lo anterior, se realizó un ANOVA cuyos resultados de Minitab® 18 se muestran en la Figura 3.24.

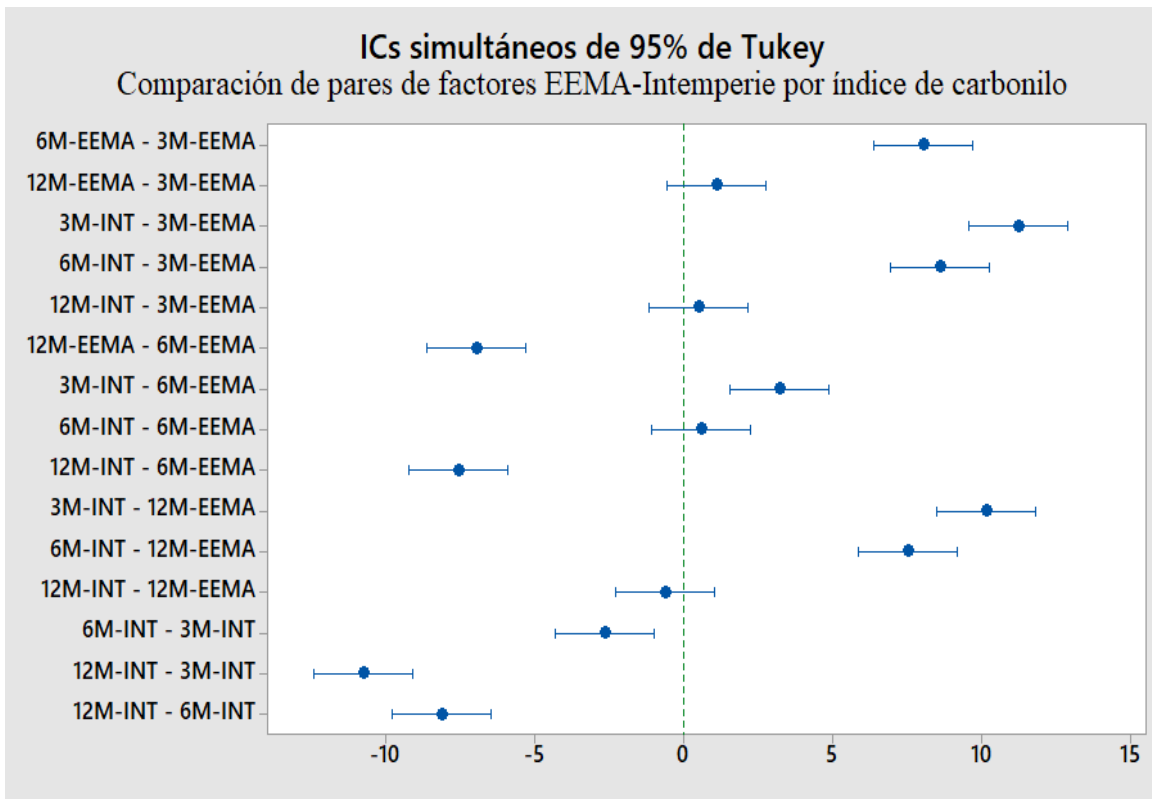


**Figura 3.24.** Resultado del ANOVA aplicado a los índices de carbonilo de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie para tres meses, seis meses y doce meses.

Con base en el valor p resaltado en la Figura 3.24, se concluye con un 5 % de significancia que existe al menos un par de medias diferentes en el conjunto de los datos de índice de carbonilo EEMA-Intemperie.

Seguidamente, se aplicó una Prueba de Tukey, con el fin de determinar cuáles de los pares de datos EEMA-Intemperie son equivalentes en promedio. Los resultados de la Prueba de Tukey para los índices de carbonilo se encuentran tabulados en el Cuadro G.8 y se aprecian en la Figura 3.25.





**Figura 3.25.** Prueba de Tukey para los índices de carbonilo de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie.

En la Figura 3.25, se observa que los pares de niveles equivalentes entre sí a un 5 % de significancia para los índices de carbonilo son los siguientes:

- Los tres meses del EEMA con los doce meses del EEMA.
- Los doce meses a la intemperie con los tres meses del EEMA.
- Los seis meses a la intemperie con los seis meses del EEMA.
- Los doce meses a la intemperie con los doce meses del EEMA.

Con base en los niveles equivalentes se determinó que el EEMA puede simular de forma satisfactoria el incremento de carbonilos del asfalto 0925-14 envejecido a la intemperie durante seis meses y doce meses, mediante 24 horas y 45 horas de ensayos respectivamente, para las condiciones meteorológicas del Valle Central.

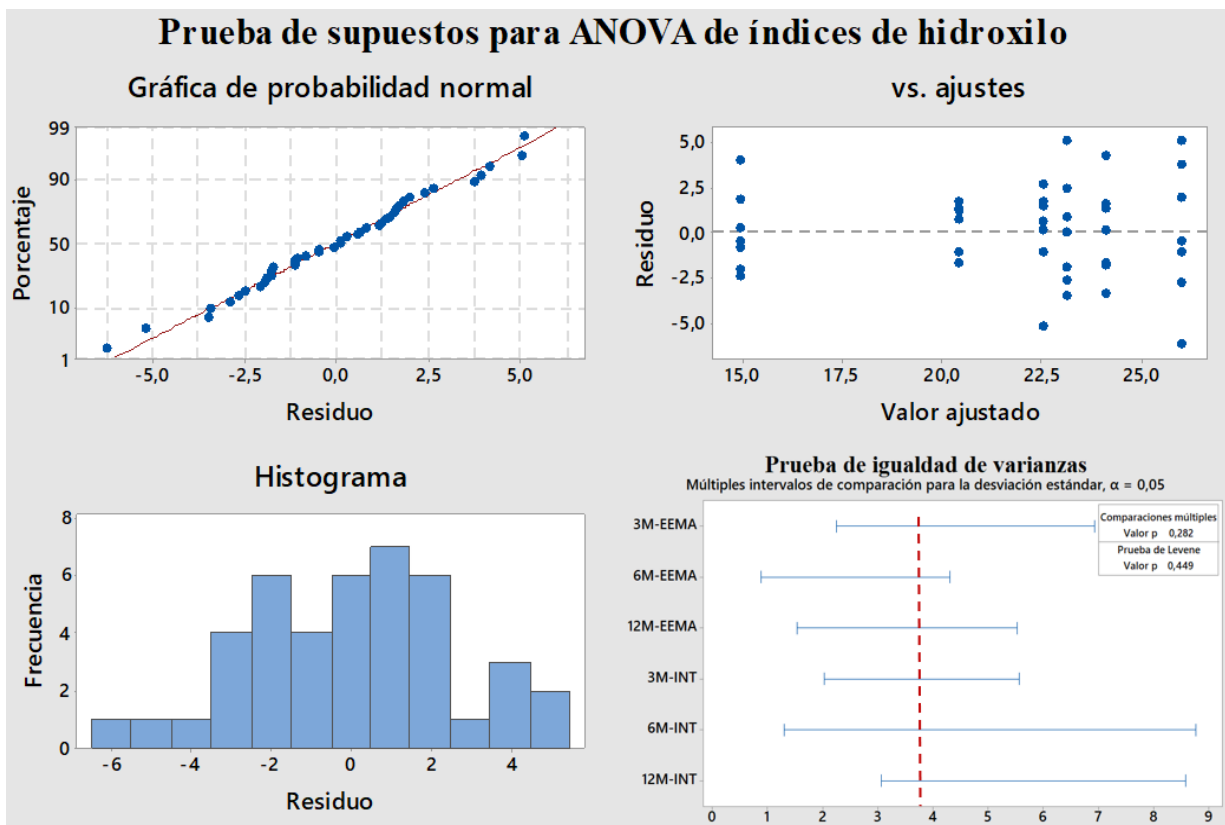
Cabe destacar que si bien el EEMA no equiparó el incremento de carbonilos a los tres meses de exposición a la intemperie, tienen mayor importancia las igualdades a tiempos mayores,

como un año, ya que permiten estudiar de forma confiable el desempeño que pueden brindar los pavimentos asfálticos durante el servicio, sin tener que esperar mucho tiempo.

Los resultados obtenidos en la Figura 3.25 son consistentes con los mecanismos de envejecimiento de asfaltos de polimerización y oxidación, predominantes del funcionamiento del EEMA, ya que se promueve la formación de moléculas con grupos funcionales oxigenados propios del envejecimiento como los carbonilos.

### b. Análisis del índice de hidroxilo

En la Figura 3.26 se aprecian los estudios estadísticos para la comprobación de supuestos para el ANOVA por índice de hidroxilo.



**Figura 3.26.** Comprobación de los supuestos de independencia, normalidad e igualdad de varianza para los datos de los índices de hidroxilo de las muestras asfálticas envejecidas en el EEMA y a la intemperie.

Con base en la Figura 3.26, se determinó que los datos de índices de hidroxilo EEMA-Intemperie satisfacen los requisitos para la ejecución de un ANOVA, ya que los datos son

normales, independientes y, mediante las pruebas de Comparaciones Múltiples y Levene se obtuvieron valores p de 0.282 y 0.449 respectivamente, lo cual valida la igualdad de varianzas por ser ambos valores mayores a la significancia establecida del 5 %.

Con base en lo anterior, se realizó un ANOVA cuyos resultados de Minitab® 18 se muestran en la Figura 3.27.

## ANOVA de un solo factor: 3M-EEMA; 6M-EEMA; ... ; 6M-INT; 12M-INT

### Método

|                        |                                 |
|------------------------|---------------------------------|
| Hipótesis nula         | Todas las medias son iguales    |
| Hipótesis alterna      | No todas las medias son iguales |
| Nivel de significancia | $\alpha = 0,05$                 |

*Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.*

### Información del factor

| Factor | Niveles | Valores   |
|--------|---------|---|
| Factor | 6       | 3M-EEMA; 6M-EEMA; 12M-EEMA; 3M-INT; 6M-INT; 12M-INT |

### Análisis de Varianza

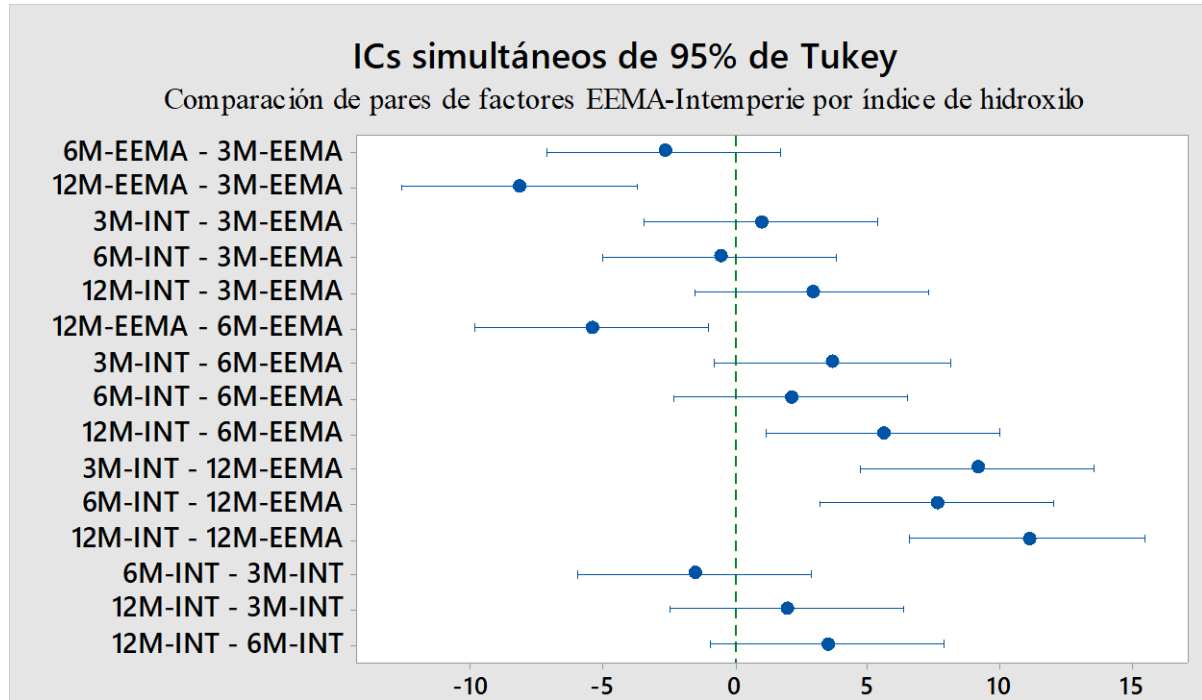
| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Factor | 5  | 517,0     | 103,405   | 13,60   | 0,000   |
| Error  | 36 | 273,8     | 7,605     |         |         |
| Total  | 41 | 790,8     |           |         |         |

**Figura 3.27.** Resultado del ANOVA aplicado a los índices de hidroxilo de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie para tres meses, seis meses y doce meses.

Con base en el valor p resaltado en la Figura 3.27, se concluye con un 5 % de significancia que existe al menos un par de medias diferentes en el conjunto de los datos de índice de hidroxilo EEMA-Intemperie.

Seguidamente, se aplicó una Prueba de Tukey, con el fin de determinar cuáles de los pares de datos EEMA-Intemperie son equivalentes en promedio. Los resultados de la Prueba de Tukey

para los índices de hidroxilo se encuentran tabulados en el Cuadro G.9 y se aprecian en la Figura 3.28.



**Figura 3.28.** Prueba de Tukey para los índices de hidroxilo de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie.

En la Figura 3.28, se observa que los pares de niveles equivalentes entre sí a un 5 % de significancia para los índices de hidroxilo son los siguientes:

- Los seis meses del EEMA con los tres meses del EEMA.
- Los tres meses a la intemperie con los tres meses del EEMA.
- Los seis meses a la intemperie con los tres meses del EEMA.
- Los doce meses a la intemperie con los tres meses del EEMA.
- Los tres meses a la intemperie con los seis meses del EEMA.
- Los seis meses a la intemperie con los seis meses del EEMA.
- Los tres meses, seis meses y doce meses a la intemperie entre sí.

El índice de hidroxilo se relaciona con la cantidad de humedad de una muestra asfáltica envejecida. Con base en ello y en los pares de niveles equivalentes mostrados anteriormente, se determinó que el EEMA puede simular de forma satisfactoria el nivel de humedad del

asfalto 0925-14 envejecido a la intemperie durante tres meses y seis meses, mediante 12 horas y 24 horas de ensayo respectivamente, para las condiciones meteorológicas del Valle Central. Por otro lado, si bien los tres meses del EEMA equiparan los doce meses a la intemperie para el índice de hidroxilo y, además, se presenta la misma equivalencia para el índice de carbonilo, no se recomienda la disminución de los tiempos de ensayo con base en un fundamento molecular exclusivo.

Lo anterior se debe a que el fenómeno del envejecimiento de los asfaltos es integral, es decir, acarrea cambios químicos y físicos como los estudiados en las secciones 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3 y 3.3.4, en los cuales se demostró que los tres meses del EEMA no reflejan avances tan significativos en el envejecimiento del asfalto en comparación con los doce meses equivalentes del EEMA.

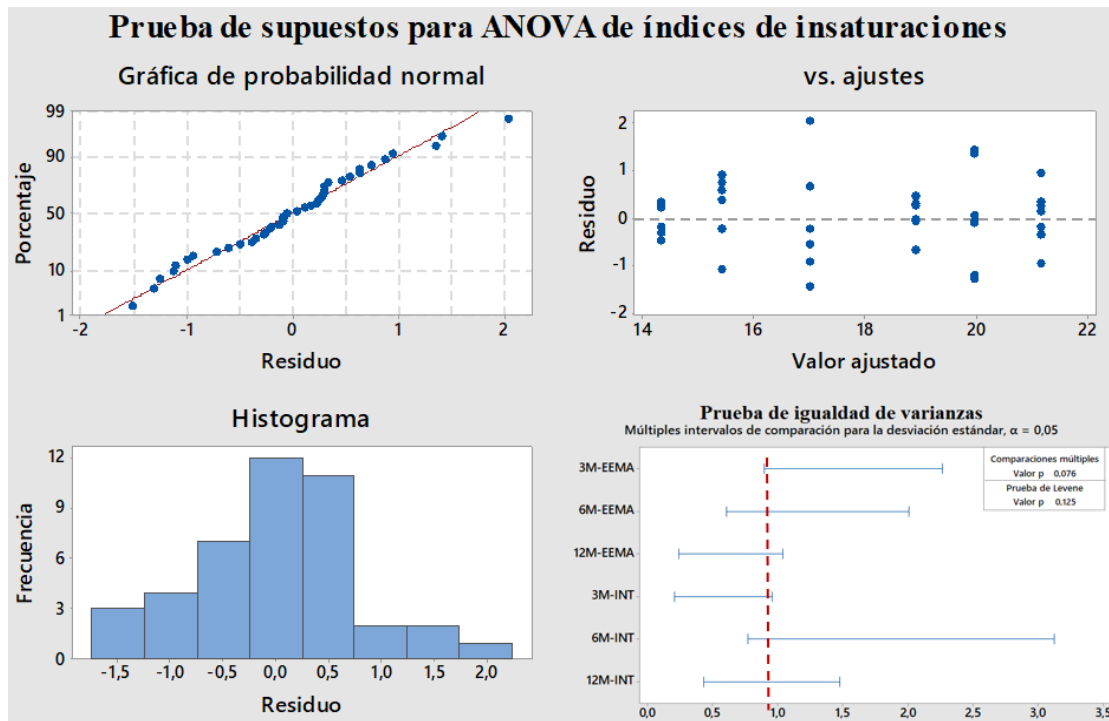
Con base en lo anterior se plantea que para los índices de hidroxilo para los doce meses del EEMA se pueden mejorar las técnicas de manipulación de las muestras para prevenir la pérdida de humedad y obtener resultados más confiables y aproximados al estado de las muestras recién procesadas en el EEMA.

Algunas acciones para ello son controlar la temperatura y humedad de la habitación en la cual se opera el EEMA, determinar el tiempo de secado previo a las cuantificaciones con FT-IR con el fin de evitar el sobre secado, estudiar el almacenamiento de muestras listas para cuantificar con FT-IR, entre otros.

### **c. Análisis del índice de insaturaciones**

En la Figura 3.29 se aprecian los estudios estadísticos para la comprobación de supuestos para el ANOVA por índice de insaturaciones.

Con base en la Figura 3.29, se determinó que los datos de índices de insaturaciones EEMA-Intemperie satisfacen los requisitos para la ejecución de un ANOVA, ya que los datos son normales, independientes y, mediante las pruebas de Comparaciones Múltiples y Levene se obtuvieron valores p de 0.076 y 0.125 respectivamente, lo cual valida la igualdad de varianzas por ser ambos valores mayores a la significancia establecida del 5 %.



**Figura 3.29.** Comprobación de los supuestos de independencia, normalidad e igualdad de varianza para los datos de los índices de insaturaciones de las muestras asfálticas envejecidas en el EEMA y a la intemperie.

Con base en lo anterior, se realizó un ANOVA cuyos resultados de Minitab® 18 se muestran en la Figura 3.30.

### ANOVA de un solo factor: 3M-EEMA; 6M-EEMA; ... ; 6M-INT; 12M-INT

#### Método

|                        |                                 |
|------------------------|---------------------------------|
| Hipótesis nula         | Todas las medias son iguales    |
| Hipótesis alterna      | No todas las medias son iguales |
| Nivel de significancia | $\alpha = 0,05$                 |

*Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.*

#### Información del factor

| Factor | Niveles | Valores   |
|--------|---------|---|
| Factor | 6       | 3M-EEMA; 6M-EEMA; 12M-EEMA; 3M-INT; 6M-INT; 12M-INT |

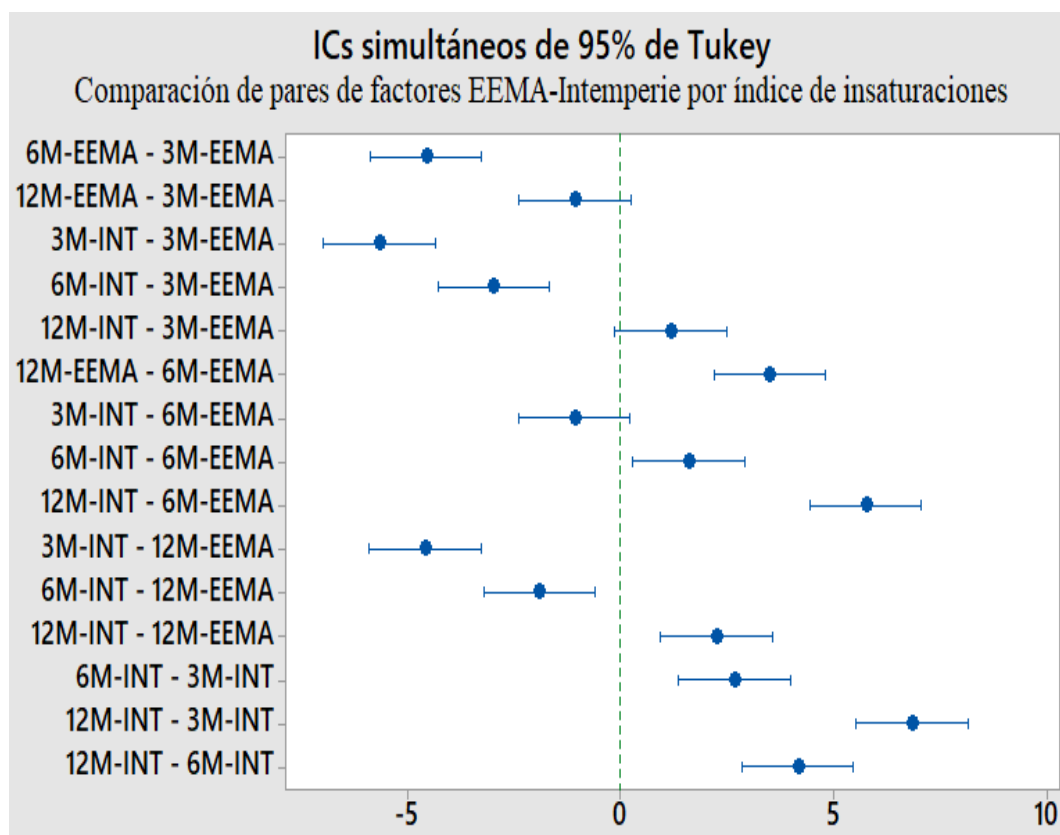
#### Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Factor | 5  | 249,03    | 49,8066   | 74,90   | 0,000   |
| Error  | 36 | 23,94     | 0,6650    |         |         |
| Total  | 41 | 272,97    |           |         |         |

**Figura 3.30.** Resultado del ANOVA aplicado a los índices de insaturaciones de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie para tres meses, seis meses y doce meses.

Con base en el valor p resaltado en la Figura 3.30, se concluye con un 5 % de significancia que existe al menos un par de medias diferentes en el conjunto de los datos de índice de insaturaciones EEMA-Intemperie.

Seguidamente, se aplicó una Prueba de Tukey, con el fin de determinar cuáles de los pares de datos EEMA-Intemperie son equivalentes en promedio. Los resultados de la Prueba de Tukey para los índices de insaturaciones se encuentran tabulados en el Cuadro G.10 y se aprecian en la Figura 3.31.



**Figura 3.31.** Prueba de Tukey para los índices de insaturaciones de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie.

En la Figura 3.31, se observa que los pares de niveles equivalentes entre sí a un 5 % de significancia para los índices de insaturaciones son los siguientes:

- Los tres meses del EEMA con los doce meses del EEMA.
- Los doce meses a la intemperie con los tres meses del EEMA.
- Los tres meses a la intemperie con los seis meses del EEMA.

El índice de insaturaciones se relaciona con los enlaces múltiples y los ciclos que existen en un espécimen. Con base en los pares de niveles equivalentes, se observa que el EEMA solo es capaz de equiparar los doce meses de envejecimiento a la intemperie, a través de 12 horas de ensayo y los tres meses a la intemperie mediante 24 horas de ensayos.

Lo anterior indica una inconsistencia entre los tiempos de ensayo y sus respectivas equivalencias; ello se debe a la definición del índice de insaturaciones y a la naturaleza global de los espectros IR.

Respecto a la definición del índice de insaturaciones (Ecuación 3.4), este se limita a las señales entre los  $1680\text{ cm}^{-1}$  –  $1420\text{ cm}^{-1}$  e ignora otros tipos de insaturaciones como las mostradas para las señales entre los  $3100\text{ cm}^{-1}$  –  $3020\text{ cm}^{-1}$  (ver Cuadro 3.3), entre otras.

Además, ya que los mecanismos de envejecimiento de la intemperie presentan variaciones a los empleados por el EEMA, se favorecen diferentes tipos de insaturaciones que influyen el valor del índice.

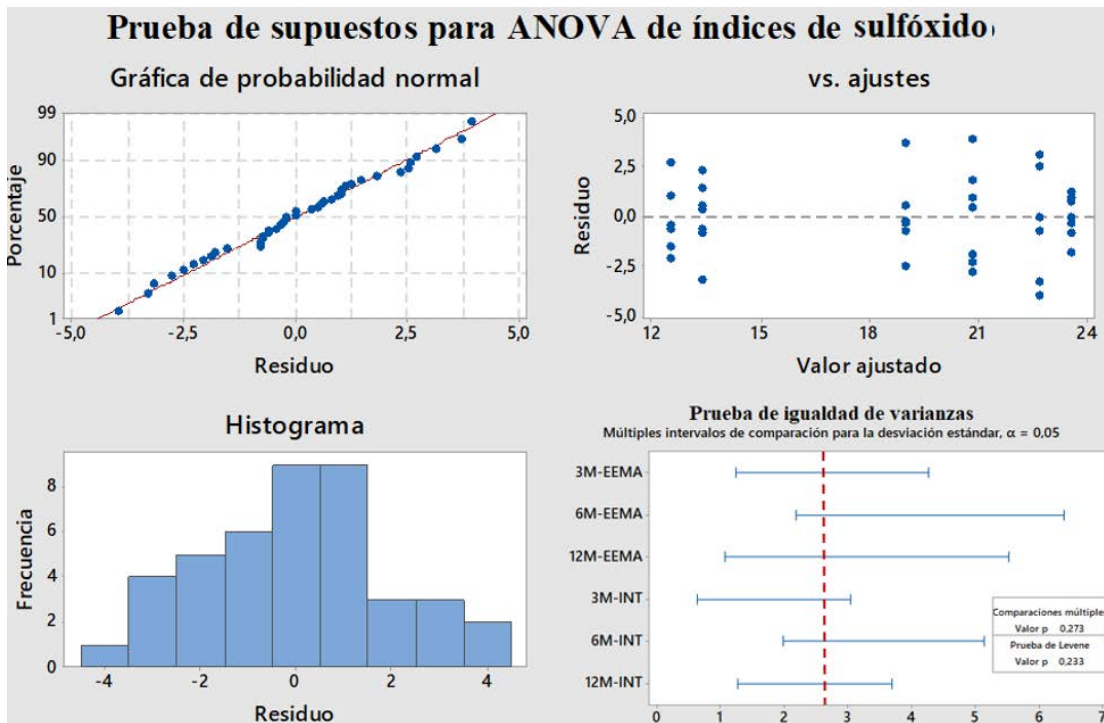
Por otro lado, la naturaleza global de los espectros IR (ver Figura 3.22) muestra señales adicionales para muestras envejecidas a la intemperie que los espectros de las muestras del EEMA no presentan. Ello influye en el valor del área total del espectro y, consecuentemente, en el valor del índice de insaturación.

#### **d. Análisis del índice de sulfóxido**

En la Figura 3.32 se aprecian los estudios estadísticos para la comprobación de supuestos para el ANOVA por índice de sulfóxido.

Con base en la Figura 3.32, se determinó que los datos de índices de sulfóxido EEMA-Intemperie satisfacen los requisitos para la ejecución de un ANOVA, ya que los datos son normales, independientes y, mediante las pruebas de Comparaciones Múltiples y Levene se obtuvieron valores p de 0.273 y 0.233 respectivamente, lo cual valida la igualdad de varianzas por ser ambos valores mayores a la significancia establecida del 5 %.





**Figura 3.32.** Comprobación de los supuestos de independencia, normalidad e igualdad de varianza para los datos de los índices de sulfóxido de las muestras asfálticas envejecidas en el EEMA y a la intemperie.

Con base en lo anterior, se realizó un ANOVA cuyos resultados de Minitab® 18 se muestran en la Figura 3.33.

### ANOVA de un solo factor: 3M-EEMA; 6M-EEMA; ... ; 6M-INT; 12M-INT

#### Método

Hipótesis nula            Todas las medias son iguales  
 Hipótesis alterna        No todas las medias son iguales  
 Nivel de significancia    $\alpha = 0,05$

*Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.*

#### Información del factor

| Factor | Niveles | Valores   |
|--------|---------|---|
| Factor | 6       | 3M-EEMA; 6M-EEMA; 12M-EEMA; 3M-INT; 6M-INT; 12M-INT |

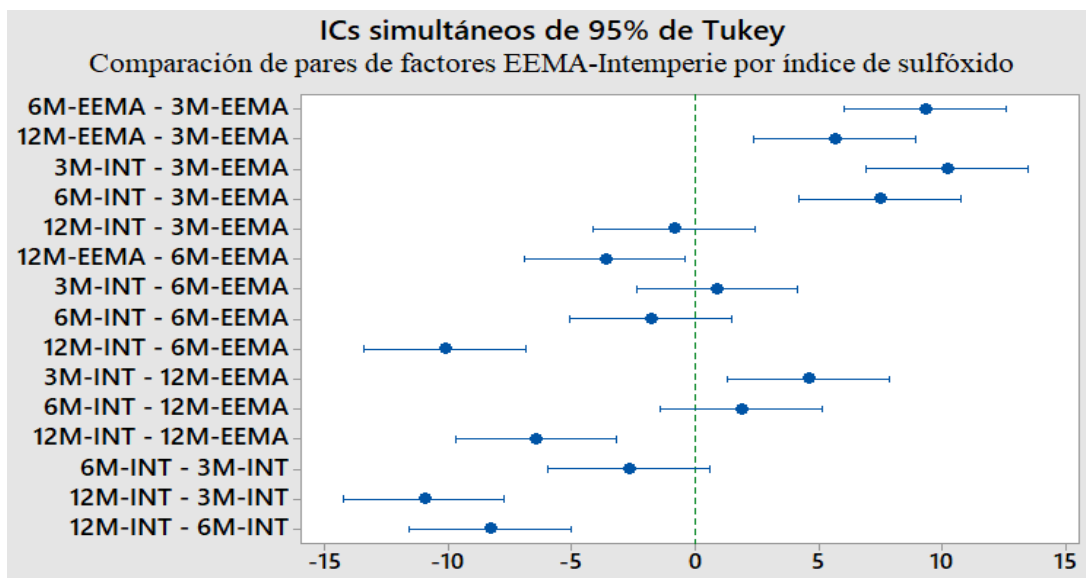
#### Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Factor | 5  | 773,3     | 154,650   | 37,18   | 0,000   |
| Error  | 36 | 149,8     | 4,160     |         |         |
| Total  | 41 | 923,0     |           |         |         |

**Figura 3. 33.** Resultado del ANOVA aplicado a los índices de sulfóxido de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie para tres meses, seis meses y doce meses.

Con base en el valor p resultado en la Figura 3.32, se concluye con un 5 % de significancia que existe al menos un par de medias diferentes en el conjunto de los datos de índice de sulfóxido EEMA-Intemperie.

Seguidamente, se aplicó una Prueba de Tukey, con el fin de determinar cuáles de los pares de datos EEMA-Intemperie son equivalentes en promedio. Los resultados de la Prueba de Tukey para los índices de sulfóxido se encuentran tabulados en el Cuadro G.11 y se aprecian en la Figura 3.34.



**Figura 3.34.** Prueba de Tukey para los índices de sulfóxido de las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA y a la intemperie.

En la Figura 3.34, se observa que los pares de niveles equivalentes entre sí a un 5 % de significancia para los índices de sulfóxido son los siguientes:

- Los doce meses a la intemperie con los tres meses del EEMA.
- Los tres meses a la intemperie con los seis meses del EEMA.
- Los seis meses a la intemperie con los seis meses del EEMA.
- Los seis meses a la intemperie con los doce meses del EEMA.
- Lo seis meses a la intemperie con los tres meses a la intemperie.

Como se aprecia en la Figura 3.22, el incremento de las señales de sulfóxidos es considerablemente mayor para las muestras envejecidas a la intemperie que para las muestras

envejecidas en el EEMA. Ello permite inferir que el incremento de las señales de sulfóxidos y, consecuentemente, del índice de sulfóxido no se relaciona puntualmente a los parámetros que emplea el EEMA.

Seguidamente, se plantea que el incremento de sulfóxidos está relacionado la incorporación de contaminantes provenientes del entorno en el asfalto. El fundamento de la teoría anterior radica en el contenido de sulfatos, sulfitos y otros compuestos a base de azufre que se encuentran en las emisiones de vehículos y en la lluvia.

La teoría anterior concuerda con los resultados obtenidos en el EEMA, puesto que el agua que se empleó para los ensayos era potable de la tubería del laboratorio y dentro del equipo no se incluyó algún flujo gaseoso de combustible quemado.

Pese a lo expuesto con antelación, existen equivalencias estadísticas entre algunos de los índices de sulfóxido del EEMA y la intemperie, como se muestra en la Figura 3.34. Lo anterior permite inferir que un ajuste en los tiempos ensayo y la adición de otros parámetros como la acidez del agua o un flujo gaseoso de un combustible quemado como el diésel, que posee alrededor de 15 ppm de azufre (RECOPE, 2020), pueden mejorar la capacidad de futuros prototipos del EEMA para simular condiciones de asfaltos en servicio a la intemperie.

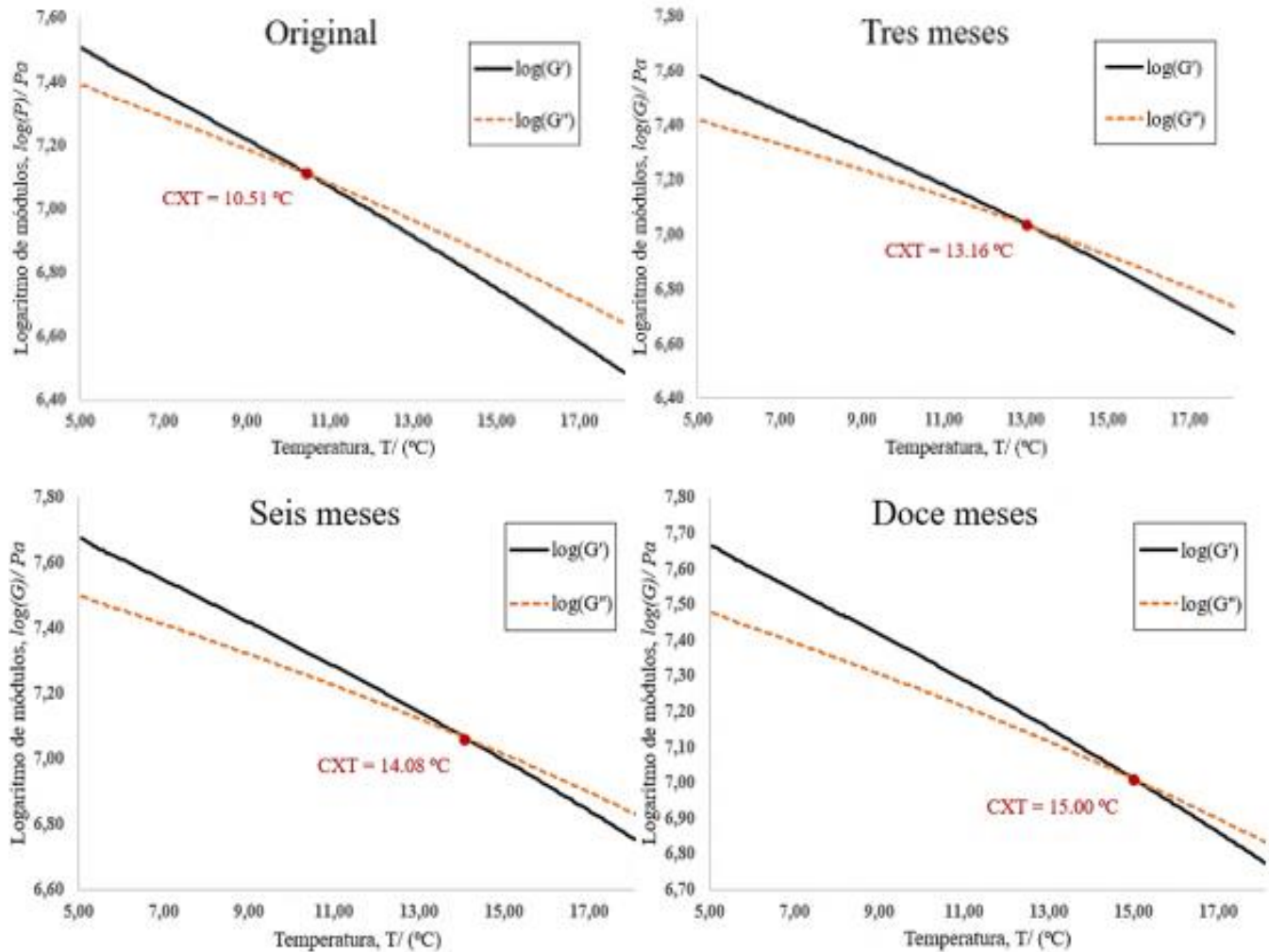
Adicionalmente, con base en los resultados obtenidos de los espectros IR, se determinó que los ciclos de envejecimiento ejecutados en el EEMA brindan mayor selectividad al incremento de carbonilos y fomenta los mecanismos de envejecimiento de los asfaltos por pérdida de volátiles, oxidación y polimerización.

### **3.3.6. Análisis de datos CXT**

La sección de los datos recabados de las muestras asfálticas 0925-14 mediante el DSR que contienen los valores de CXT a distintos tiempos equivalentes de envejecimiento en el EEMA, se tabularon los Cuadros G.2, G.3, G.4 y G.5.

Adicionalmente, en la Figura 3.35, se observan los gráficos de los logaritmos de las componentes viscosa ( $G''$ ) y elástica ( $G'$ ) contra la temperatura para las muestras de asfalto 0925-14 envejecidas en el EEMA. Las gráficas representan la totalidad de los datos obtenidos

en el DSR. Como valores CXT de comparación, para las muestras de asfalto 0925-14 envejecidas a la intemperie en los experimentos de Baldi *et al.* (2017) se midieron valores de 23.4 °C para seis meses y de 30.3 °C para un año.



**Figura 3.35.** Curvas de las componentes elástica y viscosa contra temperatura para muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA.

Con base en los valores de CXT de la Figura 3.35, se determinaron dos posibles planteamientos respecto al desempeño del EEMA al simular la intemperie. El primero consiste en que el EEMA no fue capaz de simular los efectos reológicos del envejecimiento de los asfaltos a la intemperie, por lo que el mecanismo de envejecimiento de la tixotropía (Figura 1.3), la cual corresponde al endurecimiento estérico producido por cambios en las fuerzas intermoleculares del asfalto, no fue predominante en las condiciones del EEMA.

Sobre el supuesto mencionado anteriormente, no se cuenta con suficiente evidencia para determinar que los alcances de envejecimiento del EEMA en las propiedades reológicas de los asfaltos no son suficientes en comparación con los cambios de la intemperie.

Lo anterior se explica con base en el segundo planteamiento, el cual refiere a las propiedades físicas de las mezclas. Un ejemplo de ello es el punto de fusión de una mezcla binaria: el punto de fusión de una mezcla binaria se encuentra entre los puntos de fusión de sus componentes puros (Çengel & Boles, 2012), de hecho, cuando se determina la pureza de un sólido conocido mediante el punto de fusión, si este resulta un valor inferior al teórico se infiere la presencia de impurezas.

La aplicabilidad del segundo planteamiento radica en el proceso de muestreo del asfalto envejecido para los ensayos en el DSR descrito en el apartado 3.2.9, en el cual se toman placas circulares de aproximadamente 5 mm de espesor similares a la mostrada en la Figura 3.14.c, en donde se aprecia que la cara interna de la placa luce como asfalto sin envejecer y para la Figura 3.14.b se observa la capa externa envejecida y con un mayor grado de opacidad.

Seguidamente, los resultados recabados en la sección 3.3.5 permitieron determinar un cambio en los grupos químicos de las muestras asfálticas originales debido al tratamiento en EEMA, por lo que se plantea una aproximación a las propiedades físicas de las mezclas, en donde, la CXT es la propiedad física y los componentes de la mezcla son: asfalto 0925-14 sin envejecer y asfalto 0925-14 envejecido.

Adicionalmente, según la Figura 3.35, la CXT del asfalto original es de 10.51 °C, lo que establece un límite inferior y los valores de CXT para tres meses, seis meses y doce meses corresponden a valores de mezcla.

Lo propuesto con antelación se sustenta en la estructura microscópica de los asfaltos (Figura 3.17), donde para los tres meses y los seis meses no se aprecia un espesor diferenciante entre la capa envejecida y la de AAI; para los especímenes de un año equivalente en el EEMA, apenas es perceptible un espesor de diferencia entre la capa envejecida y la de AAI, por lo que

afirma que en el proceso de muestreo, la mayor parte de la masa que se extrajo responde a AAI.

Finalmente, cuando se comparan los valores de CXT obtenidos de las muestras del EEMA (1 cm de espesor) contra los valores de las muestras a la intemperie (1 mm de espesor) de Baldi *et al.* (2017), el espesor de la muestra es bastante diferente entre ambos ensayos, lo cual indica que las muestras envejecidas a la intemperie “agotan” el mecanismo de envejecimiento de la Figura 3.18, ya que con cada acumulación el AAI se transforma en asfalto envejecido y se pierde esa transferencia de masa, que en contraste para las muestras del EEMA se posee una mayor cantidad de AAI disponible que prolonga el proceso de envejecimiento.



### 3.4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en los estudios realizados para el evaluar el desempeño del EEMA en el envejecimiento de muestras asfálticas 0925-14, se concluyeron los siguientes aspectos:

- Con base en las imágenes SEM de las muestras se observó formación de granos superficiales y la separación de placas granulares sobre asfalto aparentemente intacto, respectivamente, lo que indica movimientos de acumulación y desplazamiento de asfalto envejecido.
- Se definió que el mecanismo físico de envejecimiento superficial de las muestras ocurre por descamación cuando una capa externa de asfalto envejecido no puede mantener la tensión superficial y cede a los movimientos de desplazamiento por la diferencia de densidad en las muestras debido al gradiente de temperatura.
- Con base en las imágenes SEM de las muestras se propone el concepto de micro fatiga superficial, el cual responde a la aparición de fisuras en una capa externa de asfalto envejecido debido a la incapacidad de mantener la tensión superficial.
- Se determinó que la técnica de espectroscopía con radiación magnética nuclear (RMN) no es aplicable al estudio del envejecimiento en muestras asfálticas.
- Los resultados de EDX, FT-IR y la evaluación física de los especímenes sugieren que los ensayos en el EEMA producen el envejecimiento de muestras asfálticas a través de los mecanismos de tixotropía, pérdida de volátiles, oxidación y polimerización radicalaria.
- Se encontró que la oxidación producida en el EEMA a las condiciones ensayadas logró equiparar los indicadores de carbonilo e hidroxilo para muestras de asfalto envejecido a la intemperie en el Valle Central. Sin embargo, se encontró que el EEMA es limitado para igualar los indicadores de sulfóxido e insaturaciones de asfaltos oxidados a la intemperie.
- Los resultados del CXT luego de los ensayos en el EEMA presentaron valores menores a los esperados, aun para las muestras de un año equivalente. Sin embargo, esto sugiere que el EEMA produce una oxidación a nivel superficial, lo que sugiere que las muestras



empleadas poseen un espesor grande, que no es adecuado para la cuantificación del CXT para el asfalto exclusivamente envejecido.

Con base en el proceso de evaluación del desempeño del EEMA en el envejecimiento de muestras asfálticas, se recomiendan los siguientes aspectos:

- Se recomienda emplear muestras de menor espesor en el EEMA, con el fin de prevenir muestreos que contengan asfalto sin envejecimiento que pueda perturbar las mediciones del envejecimiento.
- Se recomienda explorar métodos de almacenamiento de muestras de previo a mediciones de envejecimiento, con el fin de evitar alterar el estado original de las muestras luego del EEMA.
- Se sugiere medir la masa de los especímenes antes y después de los ensayos en el EEMA con el fin de estudiar las posibles variaciones de masa en relación con los efectos del envejecimiento medidos en las muestras.
- Se recomienda estudiar la micro fatiga superficial del asfalto envejecido y su susceptibilidad a la difusión del agua, ya que puede permitir comprender mejor el mecanismo del daño por humedad en pavimentos asfálticos a la intemperie.
- Se recomienda emplear otros tipos de muestras en el EEMA como pavimentos asfálticos u otro tipo de asfalto, con el fin de explorar los alcances del EEMA para simular el envejecimiento.

### 3.5. NOMENCLATURA

#### Siglas

|                     |   |
|---------------------|---|
| AAI                 | Asfalto aparentemente intacto   |
| AASHTO              | <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> |
| ANOVA               | Análisis de varianza  |
| ASTM                | <i>American Society for Testing Materials</i>                             |
| CIEMIC              | Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas                      |
| CXT                 | Temperatura de entrecruzamiento, °C                                       |
| DSR                 | Reómetro de corte dinámico  |
| EDX                 | Espectroscopía de Rayos X de Energía Dispersiva                           |
| EEMA                | Equipo de envejecimiento por meteorización de los asfaltos                |
| FT-IR               | Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier                     |
| ICMM                | Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid                              |
| IR                  | Infrarrojo  |
| KOP                 | Esquema de contactos  |
| NEMA                | <i>National Environment Management Authority</i>                          |
| NO                  | Pulsador normalmente abierto  |
| NPT                 | <i>National Pipe Thread</i>   |
| PAV                 | <i>Pressure Aging Vessel</i>  |
| PLC                 | Controlador lógico programable  |
| RMN                 | Espectroscopía de Radiación Magnética Nuclear                             |
| RMN-C <sup>13</sup> | Espectroscopía de Radiación Magnética Nuclear para Carbono 13             |
| RMN-H               | Espectroscopía de Radiación Magnética Nuclear para Hidrógeno              |
| RTFO                | <i>Rolling Thin Film Oven</i>   |
| SARA                | Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos                               |
| SEM                 | Microscopía electrónica de barrido  |
| SP                  | <i>Set point</i>  |
| UDF                 | Función personalizada   |
| UV                  | Ultravioleta  |
| UVC                 | Ultravioleta C  |

#### Mayúsculas

|                        |   |
|------------------------|---|
| A                      | Réplica 1 de muestra asfáltica para ensayo a tres meses equivalentes en el EEMA |
| A <sub>1050</sub>      | Área del pico de sulfóxidos 2, cm <sup>2</sup>                                  |
| A <sub>1350-1170</sub> | Área del pico de sulfóxidos 1, cm <sup>2</sup>                                  |
| A <sub>1500-1420</sub> | Área del pico de insaturaciones 2, cm <sup>2</sup>                              |

|                 |   |
|-----------------|---|
| $A_{1680-1550}$ | Área del pico de insaturaciones 1, $cm^2$                                       |
| $A_{1780-1650}$ | Área del pico de carbonilo, $cm^2$  |
| $A_{3650-3200}$ | Área del pico de hidroxilo, $cm^2$  |
| $A_{total}$     | Área total de picos de un espectro infrarrojo, $cm^2$                           |
| B               | Réplica 1 de muestra asfáltica para ensayo a seis meses equivalentes en el EEMA |
| C               | Réplica 1 de muestra asfáltica para ensayo a doce meses equivalentes en el EEMA |
| D               | Diámetro de portamuestras, $cm$   |
| D               | Réplica 2 de muestra asfáltica para ensayo a tres meses equivalentes en el EEMA |
| E               | Espesor objetivo, $cm$  |
| E               | Réplica 2 de muestra asfáltica para ensayo a seis meses equivalentes en el EEMA |
| F               | Réplica 2 de muestra asfáltica para ensayo a doce meses equivalentes en el EEMA |
| G'              | Módulo elástico, $Pa$   |
| G''             | Módulo viscoso, $Pa$  |
| $H_1$           | Hipótesis alternativa   |
| $H_0$           | Hipótesis nula  |
| $I_{C=O}$       | Índice de carbonilo, $adim$   |
| $I_{Insat}$     | Índice de insaturaciones, $adim$  |
| $I_{OH}$        | Índice de hidroxilo, $adim$   |
| $I_{S=O}$       | Índice de sulfóxido, $adim$   |
| $M_{req}$       | Masa requerida para el espesor objetivo, $g$                                    |
| O               | Muestra asfáltica original para ensayos en el EEMA                              |
| T               | Temperatura, $^{\circ}C$  |
| $T_1$           | Temperatura inferior a la CXT, $^{\circ}C$                                      |
| $T_2$           | Temperatura superior a la CXT, $^{\circ}C$                                      |

### Minúsculas

|    |                                    |
|----|------------------------------------|
| t  | Tiempo de exposición, <i>meses</i> |
| wt | Composición másica elemental, %    |

### Griegas

|                  |  |
|------------------|--|
| $\delta$         | Desplazamiento químico, <i>ppm</i>                   |
| $\theta_1$       | Ángulo de fase inferior a $45^{\circ}$ , <i>adim</i> |
| $\theta_2$       | Ángulo de fase superior a $45^{\circ}$ , <i>adim</i> |
| $\mu$            | Media de un conjunto de datos                        |
| $\rho_{asfalto}$ | Densidad del asfalto, $g/cm^3$                       |
| $\Phi$           | Ángulo de fase, <i>adim</i>                          |

### Subíndices

|   |                                    |
|---|------------------------------------|
| 1 | Indica alternativa cuando va con H |
|---|------------------------------------|

|           |   |
|-----------|---|
| 1         | Indica valor inferior cuando va con T o $\theta$  |
| 2         | Indica valor superior cuando va con T o $\theta$  |
| 1050      | Indica dicho valor como señal en el espectro IR   |
| 1350-1170 | Indica dicho rango como señales en el espectro IR |
| 1500-1420 | Indica dicho rango como señales en el espectro IR |
| 1680-1550 | Indica dicho rango como señales en el espectro IR |
| 1780-1650 | Indica dicho rango como señales en el espectro IR |
| 3650-3200 | Indica dicho rango como señales en el espectro IR |
| C=O       | Indica carbonilo                                  |
| Insat     | Indica insaturaciones                             |
| o         | Indica nula cuando va con H                       |
| o         | Indica nominal cuando va con P                    |
| OH        | Indica hidroxilo                                  |
| req       | Indica el valor requerido                         |
| S=O       | Indica sulfóxido                                  |



### 3.6. BIBLIOGRAFÍA

- ASTM. (2015). Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D7175-15>. Copyright
- ASTM. (2019c). Standard Practice for Preparation of Test Panels for Accelerated and Outdoor Weathering of Bituminous Coatings. ASTM International, ASTM D1669. <https://doi.org/10.1520/D1669>
- Atencia, O. (2011). Procesos de Oxidación de Asfaltos Colombianos en Inmersión Bajo Agua. Pontificia Universidad Javeriana.
- Baldi, A. and Villegas, R. and Aguiar, J. and Loría, L. (2017). Evaluación de la oxidación de asfaltos mediante ensayos acelerados y condiciones reales de campo. Congreso Ibero-Latinoamericano Del Asfalto (XIXCILA).
- Bruice, P. (2008). Química Orgánica (Quinta edi). Pearson, Prentice Hall.
- Çengel, Y., & Boles, M. (2012). Termodinámica (7th ed.). McGraw Hill.
- Delgado, J. G. (2006). Asfaltos composición, agregación, precipitación. laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos. In Cuadernos FIRP (1st ed., Vol. 1). Universidad de los Andes.
- Groenzin, H.; Mullins, O. C. (1999). Asphaltene molecular size and structure. *The Journal of Physical Chemistry*, 103(50), 11237–11245.
- Guerrero, L. (2013). CIEMic adquiere microscopio de última generación. Universidad de Costa Rica. <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2013/12/22/ciemic-adquiere-microscopio-de-ultima-generacion.html>
- Gutiérrez, H., & De la Vara, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos (Segunda ed). McGraw Hill.
- ICMM. (2010). Principios generales de la Microscopía Electrónica de Barrido (Scanning Electron Microscope, SEM). Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid Laboratorio de Microscopía, España, 3. <https://www.icmm.csic.es/es/divulgacion/posters/FOTON-Materiales opticos1.pdf>
- Kathari, P. M. (2016). Rheological Properties of Polypropylene Reinforced Asphalt Binder. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 78, 109–126. <https://doi.org/10.1007/s40515-016-0033-3>
- LanammeUCR. (2017). Estudio del proceso físico-químico de la oxidación y su incidencia en el daño por humedad de asfaltos. Unidad de Materiales y Pavimentos (UMP).
- LanammeUCR. (2019). Catálogo de ensayos de materiales para pavimentos. Universidad de Costa Rica.

[https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1623/R\\_catalogo\\_materiales\\_pavimentos.pdf?sequence=9](https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/1623/R_catalogo_materiales_pavimentos.pdf?sequence=9)

- Mazumder, M., Ahmed, R., Wajahat, A., & Lee, S. (2018). SEM and ESEM techniques used for analysis of asphalt binder and mixture : A state of the art review. *Construction and Building Materials*, 186, 313–329. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.126>
- Mogk, D. (2022). X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS; aka Electron Spectroscopy for Chemical Analysis, ESCA). Montana State University. [https://serc.carleton.edu/msu\\_nanotech/methods/xps.html](https://serc.carleton.edu/msu_nanotech/methods/xps.html)
- Nciri, N., Kim, N., & Cho, N. (2017). New insights into the effects of styrene-butadiene-styrene polymer modifier on the structure , properties , and performance of asphalt binder : The case of AP-5 asphalt and solvent deasphalting pitch. *Materials Chemistry and Physics*, 193, 477–495. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.03.014>
- Potts, P. (2005). X-Ray Fluorescence and emission: X-ray Fluorescence Theory. In *Encyclopedia of Analytical Science* (2nd ed., pp. 408–418). Elsevier.
- Rojas, G. (2020). Implementación de protocolo de análisis en laboratorio de materiales antioxidantes para el asfalto. Universidad de Costa Rica.
- Shi, P., Dai, Z., Zhu, H., Gao, Q., Li, X., & Shen, J. (2019). Nanoscaled Characteristics of Recovered Asphalt Binders from Weathered Asphalt Mixtures. *Journal of Testing and Evaluation*, 47(5), 20180340. <https://doi.org/10.1520/jte20180340>
- Shriner, R. L., Hermann, C. K. F., Morrill, T. C., Curtin, D. Y., & Fuson, R. C. (2004). *The Systematic Identification of Organic Compounds* (8th ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Speight, J. G. (1984). *Characterization of Heavy Crude Oils and Petroleum Residues*. S. Kaliaguine and A. Mahay, Elsevier.
- ThermoFisher. (2022). Energy Dispersive Spectroscopy: Energy dispersive X-ray spectroscopy elemental mapping for reliable chemical characterization. ThermoFisher Scientific: Materials Science. <https://www.thermofisher.com/cr/en/home/materials-science/eds-technology.html>
- Vargas, X., & Reyes, F. (2010). El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *Ingeniería e Investigación*, 30(3), 27–44.
- Verani, A., Sihombing, R., Sugeng, B., Susanto, E., & Yamin, A. (2020). Chemical , morphological , and high temperature rheological behaviour of Bioasbuton as an alternative binder for asphalt concrete in Indonesia. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.006>
- Verani, A., Sihombing, R., Sugeng, B., Susanto, E., & Yamin, A. (2020). Chemical , morphological , and high temperature rheological behaviour of Bioasbuton as an alternative binder for asphalt concrete in Indonesia. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.006>

- Villegas, E. (2020). El fenómeno de la deformación permanente y la evolución de ensayos en ligantes asfálticos. *Boletín Técnico: PITRA-LanammeUCR*, 11(6), 1–10. [https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/2098/Boletin\\_6\\_El\\_fenomeno\\_de\\_la\\_deformacion\\_permanente\\_y\\_la\\_evolucion\\_de\\_ensayos\\_en\\_ligantes\\_asfalticos.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/2098/Boletin_6_El_fenomeno_de_la_deformacion_permanente_y_la_evolucion_de_ensayos_en_ligantes_asfalticos.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Villegas-Villegas, R. E., Baldi-Sevilla, A., Aguiar-Moya, J. P., & Loria-Salazar, L. (2018). Analysis of asphalt oxidation by means of accelerated testing and environmental conditions. *Transportation Research Record*, 2672(28), 244–255. <https://doi.org/10.1177/0361198118777630>





### 3.7. APÉNDICES

#### Apéndice F: Datos experimentales de evaluación del EEMA

**Cuadro F. 1.** Datos de composición elemental de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA obtenidos mediante EDX.

| Elemento     | Composición elemental a tres meses, wt/ (%) |        |        | Composición elemental a seis meses, wt/ (%) |        |        | Composición elemental a doce meses, wt/ (%) |        |        |
|--------------|---|--------|--------|---|--------|--------|---|--------|--------|
|              | R1  | R2     | R3     | R1  | R2     | R3     | R1  | R2     | R3     |
| C            | 85.244                                      | 85.348 | 85.976 | 82.926                                      | 84.893 | 82.884 | 73.097                                      | 72.008 | 72.026 |
| O            | 10.940                                      | 10.727 | 9.780  | 12.247                                      | 10.383 | 12.880 | 26.696                                      | 27.69  | 27.722 |
| Al           | 0.211                                       | 0.144  | 0.148  | 0.265                                       | 0.216  | 0.150  | 0.207                                       | 0.168  | 0.155  |
| Si           | 0.069                                       | 0.066  | 0.107  | 0.000                                       | 0.100  | 0.099  | 0.000                                       | 0.135  | 0.098  |
| S            | 3.445                                       | 3.645  | 3.911  | 4.412                                       | 4.406  | 3.988  | 0.000                                       | 0      | 0      |
| Ca           | 0.091                                       | 0.071  | 0.078  | 0.000                                       | 0.000  | 0.000  | 0.000                                       | 0.000  | 0.000  |
| <b>Total</b> | 100.0                                       | 100.0  | 100.0  | 99.9  | 100.0  | 100.0  | 100.0                                       | 100.0  | 100.0  |

En los siguientes cuadros se colocan la sección de los datos experimentales que contienen la CXT de las muestras asfálticas 0925-14 debido a la cantidad de datos que brindó el DSR.

**Cuadro F. 2.** Datos reológicos experimentales del DSR para la temperatura de CXT del asfalto 0925-14 original previo al envejecimiento en el EEMA.

| Logaritmo del módulo elástico, $\log(G')/ (Pa)$ | Logaritmo del módulo viscoso, $\log(G'')/ (Pa)$ | Temperatura, $T/ (^\circ C)$ | Ángulo de Fase, $\Phi/ (adim)$ |
|---|---|------------------------------|--------------------------------|
| 7.1161  | 7.1135  | 10.3850                      | 44.8276                        |
| 7.1123  | 7.1107  | 10.4400                      | 44.8967                        |
| 7.1083  | 7.1078  | 10.4850                      | 44.9678                        |
| 7.1045  | 7.1050  | 10.5400                      | 45.0367                        |
| 7.1005  | 7.1020  | 10.5900                      | 45.1042                        |
| 7.0967  | 7.0993  | 10.6400                      | 45.1727                        |

**Cuadro F. 3.** Datos reológicos experimentales del DSR para la temperatura de CXT del asfalto 0925-14 envejecido en el EEMA a tres meses equivalentes.

| Logaritmo del módulo elástico, $\log(G')/ (Pa)$ | Logaritmo del módulo viscoso, $\log(G'')/ (Pa)$ | Temperatura, $T/ (^\circ C)$ | Ángulo de Fase, $\Phi/ (adim)$ |
|---|---|------------------------------|--------------------------------|
| 7.0382  | 7.0355  | 13.0200                      | 44.8217                        |
| 7.0346  | 7.0329  | 13.0700                      | 44.8877                        |
| 7.0309  | 7.0302  | 13.1200                      | 44.9534                        |
| 7.0271  | 7.0274  | 13.1700                      | 45.0167                        |

**Cuadro F.3. (Continuación)** Datos reológicos experimentales del DSR para la temperatura de CXT del asfalto 0925-14 envejecido en el EEMA a tres meses equivalentes.

| Logaritmo del módulo elástico, $\log(G')$ / (Pa) | Logaritmo del módulo viscoso, $\log(G'')$ / (Pa) | Temperatura, $T$ / (°C) | Ángulo de Fase, $\Phi$ / (adim) |
|--|--|-------------------------|---------------------------------|
| 7.0237   | 7.0249   | 13.2250                 | 45.0787                         |
| 7.0198   | 7.0220   | 13.2750                 | 45.1439                         |

**Cuadro F. 4.** Datos reológicos experimentales del DSR para la temperatura de CXT del asfalto 0925-14 envejecido en el EEMA a seis meses equivalentes.

| Logaritmo del módulo elástico, $\log(G')$ / (Pa) | Logaritmo del módulo viscoso, $\log(G'')$ / (Pa) | Temperatura, $T$ / (°C) | Ángulo de Fase, $\Phi$ / (adim) |
|--|--|-------------------------|---------------------------------|
| 7.0747   | 7.0721   | 13.9550                 | 44.8329                         |
| 7.0703   | 7.0689   | 14.0100                 | 44.9079                         |
| 7.0669   | 7.0664   | 14.0500                 | 44.9675                         |
| 7.0633   | 7.0637   | 14.1150                 | 45.0292                         |
| 7.0594   | 7.0609   | 14.1600                 | 45.0954                         |
| 7.0554   | 7.0579   | 14.2200                 | 45.1637                         |

**Cuadro F. 5.** Datos reológicos experimentales del DSR para la temperatura de CXT del asfalto 0925-14 envejecido en el EEMA a doce meses equivalentes.

| Logaritmo del módulo elástico, $\log(G')$ / (Pa) | Logaritmo del módulo viscoso, $\log(G'')$ / (Pa) | Temperatura, $T$ / (°C) | Ángulo de Fase, $\Phi$ / (adim) |
|--|--|-------------------------|---------------------------------|
| 7.0187   | 7.0165   | 14.8900                 | 44.8573                         |
| 7.0149   | 7.0137   | 14.9400                 | 44.9189                         |
| 7.0113   | 7.0110   | 14.9850                 | 44.9819                         |
| 7.0075   | 7.0081   | 15.0400                 | 45.0451                         |
| 7.0039   | 7.0055   | 15.0850                 | 45.1072                         |
| 7.0003   | 7.0029   | 15.1450                 | 45.1690                         |

**Cuadro F. 6.** Áreas de picos según la longitud de onda de los espectros IR de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA (Parte 1).

| Tiempo, $t$ / (meses) | Especimen | Réplica | Longitud de Onda, $\text{cm}^{-1}$ |           |           |             |           |           |
|-----------------------|-----------|---------|------------------------------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|
|                       |           |         | 3650-3200                          | 3100-3020 | 2960-2850 | 2820 y 2720 | 1780-1650 | 1680-1550 |
| 0                     | 925-O     | 1       | 0.0000                             | 0.0000    | 11.6640   | 0.0000      | 0.0000    | 0.6850    |
| 0                     | 925-O     | 2       | 0.0000                             | 0.0000    | 11.9420   | 0.0000      | 0.0000    | 0.9050    |

**Cuadro F.6. (Continuación)** Áreas de picos según la longitud de onda de los espectros IR de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA (Parte 1).

| Tiempo,<br><i>t</i> / (meses) | Especimen | Réplica | Longitud de Onda, cm <sup>-1</sup> |               |               |                |               |               |
|-------------------------------|-----------|---------|------------------------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
|                               |           |         | 3650-<br>3200                      | 3100-<br>3020 | 2960-<br>2850 | 2820 y<br>2720 | 1780-<br>1650 | 1680-<br>1550 |
| 0                             | 925-O     | 3       | 0.0000                             | 0.0000        | 12.0170       | 0.0000         | 0.0000        | 0.7060        |
| 0                             | 925-O     | 4       | 0.0000                             | 0.0000        | 11.9150       | 0.0000         | 0.0000        | 0.7800        |
| 0                             | 925-O     | 5       | 0.0000                             | 0.0000        | 11.9000       | 0.0000         | 0.0000        | 0.7150        |
| 0                             | 925-O     | 6       | 0.0000                             | 0.0000        | 11.9410       | 0.0000         | 0.0000        | 0.9050        |
| 0                             | 925-O     | 7       | 0.0000                             | 0.0000        | 11.8940       | 0.0000         | 0.0000        | 0.7490        |
| 3                             | 925-A     | 1       | 8.5360                             | 0.0500        | 8.5560        | 0.0000         | 1.1450        | 2.1840        |
| 3                             | 925-A     | 2       | 7.2100                             | 0.0330        | 8.4990        | 0.0000         | 0.8940        | 2.3080        |
| 3                             | 925-D     | 3       | 6.8077                             | 0.0432        | 8.6890        | 0.0000         | 1.6770        | 1.7380        |
| 3                             | 925-D     | 4       | 5.3003                             | 0.0382        | 9.2490        | 0.0000         | 1.2249        | 1.5447        |
| 3                             | 925-A     | 5       | 5.5765                             | 0.0269        | 9.4080        | 0.0000         | 0.9690        | 1.7470        |
| 3                             | 925-A     | 6       | 4.6921                             | 0.0353        | 7.6170        | 0.0000         | 1.0040        | 1.3530        |
| 3                             | 925-D     | 7       | 6.8833                             | 0.0421        | 8.5920        | 0.0000         | 1.5630        | 1.6870        |
| 6                             | 925-E     | 1       | 6.2190                             | 0.0510        | 8.0490        | 0.0000         | 3.5870        | 1.3570        |
| 6                             | 925-E     | 2       | 7.8186                             | 0.0535        | 6.9300        | 0.0000         | 5.2120        | 1.3220        |
| 6                             | 925-B     | 3       | 8.2595                             | 0.0687        | 7.3180        | 0.0000         | 5.2230        | 1.4460        |
| 6                             | 925-B     | 4       | 5.7957                             | 0.0460        | 8.5180        | 0.0000         | 3.6850        | 1.1330        |
| 6                             | 925-E     | 5       | 6.0050                             | 0.0440        | 7.9400        | 0.0000         | 3.7570        | 1.3490        |
| 6                             | 925-E     | 6       | 7.0170                             | 0.0520        | 6.8400        | 0.0000         | 4.1000        | 1.4280        |
| 6                             | 925-B     | 7       | 7.4510                             | 0.1520        | 8.0880        | 0.0000         | 3.9980        | 1.3220        |
| 12                            | 925-C     | 1       | 4.0776                             | 0.0567        | 8.7420        | 0.0326         | 1.4802        | 1.7915        |
| 12                            | 925-C     | 2       | 3.4746                             | 0.0488        | 9.6120        | 0.0320         | 1.4950        | 1.3280        |
| 12                            | 925-C     | 3       | 4.2428                             | 0.0419        | 9.3430        | 0.0260         | 1.6250        | 1.4110        |
| 12                            | 925-F     | 4       | 3.9450                             | 0.0347        | 9.3960        | 0.0270         | 1.4840        | 1.3370        |
| 12                            | 925-F     | 5       | 4.5143                             | 0.0350        | 9.2030        | 0.0270         | 1.4740        | 1.3720        |
| 12                            | 925-F     | 6       | 5.4158                             | 0.0581        | 9.0230        | 0.0320         | 1.6030        | 1.5220        |
| 12                            | 925-F     | 7       | 3.4690                             | 0.0327        | 9.5040        | 0.0270         | 1.4820        | 1.3170        |

**Cuadro F. 7.** Áreas de picos según la longitud de onda de los espectros IR de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA (Parte 2).

| Tiempo,<br><i>t</i> / (meses) | Especimen | Réplica | Longitud de Onda, cm <sup>-1</sup> |               |               |        |             |             |             |
|-------------------------------|-----------|---------|------------------------------------|---------------|---------------|--------|-------------|-------------|-------------|
|                               |           |         | 1500-<br>1420                      | 1385-<br>1360 | 1350-<br>1170 | 1050   | 990-<br>910 | 890-<br>800 | 730-<br>675 |
| 0                             | 925-O     | 1       | 4.0840                             | 0.9650        | 0.0930        | 0.2348 | 0.0709      | 0.8166      | 0.4381      |
| 0                             | 925-O     | 2       | 4.0490                             | 0.9260        | 0.0878        | 0.1830 | 0.0457      | 0.9260      | 0.4730      |

**Cuadro F.7. (Continuación)** Áreas de picos según la longitud de onda de los espectros IR de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA (Parte 2).

| Tiempo,<br><i>t</i> / (meses) | Especimen | Réplica | Longitud de Onda, cm <sup>-1</sup> |               |               |        |             |             |             |
|-------------------------------|-----------|---------|------------------------------------|---------------|---------------|--------|-------------|-------------|-------------|
|                               |           |         | 1500-<br>1420                      | 1385-<br>1360 | 1350-<br>1170 | 1050   | 990-<br>910 | 890-<br>800 | 730-<br>675 |
| 0                             | 925-O     | 3       | 4.2130                             | 0.9330        | 0.0960        | 0.2270 | 0.0611      | 0.8560      | 0.4560      |
| 0                             | 925-O     | 4       | 4.1390                             | 0.9800        | 0.0940        | 0.2090 | 0.0760      | 0.8300      | 0.4420      |
| 0                             | 925-O     | 5       | 4.1340                             | 0.9750        | 0.1060        | 0.1460 | 0.0730      | 0.8420      | 0.4430      |
| 0                             | 925-O     | 6       | 4.2510                             | 0.9910        | 0.1000        | 0.1530 | 0.0290      | 0.8200      | 0.4450      |
| 0                             | 925-O     | 7       | 4.1450                             | 0.9930        | 0.0970        | 0.3080 | 0.0110      | 0.8450      | 0.4360      |
| 3                             | 925-A     | 1       | 3.8330                             | 0.9260        | 2.6050        | 1.2550 | 0.0000      | 0.7080      | 0.4940      |
| 3                             | 925-A     | 2       | 3.7370                             | 0.9110        | 2.5170        | 1.0310 | 0.0000      | 0.6840      | 0.4490      |
| 3                             | 925-D     | 3       | 3.7850                             | 0.9460        | 3.1870        | 1.4410 | 0.0000      | 0.7680      | 0.4490      |
| 3                             | 925-D     | 4       | 3.8640                             | 0.9510        | 2.2190        | 1.4800 | 0.0000      | 0.7360      | 0.4430      |
| 3                             | 925-A     | 5       | 3.8770                             | 0.9530        | 1.5610        | 1.1230 | 0.0000      | 0.7170      | 0.4210      |
| 3                             | 925-A     | 6       | 3.2010                             | 0.8250        | 1.9710        | 1.2300 | 0.0000      | 0.6600      | 0.3770      |
| 3                             | 925-D     | 7       | 3.6790                             | 0.9330        | 3.0010        | 1.2520 | 0.0000      | 0.7020      | 0.4500      |
| 6                             | 925-E     | 1       | 3.8460                             | 0.8950        | 5.7370        | 1.3190 | 0.0000      | 0.7070      | 0.4760      |
| 6                             | 925-E     | 2       | 3.8520                             | 0.8240        | 7.5790        | 1.5420 | 0.0000      | 0.6640      | 0.4630      |
| 6                             | 925-B     | 3       | 4.0080                             | 0.8690        | 7.9200        | 1.9140 | 0.0000      | 0.6580      | 0.4830      |
| 6                             | 925-B     | 4       | 3.8180                             | 0.9390        | 4.5550        | 1.2440 | 0.0000      | 0.8230      | 0.4980      |
| 6                             | 925-E     | 5       | 3.7300                             | 0.9030        | 5.9230        | 1.3810 | 0.0000      | 0.7530      | 0.4870      |
| 6                             | 925-E     | 6       | 3.6090                             | 0.8390        | 6.8140        | 1.5760 | 0.0000      | 0.6110      | 0.4350      |
| 6                             | 925-B     | 7       | 4.1760                             | 0.8760        | 5.3280        | 1.2090 | 0.0000      | 0.7200      | 0.4550      |
| 12                            | 925-C     | 1       | 3.7546                             | 0.9380        | 3.5980        | 2.9620 | 0.0980      | 0.9130      | 0.5370      |
| 12                            | 925-C     | 2       | 3.9280                             | 0.9620        | 3.3510        | 2.1130 | 0.0000      | 1.0810      | 0.5350      |
| 12                            | 925-C     | 3       | 3.8490                             | 0.9590        | 3.3320        | 1.8790 | 0.0000      | 0.7690      | 0.4570      |
| 12                            | 925-F     | 4       | 3.7950                             | 0.9530        | 3.2760        | 1.8070 | 0.0000      | 0.7790      | 0.4650      |
| 12                            | 925-F     | 5       | 3.7890                             | 0.9430        | 2.6480        | 1.7820 | 0.0000      | 0.7240      | 0.4470      |
| 12                            | 925-F     | 6       | 3.7000                             | 0.9410        | 3.6410        | 1.5880 | 0.0000      | 0.7340      | 0.4860      |
| 12                            | 925-F     | 7       | 3.9140                             | 0.9730        | 3.1210        | 1.9480 | 0.0000      | 0.7910      | 0.4610      |

**Cuadro F. 8.** Áreas de picos según la longitud de onda de los espectros IR de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a la intemperie (Parte 1).

| Tiempo,<br><i>t</i> / (meses) | Especimen | Réplica | Longitud de Onda, cm <sup>-1</sup> |               |               |                |               |               |
|-------------------------------|-----------|---------|------------------------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
|                               |           |         | 3650-<br>3200                      | 3100-<br>3020 | 2960-<br>2850 | 2820 y<br>2720 | 1780-<br>1650 | 1680-<br>1550 |
| 3                             | 925-1     | 1       | 5.6733                             | 0.0385        | 5.0635        | 0.0000         | 3.7430        | 1.3610        |
| 3                             | 925-2     | 2       | 8.4260                             | 0.0470        | 5.1750        | 0.0000         | 5.3030        | 1.8080        |

**Cuadro F.8. (Continuación)** Áreas de picos según la longitud de onda de los espectros IR de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a la intemperie (Parte 1).

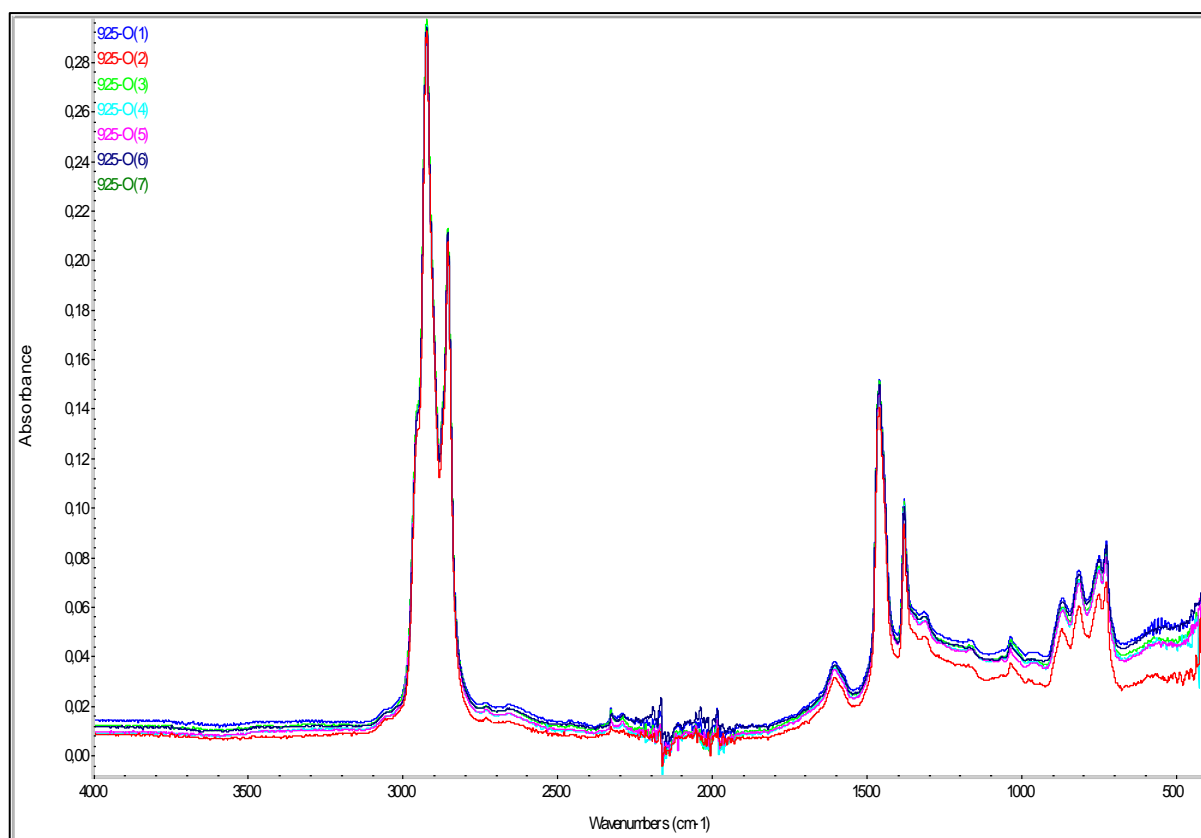
| Tiempo,<br><i>t</i> / (meses) | Espécimen | Réplica | Longitud de Onda, cm <sup>-1</sup> |               |               |                |               |               |
|-------------------------------|-----------|---------|------------------------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
|                               |           |         | 3650-<br>3200                      | 3100-<br>3020 | 2960-<br>2850 | 2820 y<br>2720 | 1780-<br>1650 | 1680-<br>1550 |
| 3                             | 925-3     | 3       | 7.9090                             | 0.0550        | 4.5300        | 0.0000         | 5.1990        | 1.8910        |
| 3                             | 925-4     | 4       | 8.5250                             | 0.0530        | 4.7940        | 0.0000         | 4.5500        | 1.8030        |
| 3                             | 925-5     | 5       | 6.7960                             | 0.0430        | 6.2820        | 0.0000         | 4.4120        | 1.4350        |
| 3                             | 925-6     | 6       | 7.3470                             | 0.0500        | 5.6130        | 0.0000         | 5.0080        | 1.3760        |
| 3                             | 925-7     | 7       | 5.9386                             | 0.0499        | 5.9896        | 0.0000         | 4.5890        | 1.3090        |
| 6                             | 925-1     | 1       | 6.4080                             | 0.0480        | 5.5040        | 0.0000         | 3.4200        | 1.7330        |
| 6                             | 925-2     | 2       | 5.2824                             | 0.0437        | 3.8897        | 0.0000         | 2.7755        | 1.5786        |
| 6                             | 925-3     | 3       | 5.4925                             | 0.0619        | 3.4289        | 0.0000         | 3.6258        | 1.6869        |
| 6                             | 925-4     | 4       | 4.1660                             | 0.0300        | 7.3190        | 0.0000         | 2.5120        | 1.2830        |
| 6                             | 925-5     | 5       | 5.8170                             | 0.0480        | 5.3886        | 0.0000         | 3.1600        | 2.0710        |
| 6                             | 925-6     | 6       | 4.9379                             | 0.4240        | 4.3891        | 0.0000         | 2.8240        | 1.2560        |
| 6                             | 925-7     | 7       | 5.0713                             | 0.0423        | 5.7438        | 0.0000         | 3.0930        | 1.4450        |
| 12                            | 925-1     | 1       | 6.6040                             | 0.0254        | 4.6813        | 0.0000         | 1.0293        | 2.6498        |
| 12                            | 925-2     | 2       | 5.7406                             | 0.0172        | 4.2176        | 0.0000         | 1.2579        | 2.2392        |
| 12                            | 925-3     | 3       | 3.5245                             | 0.0272        | 6.2263        | 0.0129         | 0.7760        | 1.5522        |
| 12                            | 925-4     | 4       | 4.7666                             | 0.0228        | 5.4928        | 0.0145         | 0.9029        | 2.1256        |
| 12                            | 925-5     | 5       | 4.9030                             | 0.0210        | 3.9610        | 0.0000         | 0.8780        | 2.2170        |
| 12                            | 925-6     | 6       | 4.2003                             | 0.0288        | 5.6304        | 0.0146         | 0.7378        | 1.9089        |
| 12                            | 925-7     | 7       | 4.7710                             | 0.0266        | 5.5582        | 0.0134         | 0.8513        | 2.0805        |

**Cuadro F. 9.** Áreas de picos según la longitud de onda de los espectros IR de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a la intemperie (Parte 2).

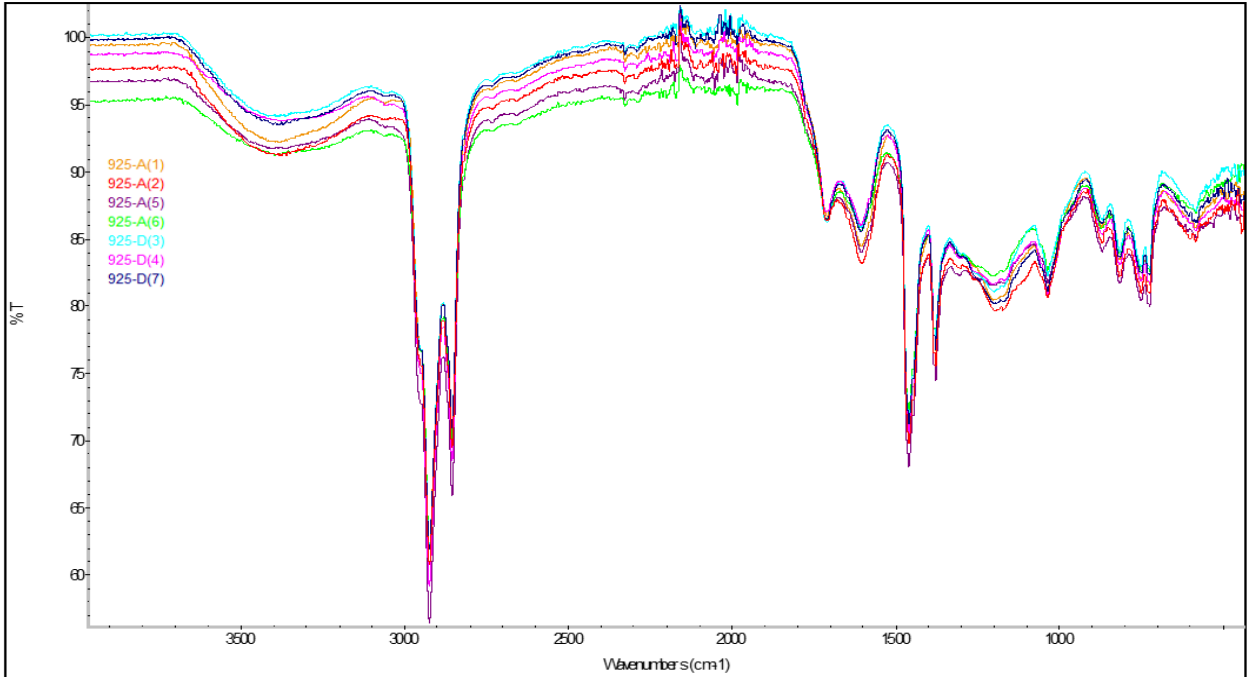
| Tiempo,<br><i>t</i> / (meses) | Espécimen | Réplica | Longitud de Onda, cm <sup>-1</sup> |               |               |        |             |             |             |
|-------------------------------|-----------|---------|------------------------------------|---------------|---------------|--------|-------------|-------------|-------------|
|                               |           |         | 1500-<br>1420                      | 1385-<br>1360 | 1350-<br>1170 | 1050   | 990-<br>910 | 890-<br>800 | 730-<br>675 |
| 3                             | 925-1     | 1       | 2.3610                             | 0.5250        | 4.7590        | 1.2250 | 0.0000      | 0.4470      | 0.2750      |
| 3                             | 925-2     | 2       | 2.7760                             | 0.5500        | 6.5840        | 1.4640 | 0.0000      | 0.3990      | 0.3170      |
| 3                             | 925-3     | 3       | 2.6210                             | 0.5210        | 6.3700        | 1.3310 | 0.0000      | 0.4210      | 0.3020      |
| 3                             | 925-4     | 4       | 2.6100                             | 0.5310        | 5.4560        | 1.1020 | 0.0000      | 0.5010      | 0.2780      |
| 3                             | 925-5     | 5       | 2.8990                             | 0.6250        | 6.0440        | 1.4130 | 0.0000      | 0.4160      | 0.3450      |
| 3                             | 925-6     | 6       | 2.8250                             | 0.5810        | 5.7990        | 1.1120 | 0.0000      | 0.3690      | 0.3360      |
| 3                             | 925-7     | 7       | 2.8920                             | 0.5600        | 5.5490        | 1.1310 | 0.0000      | 0.4490      | 0.3160      |
| 6                             | 925-1     | 1       | 2.6500                             | 0.5500        | 4.2320        | 1.4650 | 0.0000      | 0.4320      | 0.3140      |
| 6                             | 925-2     | 2       | 1.9430                             | 0.4120        | 3.2360        | 1.3330 | 0.0000      | 0.3250      | 0.2230      |

**Cuadro F.9. (Continuación)** Áreas de picos según la longitud de onda de los espectros IR de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a la intemperie (Parte 2).

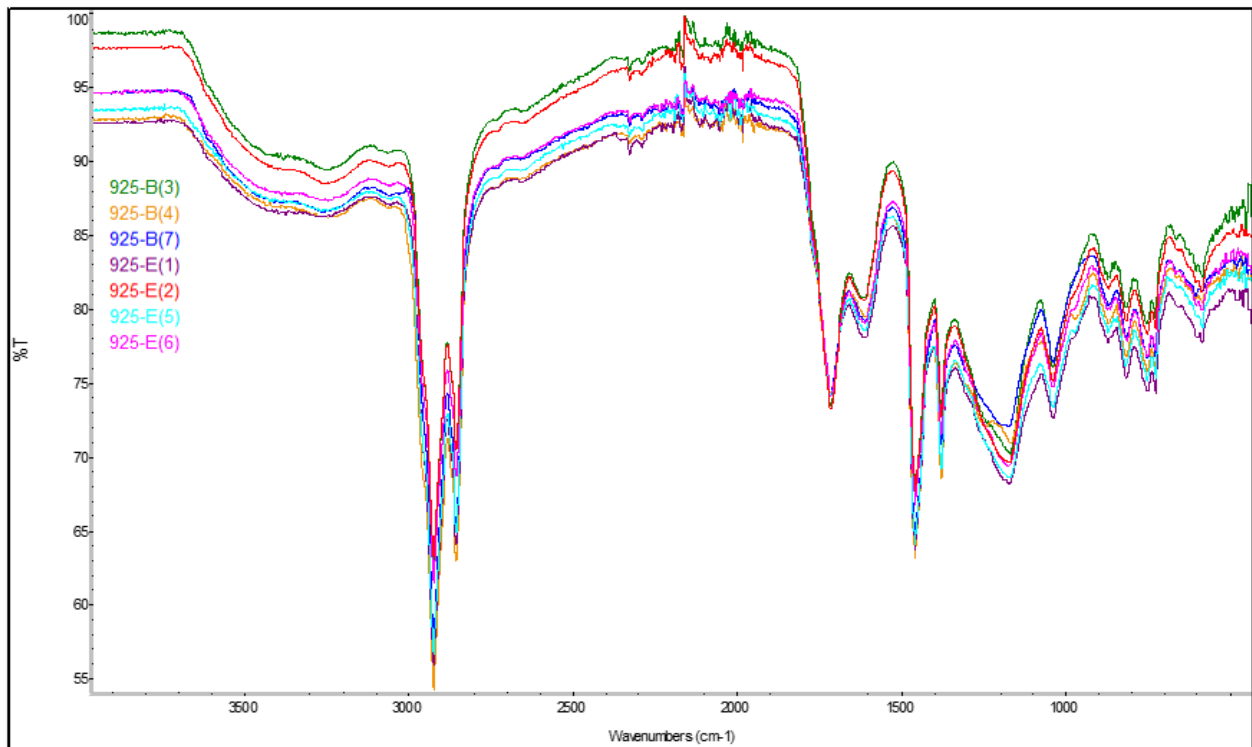
| Tiempo, <i>t</i> (meses) | Especimen | Réplica | Longitud de Onda, $\text{cm}^{-1}$ |           |           |        |         |         |         |
|--------------------------|-----------|---------|------------------------------------|-----------|-----------|--------|---------|---------|---------|
|                          |           |         | 1500-1420                          | 1385-1360 | 1350-1170 | 1050   | 990-910 | 890-800 | 730-675 |
| 6                        | 925-3     | 3       | 1.9590                             | 0.3660    | 4.2240    | 1.3970 | 0.0000  | 0.2320  | 0.2530  |
| 6                        | 925-4     | 4       | 2.9690                             | 0.6550    | 3.1750    | 1.1720 | 0.0000  | 0.4850  | 0.3560  |
| 6                        | 925-5     | 5       | 2.7270                             | 0.5280    | 3.1940    | 1.5760 | 0.0000  | 0.3710  | 0.3410  |
| 6                        | 925-6     | 6       | 2.1250                             | 0.4340    | 3.8980    | 1.0390 | 0.0000  | 0.2640  | 0.2570  |
| 6                        | 925-7     | 7       | 2.7340                             | 0.5280    | 2.7790    | 1.6090 | 0.0000  | 0.3570  | 0.3170  |
| 12                       | 925-1     | 1       | 1.7590                             | 0.5870    | 1.2650    | 1.6170 | 0.0000  | 0.8910  | 0.1370  |
| 12                       | 925-2     | 2       | 1.6500                             | 0.4970    | 1.1710    | 1.4350 | 0.0000  | 0.9750  | 0.1130  |
| 12                       | 925-3     | 3       | 2.2549                             | 0.6263    | 0.6410    | 1.3180 | 0.0000  | 0.7390  | 0.2160  |
| 12                       | 925-4     | 4       | 2.0030                             | 0.6230    | 0.8100    | 1.1370 | 0.0000  | 0.6030  | 0.1910  |
| 12                       | 925-5     | 5       | 1.4530                             | 0.4840    | 1.1210    | 1.5450 | 0.0000  | 0.8590  | 0.1130  |
| 12                       | 925-6     | 6       | 1.9947                             | 0.6021    | 0.8440    | 1.3480 | 0.0000  | 0.7100  | 0.1880  |
| 12                       | 925-7     | 7       | 2.0180                             | 0.6230    | 0.8550    | 1.4210 | 0.0000  | 0.7850  | 0.1800  |



**Figura F. 1.** Espectros IR del asfalto 0925-14 original previo al envejecimiento en el EEMA.

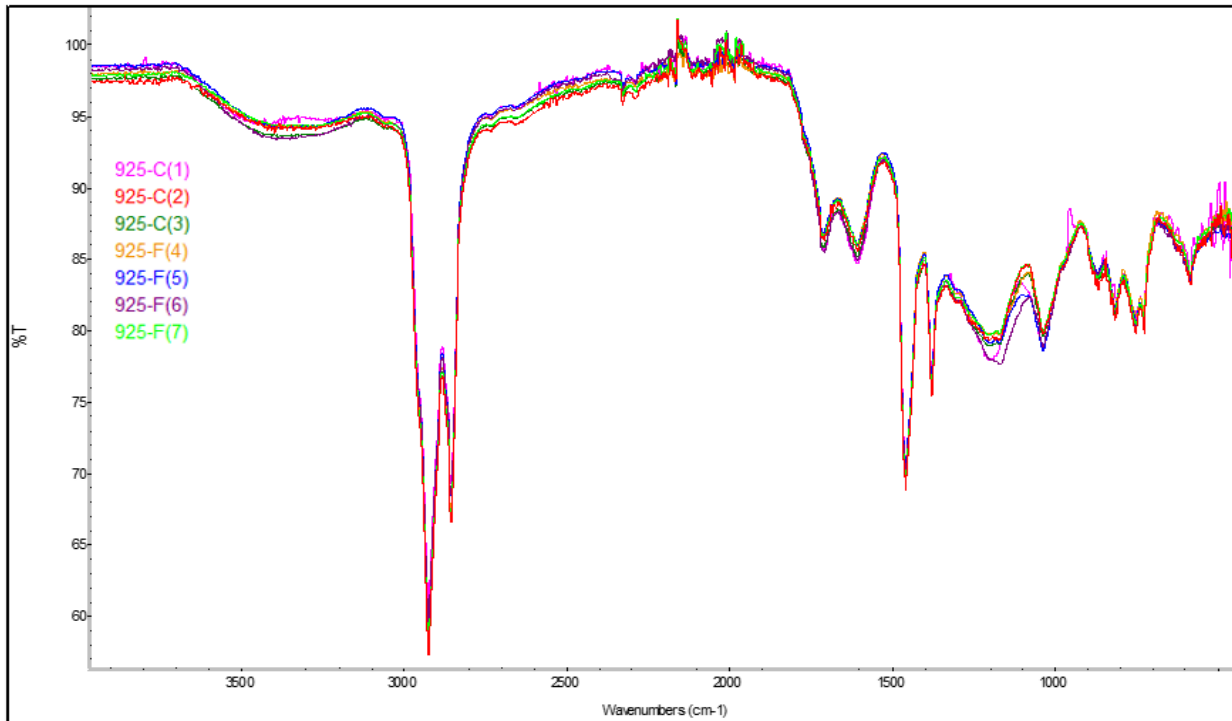


**Figura F. 2.** Espectros IR del asfalto 0925-14 envejecido en el EEMA a tres meses equivalentes.

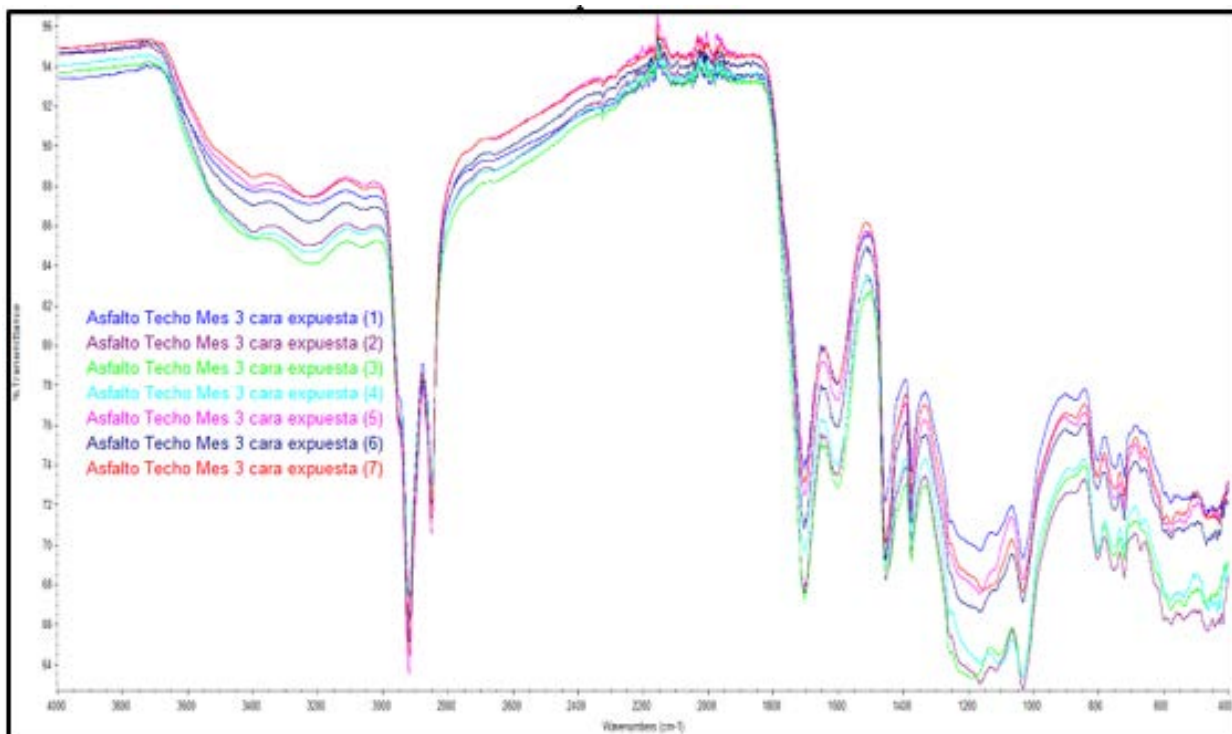


**Figura F. 3.** Espectros IR del asfalto 0925-14 envejecido en el EEMA a seis meses equivalentes.





**Figura F. 4.** Espectros IR del asfalto 0925-14 envejecido en el EEMA a doce meses equivalentes.



**Figura F. 5.** Espectros IR del asfalto 0925-14 envejecido durante tres meses a la intemperie.

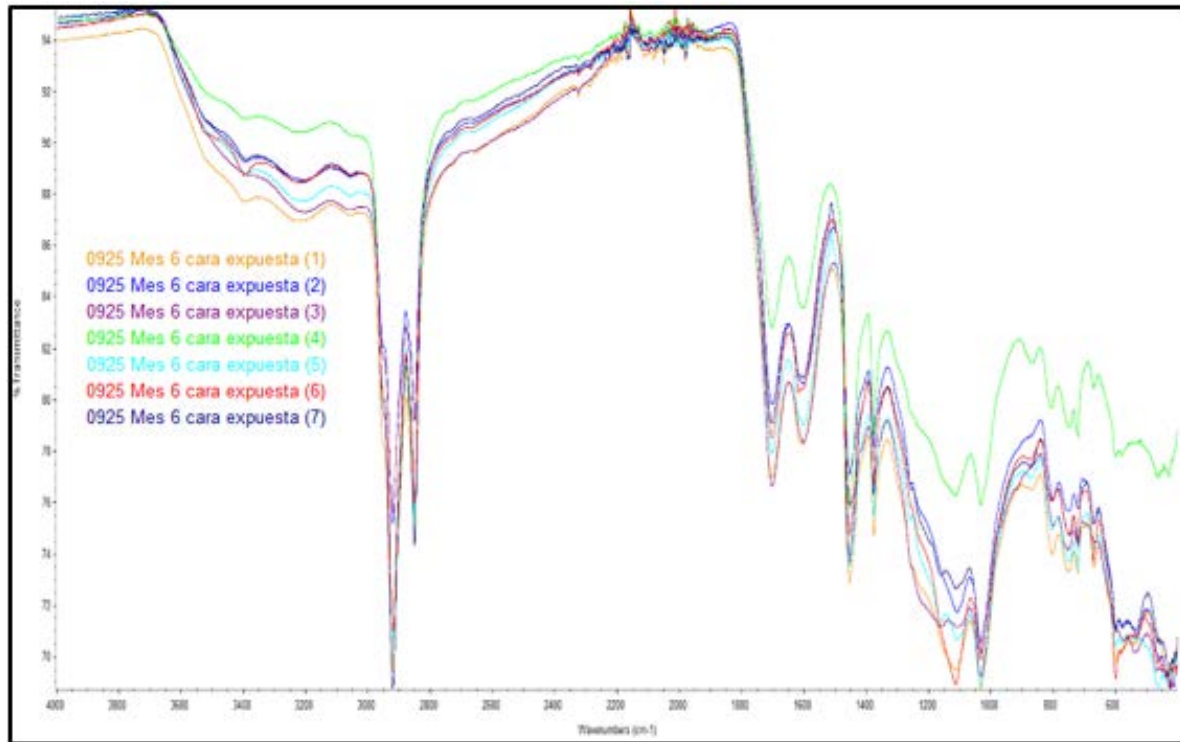


Figura F. 6. Espectros IR del asfalto 0925-14 envejecido durante seis meses a la intemperie.

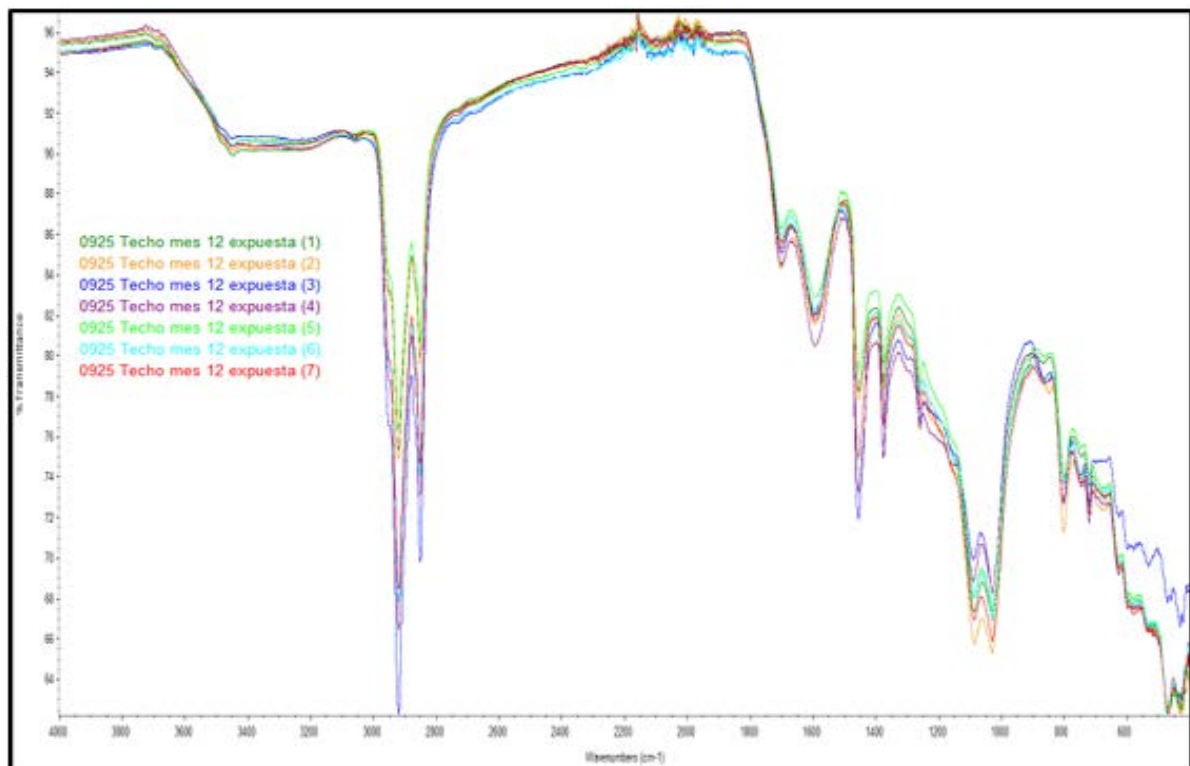


Figura F.7. Espectros IR del asfalto 0925-14 envejecido durante doce meses a la intemperie.

## Apéndice G: Resultados intermedios de la evaluación del EEMA

**Cuadro G. 1.** Datos de composición elemental promedio de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas en el EEMA obtenidos mediante EDX.

| Elemento                     | Composición elemental promedio a tres meses, wt/ (%) | Composición elemental promedio a seis meses, wt/ (%) | Composición elemental promedio a doce meses, wt/ (%) |
|------------------------------|--|--|--|
| C                            | 85.523   | 83.568   | 72.377   |
| O                            | 10.482   | 11.837   | 27.369   |
| S                            | 3.667  | 4.269  | 0.000  |
| Otros elementos (Si, Al, Ca) | 0.328  | 0.277  | 0.254  |
| <b>Total</b>                 | 100.0  | 99.9   | 100.0  |

**Cuadro G. 2.** Valor de CXT interpolado de los datos reológicos del DSR para las muestras asfálticas 0925-14 previo al envejecimiento en el EEMA.

| Temperatura, $T/ (^{\circ}\text{C})$ | Ángulo de Fase, $\Phi/ (adim)$ |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| 10.3850                              | 44.8276                        |
| 10.4400                              | 44.8967                        |
| 10.4850                              | 44.9678                        |
| <b>CXT = 10.5107</b>                 | <b>45.0000</b>                 |
| 10.5400                              | 45.0367                        |
| 10.5900                              | 45.1042                        |
| 10.6400                              | 45.1727                        |

**Cuadro G. 3.** Valor de CXT interpolado de los datos reológicos del DSR para las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a tres meses equivalentes en el EEMA.

| Temperatura, $T/ (^{\circ}\text{C})$ | Ángulo de Fase, $\Phi/ (adim)$ |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| 13.0200                              | 44.8217                        |
| 13.0700                              | 44.8877                        |
| 13.1200                              | 44.9534                        |
| <b>CXT = 13.1568</b>                 | <b>45.0000</b>                 |
| 13.1700                              | 45.0167                        |
| 13.2250                              | 45.0787                        |
| 13.2750                              | 45.1439                        |

**Cuadro G. 4.** Valor de CXT interpolado de los datos reológicos del DSR para las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a seis meses equivalentes en el EEMA.

| Temperatura, $T/ (^{\circ}C)$ | Ángulo de Fase, $\Phi/ (adim)$ |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 13.9550                       | 44.8329                        |
| 14.0100                       | 44.9079                        |
| 14.0500                       | 44.9675                        |
| <b>CXT = 14.0843</b>          | <b>45.0000</b>                 |
| 14.1150                       | 45.0292                        |
| 14.1600                       | 45.0954                        |
| 14.2200                       | 45.1637                        |

**Cuadro G. 5.** Valor de CXT interpolado de los datos reológicos del DSR para las muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a doce meses equivalentes en el EEMA.

| Temperatura, $T/ (^{\circ}C)$ | Ángulo de Fase, $\Phi/ (adim)$ |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 14.8900                       | 44.8573                        |
| 14.9400                       | 44.9189                        |
| 14.9850                       | 44.9819                        |
| <b>CXT = 15.0008</b>          | <b>45.0000</b>                 |
| 15.0400                       | 45.0451                        |
| 15.0850                       | 45.1072                        |
| 15.1450                       | 45.1690                        |

**Cuadro G. 6.** Índices de envejecimiento de muestras asfálticas 0925-14 del EEMA.

| Tiempo, $t/ (meses)$ | Índice de carbonilos, $I_{C=O}/ (%)$ | Índice de hidroxilos, $I_{OH}/ (%)$ | Índice de insaturaciones, $I_{insat}/ (%)$ | Índice de sulfóxidos, $I_{S=O}/ (%)$ |
|----------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------------------|
| 0                    | 0.000                                | 0.000                               | 25.032                                     | 1.721                                |
| 0                    | 0.000                                | 0.000                               | 25.356                                     | 1.386                                |
| 0                    | 0.000                                | 0.000                               | 25.142                                     | 1.651                                |
| 0                    | 0.000                                | 0.000                               | 25.271                                     | 1.557                                |
| 0                    | 0.000                                | 0.000                               | 25.080                                     | 1.303                                |
| 0                    | 0.000                                | 0.000                               | 26.259                                     | 1.289                                |
| 0                    | 0.000                                | 0.000                               | 25.126                                     | 2.079                                |
| 3                    | 3.780                                | 28.179                              | 19.863                                     | 12.743                               |
| 3                    | 3.162                                | 25.501                              | 21.381                                     | 12.549                               |
| 3                    | 5.679                                | 23.053                              | 18.702                                     | 15.672                               |

**Cuadro G.6. (Continuación)** Índices de envejecimiento de muestras asfálticas 0925-14 del EEMA.

| Tiempo,<br><i>t</i> / (meses) | Índice de<br>carbonilos,<br><i>I<sub>C=O</sub></i> / (%) | Índice de<br>hidroxilos,<br><i>I<sub>OH</sub></i> / (%) | Índice de<br>insaturaciones,<br><i>I<sub>insat</sub></i> / (%) | Índice de<br>sulfóxidos,<br><i>I<sub>S=O</sub></i> / (%) |
|-------------------------------|--|---|--|--|
| 3                             | 4.528  | 19.594  | 19.995   | 13.675   |
| 3                             | 3.673  | 21.140  | 21.320   | 10.175   |
| 3                             | 4.372  | 20.431  | 19.830   | 13.938   |
| 3                             | 5.430  | 23.913  | 18.642   | 14.775   |
| 6                             | 11.125   | 19.288  | 16.137   | 21.884   |
| 6                             | 14.374   | 21.563  | 14.269   | 25.154   |
| 6                             | 13.685   | 21.640  | 14.290   | 25.766   |
| 6                             | 11.866   | 18.663  | 15.943   | 18.674   |
| 6                             | 11.642   | 18.607  | 15.738   | 22.633   |
| 6                             | 12.305   | 21.059  | 15.117   | 25.179   |
| 6                             | 11.837   | 22.061  | 16.278   | 19.355   |
| 12                            | 5.107  | 14.070  | 19.137   | 22.635   |
| 12                            | 5.347  | 12.427  | 18.798   | 19.542   |
| 12                            | 5.817  | 15.188  | 18.830   | 18.654   |
| 12                            | 5.436  | 14.451  | 18.799   | 18.620   |
| 12                            | 5.468  | 16.745  | 19.144   | 16.433   |
| 12                            | 5.577  | 18.842  | 18.167   | 18.192   |
| 12                            | 5.481  | 12.829  | 19.346   | 18.747   |

**Cuadro G. 7.** índices de envejecimiento de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a la intemperie.

| Tiempo,<br><i>t</i> / (meses) | Índice de<br>carbonilos,<br><i>I<sub>C=O</sub></i> / (%) | Índice de<br>hidroxilos,<br><i>I<sub>OH</sub></i> / (%) | Índice de<br>insaturaciones,<br><i>I<sub>insat</sub></i> / (%) | Índice de<br>sulfóxidos,<br><i>I<sub>S=O</sub></i> / (%) |
|-------------------------------|--|---|--|--|
| 3                             | 14.695   | 22.273  | 14.613   | 23.493   |
| 3                             | 16.144   | 25.651  | 13.955   | 24.500   |
| 3                             | 16.690   | 25.390  | 14.485   | 24.722   |
| 3                             | 15.065   | 28.226  | 14.611   | 21.713   |
| 3                             | 14.367   | 22.130  | 14.113   | 24.282   |
| 3                             | 16.465   | 24.155  | 13.812   | 22.722   |
| 3                             | 15.949   | 20.639  | 14.600   | 23.216   |
| 6                             | 12.782   | 23.950  | 16.381   | 21.292   |
| 6                             | 13.190   | 25.104  | 16.736   | 21.714   |
| 6                             | 15.954   | 24.167  | 16.042   | 24.733   |
| 6                             | 10.414   | 17.271  | 17.627   | 18.021   |

**Cuadro G.7. (Continuación)** índices de envejecimiento de muestras asfálticas 0925-14 envejecidas a la intemperie.

| Tiempo, <i>t</i> / (meses) | Índice de carbonilos, <i>I<sub>C=O</sub></i> / (%) | Índice de hidroxilos, <i>I<sub>OH</sub></i> / (%) | Índice de insaturaciones, <i>I<sub>insat</sub></i> / (%) | Índice de sulfóxidos, <i>I<sub>S=O</sub></i> / (%) |
|----------------------------|--|---|--|--|
| 6                          | 12.529   | 23.064  | 19.023   | 18.912   |
| 6                          | 12.926   | 22.601  | 15.475   | 22.597   |
| 6                          | 13.040   | 21.380  | 17.618   | 18.500   |
| 12                         | 4.845  | 31.084  | 20.751   | 13.565   |
| 12                         | 6.513  | 29.723  | 20.137   | 13.493   |
| 12                         | 4.332  | 19.674  | 21.252   | 10.935   |
| 12                         | 4.830  | 25.500  | 22.087   | 10.416   |
| 12                         | 5.001  | 27.929  | 20.906   | 15.187   |
| 12                         | 4.052  | 23.069  | 21.439   | 12.039   |
| 12                         | 4.438  | 24.871  | 21.365   | 11.865   |

**Cuadro G. 8.** Resultado del estadístico Tukey en la comparación de índices de carbonilo EEMA-Intemperie.

| Diferencia de niveles     | Diferencia de las medias | Error estándar de diferencia | Intervalo de Confianza de 95% | Valor T | Valor p ajustado |
|---------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------|------------------|
| 6M-EEMA - 3M-EEMA         | 8.030                    | 0.552                        | (6.372; 9.688)                | 14.55   | 0.000            |
| <b>12M-EEMA - 3M-EEMA</b> | 1.087                    | 0.552                        | (-0.571; 2.745)               | 1.97    | <b>0.379</b>     |
| 3M-INT - 3M-EEMA          | 11.250                   | 0.552                        | (9.592; 12.908)               | 20.39   | 0.000            |
| 6M-INT - 3M-EEMA          | 8.601                    | 0.552                        | (6.943; 10.260)               | 15.59   | 0.000            |
| <b>12M-INT - 3M-EEMA</b>  | 0.484                    | 0.552                        | (-1.174; 2.142)               | 0.88    | <b>0.950</b>     |
| 12M-EEMA - 6M-EEMA        | -6.943                   | 0.552                        | (-8.601; -5.285)              | -12.58  | 0.000            |
| 3M-INT - 6M-EEMA          | 3.220                    | 0.552                        | (1.562; 4.878)                | 5.84    | 0.000            |
| <b>6M-INT - 6M-EEMA</b>   | 0.572                    | 0.552                        | (-1.086; 2.230)               | 1.04    | <b>0.902</b>     |
| 12M-INT - 6M-EEMA         | -7.546                   | 0.552                        | (-9.204; -5.888)              | -13.68  | 0.000            |
| 3M-INT - 12M-EEMA         | 10.163                   | 0.552                        | (8.505; 11.821)               | 18.42   | 0.000            |
| 6M-INT - 12M-EEMA         | 7.515                    | 0.552                        | (5.856; 9.173)                | 13.62   | 0.000            |
| <b>12M-INT - 12M-EEMA</b> | -0.603                   | 0.552                        | (-2.261; 1.055)               | -1.09   | <b>0.881</b>     |
| 6M-INT - 3M-INT           | -2.649                   | 0.552                        | (-4.307; -0.990)              | -4.80   | 0.000            |
| 12M-INT - 3M-INT          | -10.766                  | 0.552                        | (-12.424; -9.108)             | -19.51  | 0.000            |
| 12M-INT - 6M-INT          | -8.118                   | 0.552                        | (-9.776; -6.460)              | -14.71  | 0.000            |

**Cuadro G. 9.** Resultado del estadístico Tukey en la comparación de índices de hidroxilo EEMA-Intemperie.

| Diferencia de niveles    | Diferencia de las medias | Error estándar de diferencia | Intervalo de Confianza de 95% | Valor T | Valor p ajustado |
|--------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------|------------------|
| <b>6M-EEMA - 3M-EEMA</b> | -2.700                   | 1.47                         | (-7.13; 1.73)                 | -1.83   | <b>0.457</b>     |
| 12M-EEMA - 3M-EEMA       | -8.180                   | 1.47                         | (-12.61; -3.75)               | -5.55   | 0.000            |
| <b>3M-INT - 3M-EEMA</b>  | 0.950                    | 1.47                         | (-3.48; 5.38)                 | 0.64    | <b>0.987</b>     |
| <b>6M-INT - 3M-EEMA</b>  | -0.610                   | 1.47                         | (-5.04; 3.82)                 | -0.41   | <b>0.998</b>     |
| <b>12M-INT - 3M-EEMA</b> | 2.860                    | 1.47                         | (-1.57; 7.29)                 | 1.94    | <b>0.394</b>     |
| 12M-EEMA - 6M-EEMA       | -5.480                   | 1.47                         | (-9.91; -1.05)                | -3.71   | 0.008            |
| <b>3M-INT - 6M-EEMA</b>  | 3.650                    | 1.47                         | (-0.78; 8.08)                 | 2.48    | <b>0.157</b>     |
| <b>6M-INT - 6M-EEMA</b>  | 2.090                    | 1.47                         | (-2.34; 6.52)                 | 1.42    | <b>0.715</b>     |
| 12M-INT - 6M-EEMA        | 5.570                    | 1.47                         | (1.14; 10.00)                 | 3.78    | 0.007            |
| 3M-INT - 12M-EEMA        | 9.130                    | 1.47                         | (4.70; 13.56)                 | 6.19    | 0.000            |
| 6M-INT - 12M-EEMA        | 7.570                    | 1.47                         | (3.14; 12.00)                 | 5.14    | 0.000            |
| 12M-INT - 12M-EEMA       | 11.040                   | 1.47                         | (6.61; 15.47)                 | 7.49    | 0.000            |
| <b>6M-INT - 3M-INT</b>   | -1.560                   | 1.47                         | (-5.99; 2.87)                 | -1.06   | <b>0.894</b>     |
| <b>12M-INT - 3M-INT</b>  | 1.910                    | 1.47                         | (-2.52; 6.34)                 | 1.30    | <b>0.784</b>     |
| <b>12M-INT - 6M-INT</b>  | 3.470                    | 1.47                         | (-0.96; 7.90)                 | 2.36    | <b>0.199</b>     |

**Cuadro G. 10.** Resultado del estadístico Tukey en la comparación de índices de insaturaciones EEMA-Intemperie.

| Diferencia de niveles     | Diferencia de las medias | Error estándar de diferencia | Intervalo de Confianza de 95% | Valor T | Valor p ajustado |
|---------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------|------------------|
| 6M-EEMA - 3M-EEMA         | -4.566                   | 0.436                        | (-5.876; -3.256)              | -10.48  | 0.000            |
| <b>12M-EEMA - 3M-EEMA</b> | -1.073                   | 0.436                        | (-2.383; 0.237)               | -2.46   | <b>0.163</b>     |
| 3M-INT - 3M-EEMA          | -5.649                   | 0.436                        | (-6.959; -4.339)              | -12.96  | 0.000            |
| 6M-INT - 3M-EEMA          | -2.976                   | 0.436                        | (-4.286; -1.666)              | -6.83   | 0.000            |
| <b>12M-INT - 3M-EEMA</b>  | 1.172                    | 0.436                        | (-0.138; 2.482)               | 2.69    | <b>0.102</b>     |
| 12M-EEMA - 6M-EEMA        | 3.493                    | 0.436                        | (2.183; 4.803)                | 8.01    | 0.000            |
| <b>3M-INT - 6M-EEMA</b>   | -1.083                   | 0.436                        | (-2.393; 0.227)               | -2.49   | <b>0.155</b>     |
| 6M-INT - 6M-EEMA          | 1.590                    | 0.436                        | (0.280; 2.900)                | 3.65    | 0.010            |
| 12M-INT - 6M-EEMA         | 5.738                    | 0.436                        | (4.428; 7.048)                | 13.16   | 0.000            |
| 3M-INT - 12M-EEMA         | -4.576                   | 0.436                        | (-5.886; -3.266)              | -10.50  | 0.000            |

|                   |        |       |                  |       |       |
|-------------------|--------|-------|------------------|-------|-------|
| 6M-INT - 12M-EEMA | -1.903 | 0.436 | (-3.212; -0.593) | -4.36 | 0.001 |
|-------------------|--------|-------|------------------|-------|-------|

**Cuadro G.10. (Continuación)** Resultado del estadístico Tukey en la comparación de índices de insaturaciones EEMA-Intemperie.

| Diferencia de niveles | Diferencia de las medias | Error estándar de diferencia | Intervalo de Confianza de 95% | Valor T | Valor p ajustado |
|-----------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------|------------------|
| 12M-INT - 12M-EEMA    | 2.245                    | 0.436                        | (0.935; 3.555)                | 5.15    | 0.000            |
| 6M-INT - 3M-INT       | 2.674                    | 0.436                        | (1.364; 3.984)                | 6.13    | 0.000            |
| 12M-INT - 3M-INT      | 6.821                    | 0.436                        | (5.511; 8.131)                | 15.65   | 0.000            |
| 12M-INT - 6M-INT      | 4.148                    | 0.436                        | (2.838; 5.458)                | 9.52    | 0.000            |

**Cuadro G. 11.** Resultado del estadístico Tukey en la comparación de índices de sulfóxido EEMA-Intemperie.

| Diferencia de niveles    | Diferencia de las medias | Error estándar de diferencia | Intervalo de Confianza de 95% | Valor T | Valor p ajustado |
|--------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------|------------------|
| 6M-EEMA - 3M-EEMA        | 9.300                    | 1.09                         | (6.03; 12.58)                 | 8.53    | 0.000            |
| 12M-EEMA - 3M-EEMA       | 5.610                    | 1.09                         | (2.34; 8.89)                  | 5.15    | 0.000            |
| 3M-INT - 3M-EEMA         | 10.160                   | 1.09                         | (6.88; 13.44)                 | 9.32    | 0.000            |
| 6M-INT - 3M-EEMA         | 7.460                    | 1.09                         | (4.19; 10.74)                 | 6.85    | 0.000            |
| <b>12M-INT - 3M-EEMA</b> | -0.860                   | 1.09                         | (-4.14; 2.42)                 | -0.79   | <b>0.968</b>     |
| 12M-EEMA - 6M-EEMA       | -3.690                   | 1.09                         | (-6.97; -0.41)                | -3.38   | 0.020            |
| <b>3M-INT - 6M-EEMA</b>  | 0.860                    | 1.09                         | (-2.42; 4.13)                 | 0.79    | <b>0.968</b>     |
| <b>6M-INT - 6M-EEMA</b>  | -1.840                   | 1.09                         | (-5.12; 1.44)                 | -1.69   | <b>0.549</b>     |
| 12M-INT - 6M-EEMA        | -10.160                  | 1.09                         | (-13.44; -6.89)               | -9.32   | 0.000            |
| 3M-INT - 12M-EEMA        | 4.550                    | 1.09                         | (1.27; 7.82)                  | 4.17    | 0.002            |
| <b>6M-INT - 12M-EEMA</b> | 1.850                    | 1.09                         | (-1.43; 5.13)                 | 1.70    | <b>0.543</b>     |
| 12M-INT - 12M-EEMA       | -6.470                   | 1.09                         | (-9.75; -3.20)                | -5.94   | 0.000            |
| <b>6M-INT - 3M-INT</b>   | -2.700                   | 1.09                         | (-5.97; 0.58)                 | -2.47   | <b>0.159</b>     |
| 12M-INT - 3M-INT         | -11.020                  | 1.09                         | (-14.30; -7.74)               | -10.11  | 0.000            |
| 12M-INT - 6M-INT         | -8.320                   | 1.09                         | (-11.60; -5.05)               | -7.64   | 0.000            |



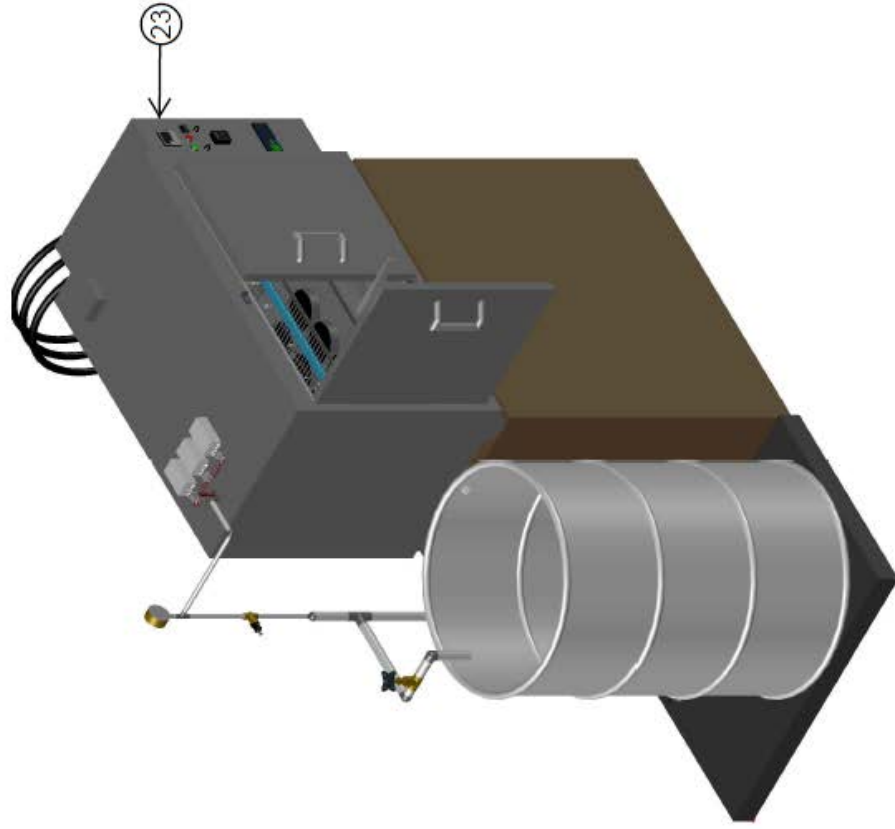
## ANEXOS DE LOS CAPÍTULOS

### X. ANEXOS DEL CAPÍTULO 1

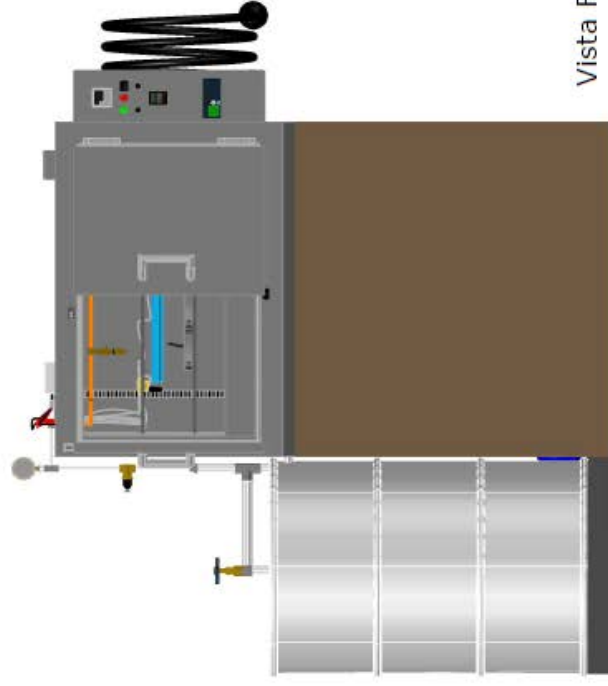
Los anexos que se presentan en las siguientes páginas corresponden a los planos constructivos del EEMA. Para garantizar su legibilidad cada lámina ocupa una página completa, por lo que la descripción de cada figura se adjunta en el Cuadro X.1. Adicionalmente, se empleó el mismo principio para la ficha técnica de la bomba Toolcraft® TC26666.

**Cuadro X.1.** Descripción de las figuras que contienen las láminas del plano del EEMA.

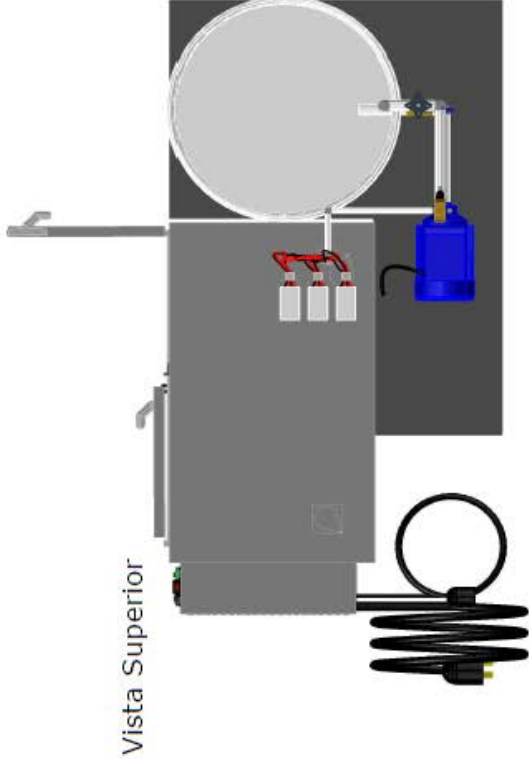
| <b>Número de Figura</b> | <b>Descripción</b>                                    | <b>Páginas</b> |
|-------------------------|---|----------------|
| X.1                     | Vista general del EEMA                                | 186            |
| X.2                     | Horno convectivo original                             | 187            |
| X.3                     | Detalle de los portamuestras implementados en el EEMA | 188            |
| X.4                     | Vistas generales del sistema de Radiación             | 189            |
| X.5                     | Detalle y distribución del ramal de aspersores        | 190            |
| X.6                     | Vistas generales del sistema de Aspersión             | 191            |
| X.7                     | Ficha técnica de la bomba Toolcraft® TC26666          | 192            |



Vista Isométrica



Vista Frontal

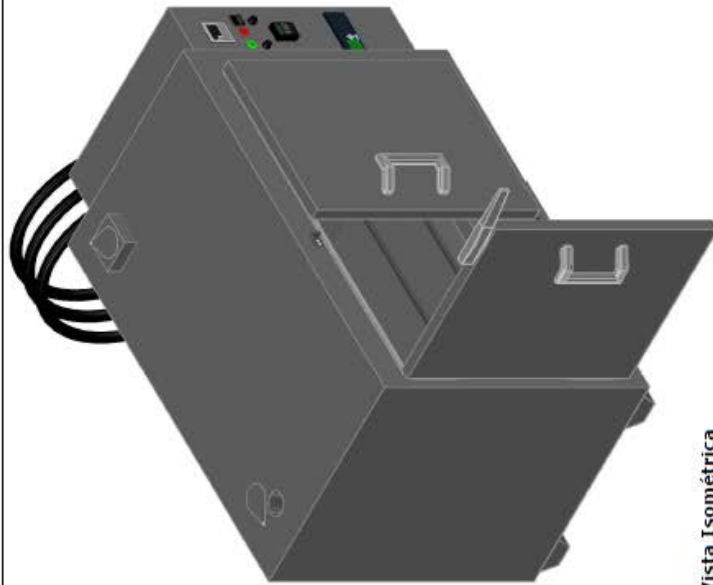


Vista Superior

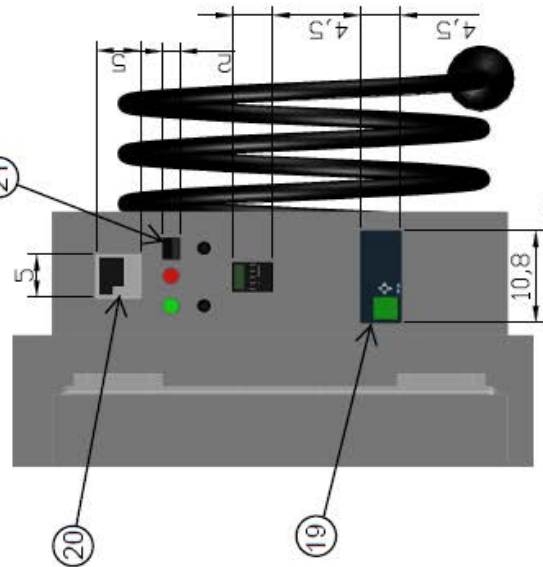
| IDEM | Componente                    | IDEM | Componente                        |
|------|-------------------------------|------|-----------------------------------|
| 1    | Válvula de bola               | 13   | Acoplies rápidos                  |
| 2    | Bomba periférica              | 14   | Cables térmicos 12 AWG            |
| 3    | Tee del bypass regulador      | 15   | Soportes de bombillos             |
| 4    | Válvula de compuerta          | 16   | Base de fluorescentes             |
| 5    | Válvula reguladora de presión | 17   | Bombillo UVC Osram HNS 15 W G13   |
| 6    | Manómetro                     | 18   | Portamuestras                     |
| 7    | Tanque de agua                | 19   | PLC Siemens LOGO! 230 RCE         |
| 8    | Aspersor NPT                  | 20   | Controlador manual de temperatura |
| 9    | Soporte de ramal de aspersión | 21   | Botón de encendido/apagado        |
| 10   | Ramal de aspersión            | 22   | Pulsador de seguridad NO          |
| 11   | Balastros electrónicos        | 23   | EEMA                              |
| 12   | Cables 12 AWG de cobre        |      |                                   |

**PLANO CONSTRUCTIVO DEL EQUIPO DE ENVEJECIMIENTO POR METEORIZACIÓN ACCELERADA (EEMA)**

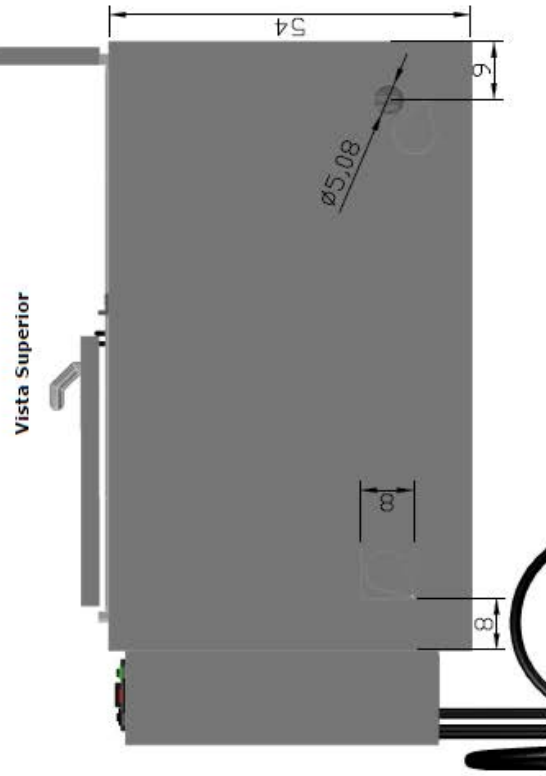
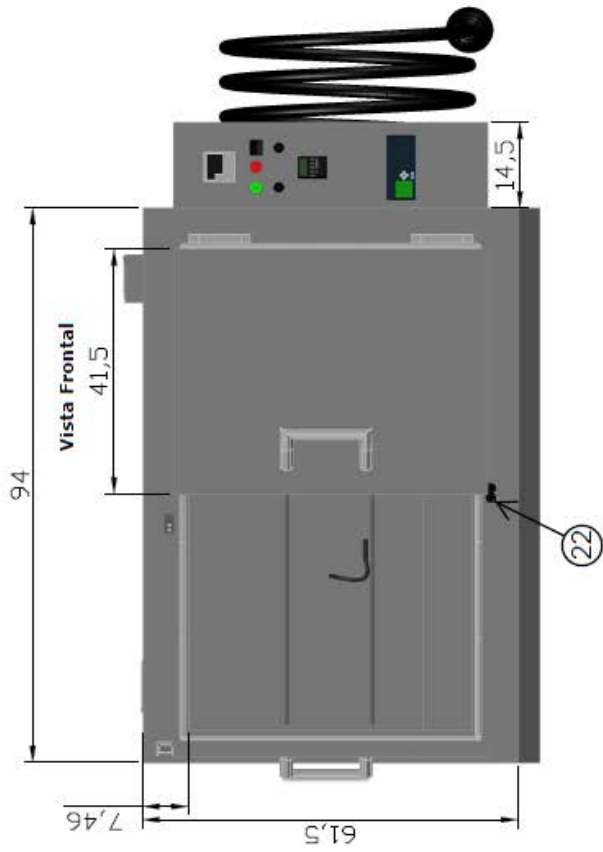
|                      |   |                            |               |
|----------------------|---|----------------------------|---------------|
| ESCALA: N/A          | PLANO EN LÁMINA: Vista general del EEMA | DISEÑADOR: S. Viana Guzmán | LÁMINA 1 DE 6 |
| ACOTADO: CENTÍMETROS |   | Mayo/2022                  |               |



Vista Isométrica



Vista al Armario Eléctrico

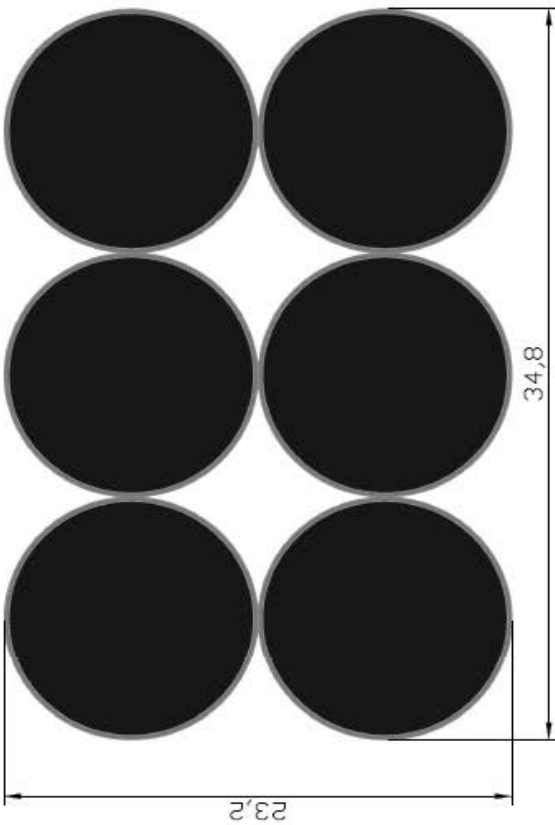


Vista Superior

**PLANO CONSTRUCTIVO DEL EQUIPO DE ENVEJECIMIENTO POR METEORIZACIÓN ACCELERADA (EEMA)**

|                      |  |           |               |
|----------------------|--|-----------|---------------|
| ESCALA: N/A          | PLANO EN LÁMINA: Horno convectivo original | Mayo/2022 | LÁMINA 2 DE 6 |
| ACOTADO: CENTÍMETROS | DISEÑADOR: S. Viana Guzmán                 |           |               |

Distribución de portamuestras



Vista Lateral



11,2

18

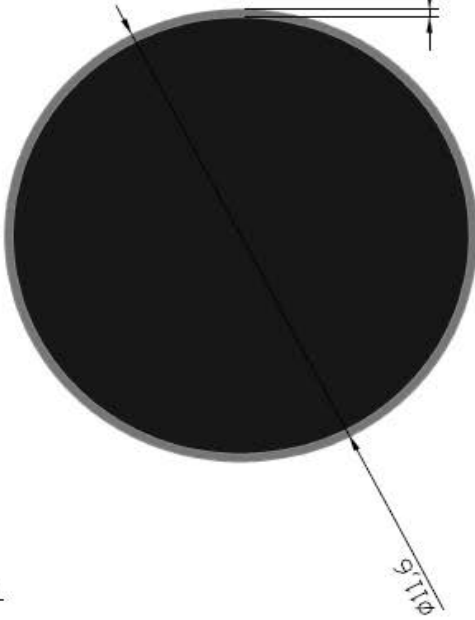


Vista Frontal

0,2

ø11,5

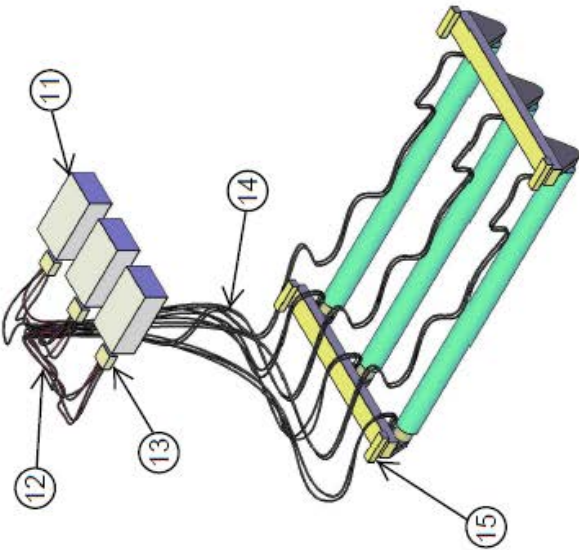
Vista Superior de Portamuestras



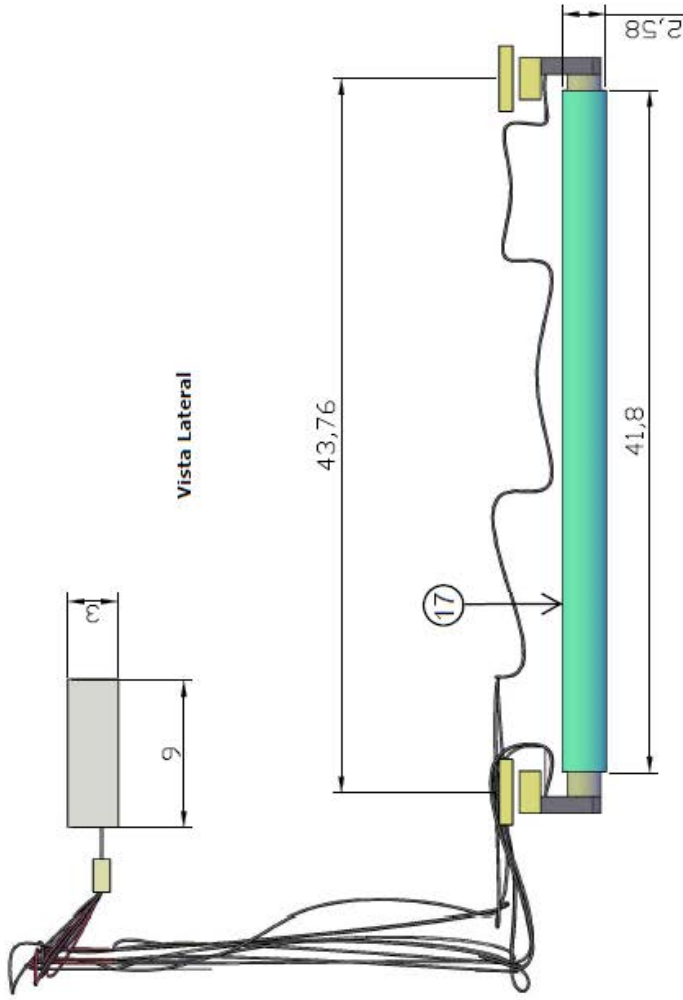
**PLANO CONSTRUCTIVO DEL EQUIPO DE ENVEJECIMIENTO POR METEORIZACIÓN ACCELERADA (EEMA)**

|                      |  |           |               |
|----------------------|--|-----------|---------------|
| ESCALA: N/A          | PLANO EN LÁMINA: Detalle de los portamuestras implementados en el EEMA | Mayo/2022 | LÁMINA 3 DE 6 |
| ACOTADO: CENTÍMETROS | DISEÑADOR: S. Viana Guzmán   |           |               |

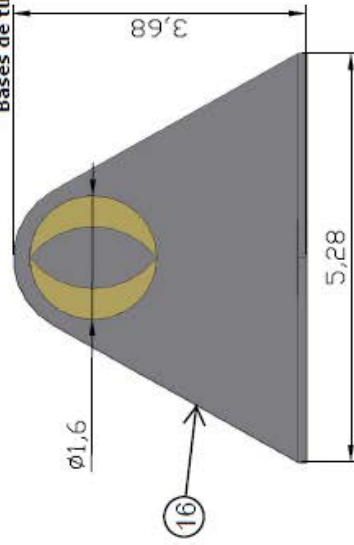
Vista Isométrica



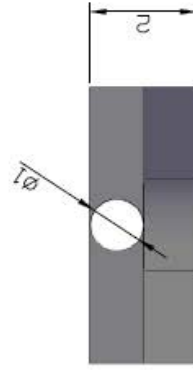
Vista Lateral



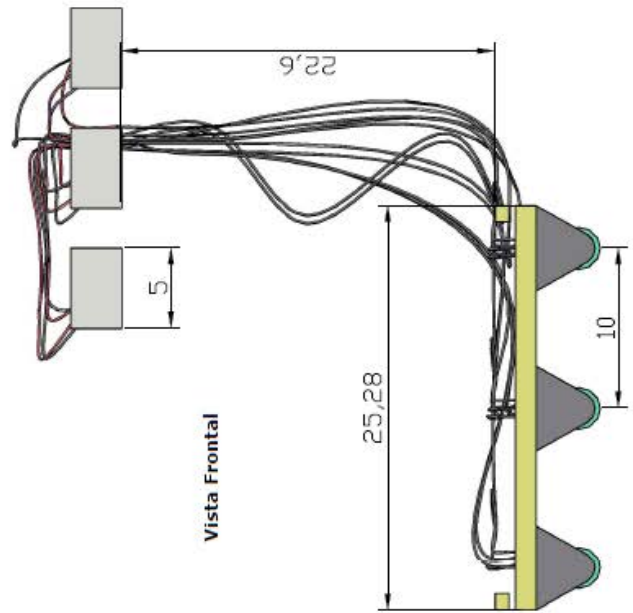
Bases de tubo fluorescente



Vista Superior



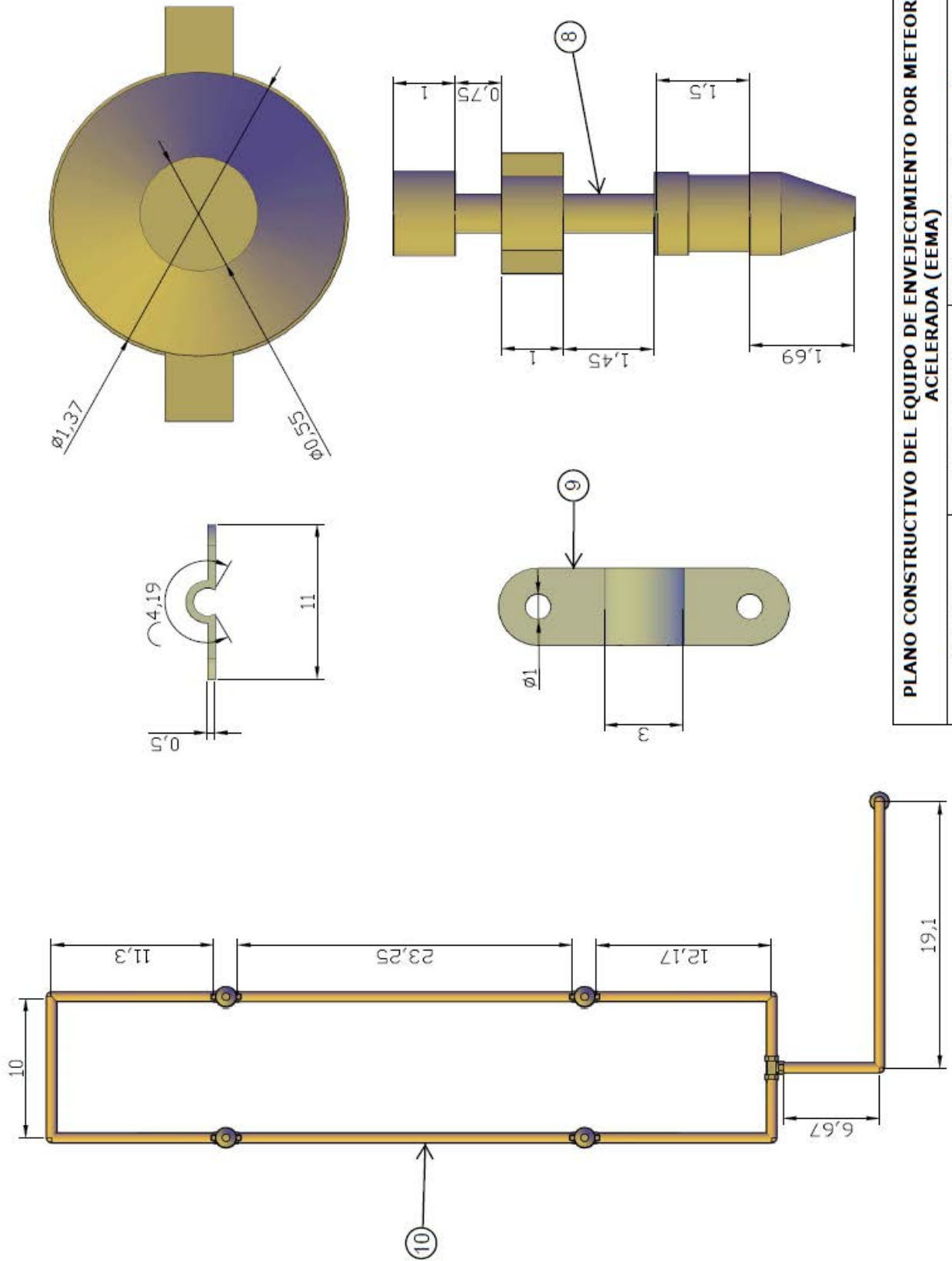
Vista Frontal



Vista Frontal

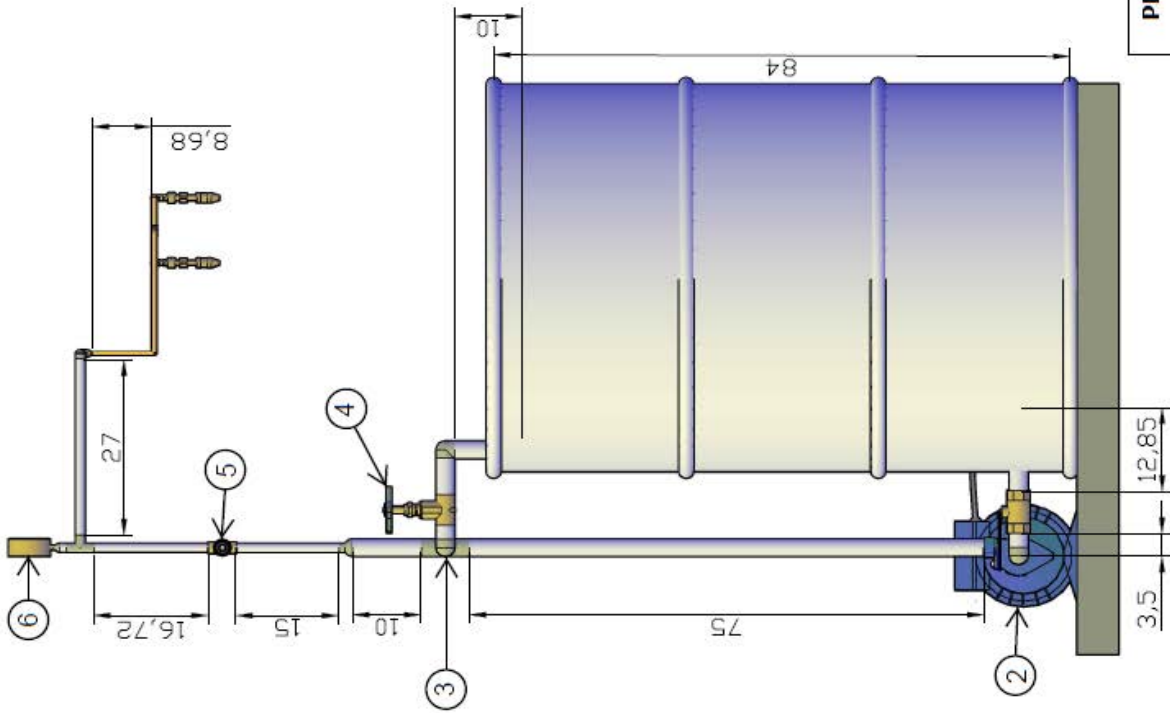
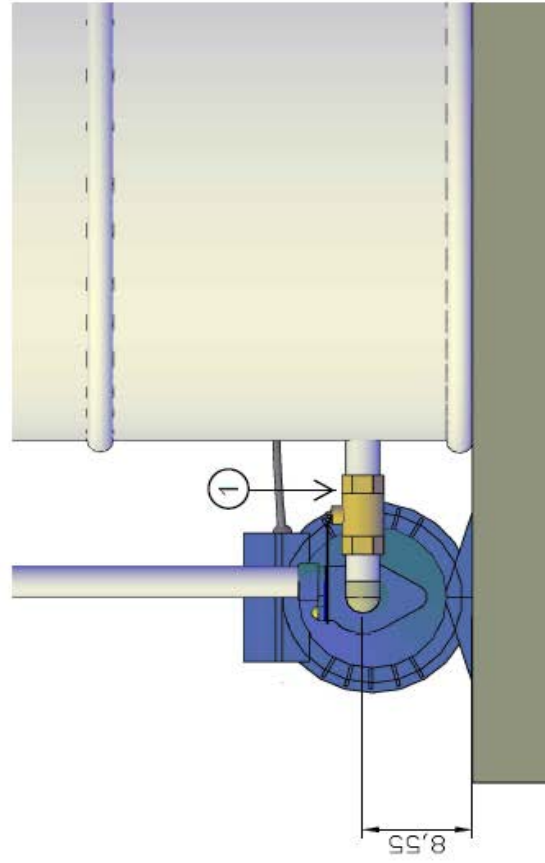
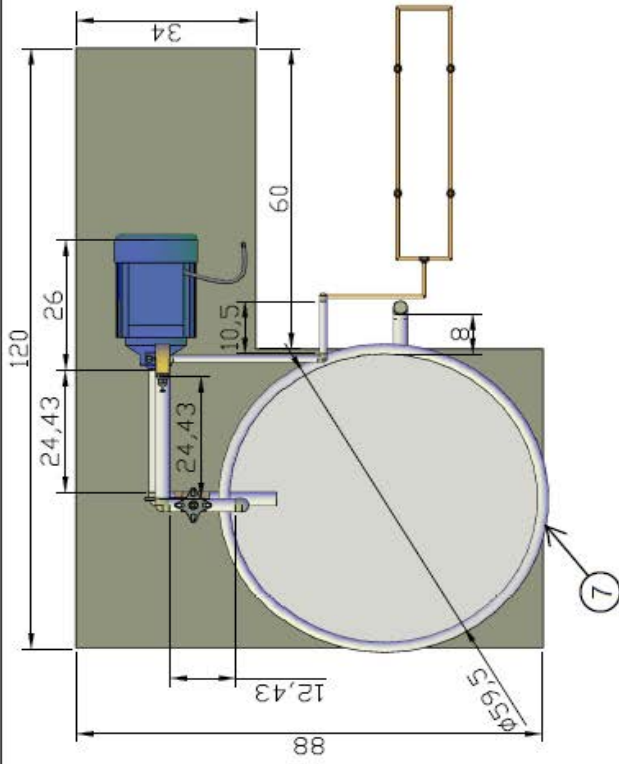
**PLANO CONSTRUCTIVO DEL EQUIPO DE ENVEJECIMIENTO POR METEORIZACIÓN ACCELERADA (EEMA)**

|                      |  |           |               |
|----------------------|--|-----------|---------------|
| ESCALA: N/A          | PLANO EN LÁMINA: Vistas generales del sistema de Radiación | Mayo/2022 | LÁMINA 4 DE 6 |
| ACOTADO: CENTÍMETROS | DISEÑADOR: S. Viana Guzmán                                 |           |               |



**PLANO CONSTRUCTIVO DEL EQUIPO DE ENVEJECIMIENTO POR METEORIZACIÓN ACCELERADA (EEMA)**

|                      |   |           |               |
|----------------------|---|-----------|---------------|
| ESCALA: N/A          | PLANO EN LÁMINA: Detalle y distribución del ramal de aspersores | Mayo/2022 | LÁMINA 5 DE 6 |
| ACOTADO: CENTÍMETROS | DISEÑADOR: S. Viana Guzmán                                      |           |               |



**PLANO CONSTRUCTIVO DEL EQUIPO DE ENVEJECIMIENTO POR METEORIZACIÓN ACCELERADA (EEMA)**

|                      |  |                            |               |
|----------------------|--|----------------------------|---------------|
| ESCALA: N/A          | PLANO EN LÁMINA: Vistas generales del sistema de Aspersión | DISEÑADOR: S. Viana Guzmán | LÁMINA 6 DE 6 |
| ACOTADO: CENTÍMETROS |  | Mayo/2022                  |               |

# FICHA TÉCNICA DE PRODUCTOS



|               |            |
|---------------|------------|
| Fecha         | 30/01/2018 |
| Modificó      |            |
| Fecha de Mod. |            |
| Versión       | 1          |

## DATOS GENERALES

### Nombre:

|                    |                  |                                  |                  |
|--------------------|------------------|----------------------------------|------------------|
| Ventón largo:      | BOMBA PERIFERICA | Nombre en sistema:               | BOMBA PERIFERICA |
| Nombre en Inglés:  | PERIPHERAL PUMP  | Código de producto:              | TC2666           |
| Inner de venta:    | 1                | Medida de venta:                 | 2                |
| Código Individual: | 7501892862422    | Código Inner:                    | 17501892862429   |
|                    |                  | Código Master:                   | 27501892862426   |
|                    |                  | Marca:                           | TOOLCRAFT        |
|                    |                  | Código de la Marca para Sistema: | TC               |

### Clasificación:

|            |  |          |                     |          |                  |             |                                 |
|------------|--|----------|---------------------|----------|------------------|-------------|---------------------------------|
| Categoría: | #(REP)<br>Manufacturas metálicas (94C) | Mercado: | #(REP)<br>Industria | Familia: | #(REP)<br>BOMBAS | Subfamilia: | #(REP)<br>BOMBA CENTRIFUGA (BP) |
|------------|--|----------|---------------------|----------|------------------|-------------|---------------------------------|

### Descripción de Producto:

BOMBA PERIFERICA, OPERACIÓN SILENCIOSA, MONTADA SOBRE RODAMIENTO BLINDADO, MOTOR DE INDUCCION, PARA AGUA LIMPIA, MUEVE AGUA CON ALTA CAPACIDAD DE PRESION Y BAJO FLUJO

### Unidad de Empaque

- ATADO  
 PIEZA  
 BOLLO

### Pacificación maestra

- SI  
 NO

### Restricciones

|  |                                      |     |                             |           |
|--|--------------------------------------|-----|-----------------------------|-----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> OM-050 | Certificación para importación:      | NO  | Caducidad:                  | NO APLICA |
| <input type="checkbox"/> OM                | Organismo certificado:               | N/A | Promedio de ventas mensual: |           |
|  | Certificación para comercialización: | NO  | Existencia de seguridad:    |           |
| Plasador:                                  |                                      |     |                             |           |

### Especificación

### MECÁNICO

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| Peso                     | 5 KG  |
| Medida                   |       |
| Largo de cable           | 20 CM |
| Cabeza total             | 5 MTS |
| Profundidad de operación | 8 MTS |
| Dureza                   |       |
| Torque                   |       |
| Material principal       | ACERO |
| Material secundario      |       |
| Temperatura              | 35° C |
| Tipo de acabado          |       |

|                    |             |
|--------------------|-------------|
| Potencia           | 1/2 HP      |
| Voltaje            | 120 V~      |
| Frecuencia         | 60 Hz       |
| R/MIN.             | 3,450 R.P.M |
| Diametro de salida | 25,4 MM     |
| Profundidad        | 8 M         |
| Altura manométrica | 30 MTS      |
| Flujo maximo       | 35 L/mtn    |
|                    |             |
|                    |             |

### Especificación de empaque y etiquetado

|                       |  |   |           |
|-----------------------|--|---|-----------|
| Etiquetado adicional: | NO   | No etiquetado para su venta individual: | NO APLICA |
| Garantía:             |  | Norma:                                  | N/A       |
| Paquetes Instructivo: | <input type="checkbox"/> SI <input checked="" type="checkbox"/> NO | Contenido:                              | 1 PZA     |

Observaciones especiales (textiles, firmables, puros cortantes, caducidad, etc.):

\*La garantía solo aplica contra defectos de fábrica.

### PRECAUCIONES





## Y. ANEXOS DEL CAPÍTULO 2

Los anexos que se presentan en las siguientes páginas corresponden al Manual de Equipo del EEMA. Para garantizar su legibilidad cada página del Manual ocupa una página completa del presente trabajo, además las descripciones de cada imagen corresponden a la numeración de página, por lo que en el Cuadro Y.1 solo se adjunta el rango de las figuras y un nombre global.

**Cuadro Y.1.** Descripción global del Manual del EEMA.

| <b>Número de Figura</b> | <b>Descripción</b>                              | <b>Páginas</b> |
|-------------------------|---|----------------|
| Y.1-28                  | Manual del EEMA                                 |                |
| Y.1                     | Portada del Manual del EEMA                     |                |
| Y.2                     | Índice del Manual del EEMA                      |                |
| Y.3                     | Introducción del Manual del EEMA                |                |
| Y.4-7                   | Esquema del EEMA                                |                |
| Y.8                     | Componentes del EEMA                            |                |
| Y.9-10                  | Experimentos del EEMA                           |                |
| Y.11-19                 | Procedimiento para ensayos en el EEMA           |                |
| Y.20-25                 | DFMEA del EEMA                                  |                |
| Y.26                    | Documentación de referencia del Manual del EEMA |                |
| Y.27                    | Espacio para anotaciones                        |                |
| Y.28                    | Contra cubierta                                 |                |

P-01-2022

# Manual del Equipo de Envejecimiento por Meteorización de los Asfaltos (EEMA)

**Por:**  
**S. Viana Guzmán**

## ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| A. Introducción.....   | 2  |
| B. Esquema del EEMA .....                                      | 3  |
| C. Componentes del EEMA .....                                  | 7  |
| D. Experimentos en el EEMA.....                                | 8  |
| E. Procedimiento para ensayos en el EEMA                       |    |
| E.1. Indumentaria de seguridad e inspección inicial.....       | 10 |
| E.2. Conexiones y encendido.....                               | 12 |
| E.3. Colocación de muestras.....                               | 13 |
| E.4. Pre calentamiento.....                                    | 14 |
| E.5. Subciclo de radiación.....                                | 14 |
| E.6. Enfriamiento.....   | 15 |
| E.7. Subciclo de precipitación.....                            | 17 |
| E.8. Drenaje, limpieza y apagado.....                          | 17 |
| F. Análisis de los Modos y Efectos de Fallas de Diseño (DFMEA) |    |
| F.1. Escalas de Severidad, Ocurrencia y Detección.....         | 19 |
| F.2. DFMEA.....  | 21 |
| G. Documentación de Referencia.....                            | 25 |
| H. Notas.....  | 26 |

## **A. Introducción**

El Equipo para el Envejecimiento por Meteorización de los Asfaltos (EEMA) consiste en un prototipo que incorpora dos modificaciones significativas a un horno convectivo.

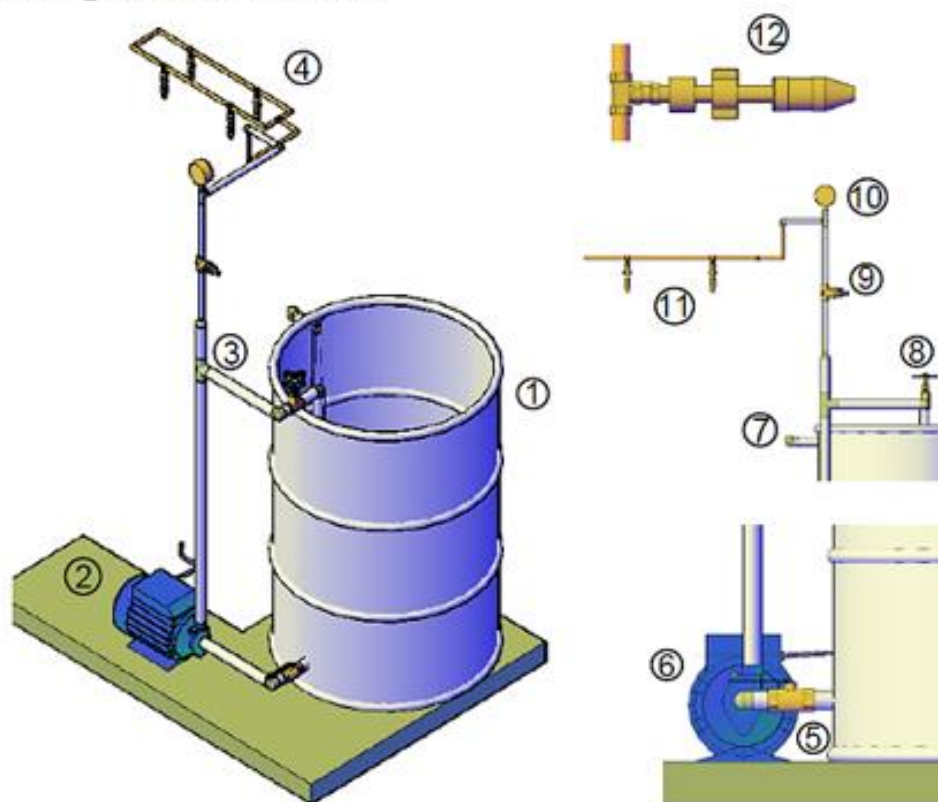
La primera de las modificaciones implica un sistema de aspersión para simular precipitaciones compuesto por un tanque de alimentación, válvulas de control de flujo y presión, una línea de trasiego en tres materiales, un manómetro de control de gotas y aspersores de rocío tipo gota.

El segundo agregado consiste en un sistema de radiación compuesto por tres lámparas de luz UV-C con cableado térmico desmontables cuando se ejecutan ensayos de precipitaciones.

Los alcances del prototipo EEMA se limitan a efectos de radiación, precipitaciones y altas temperaturas. Cabe destacar que la unidad no posee sistema de enfriamiento para ensayar bajas temperaturas y la operabilidad es manual, por lo que se recomienda enfáticamente, observar las disposiciones de seguridad.

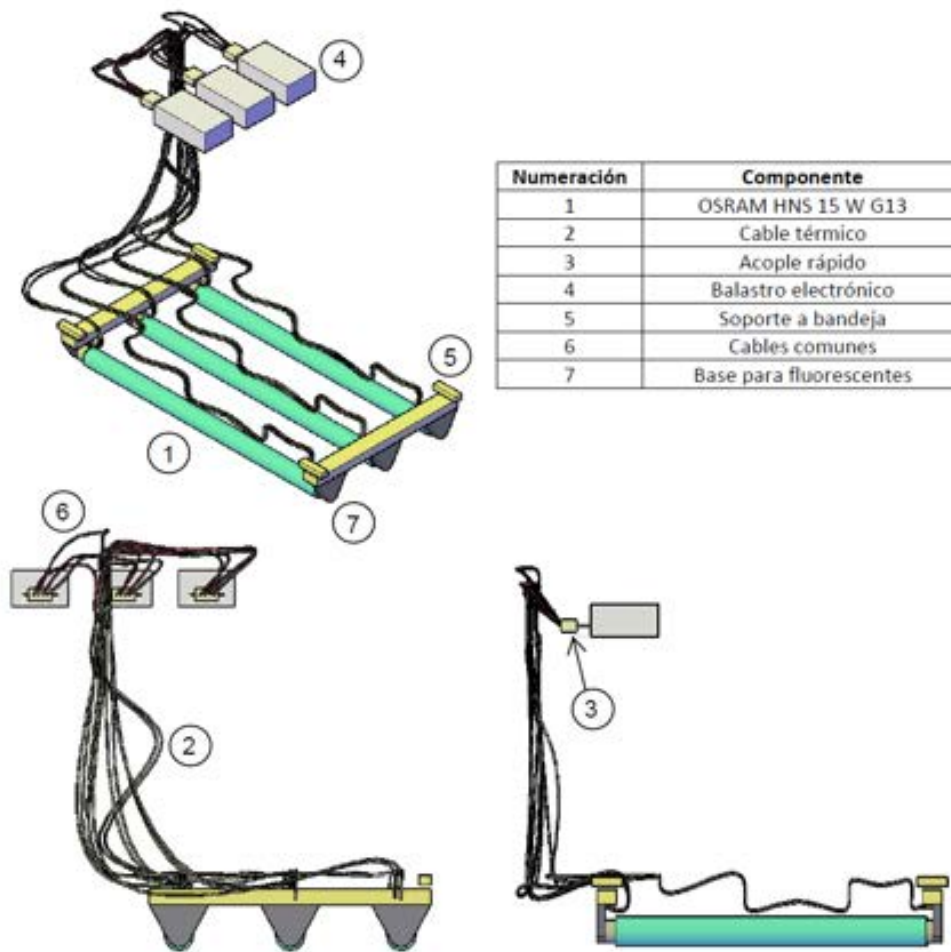
Los ciclos de ensayo brindados en el presente manual se limitan a tratar la variabilidad climatológica de Costa Rica.

## B. Esquema del EEMA



| IDEM | Descripción                               | IDEM | Descripción                          |
|------|---|------|--------------------------------------|
| 1    | Tanque de agua                            | 7    | Retorno                              |
| 2    | Zona de succión                           | 8    | Válvula de compuerta                 |
| 3    | Bypass regulador de caudal                | 9    | Válvula reguladora de presión 1/2 in |
| 4    | Zona de aspersión                         | 10   | Manómetro de glicerina               |
| 5    | Válvula de bola                           | 11   | Ramal de aspersión                   |
| 6    | Bomba periférica Toolcraft TC26666 1/2 Hp | 12   | Aspersor de bronce                   |

Figura B.1. Sistema de aspersión del EEMA



**Figura B.2.** Sistema de radiación del EEMA

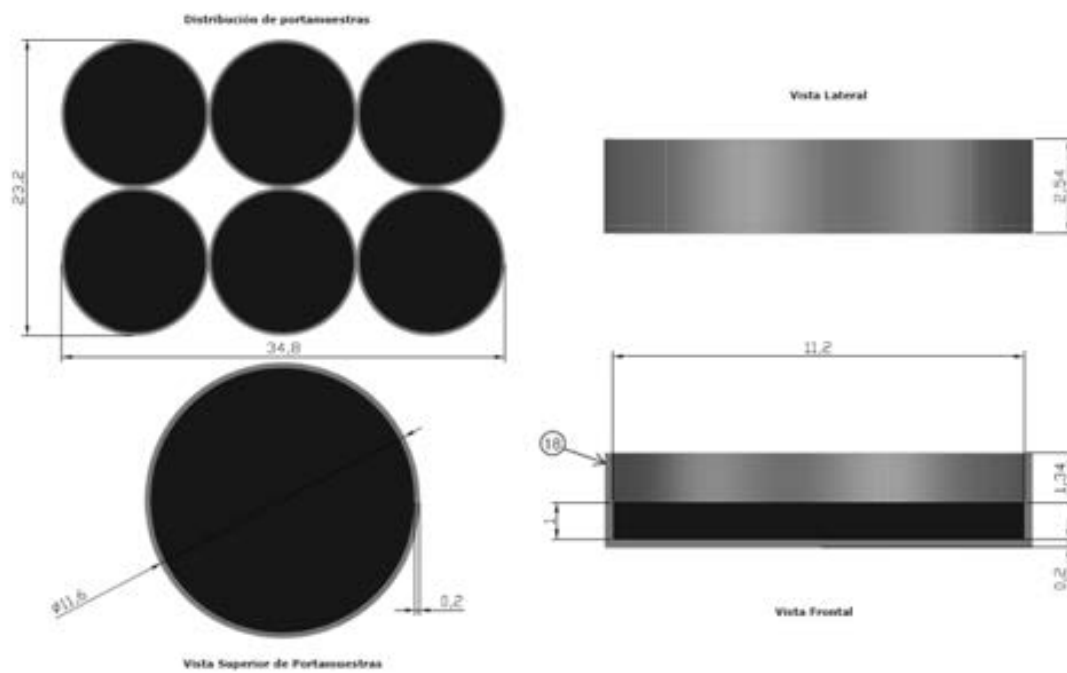
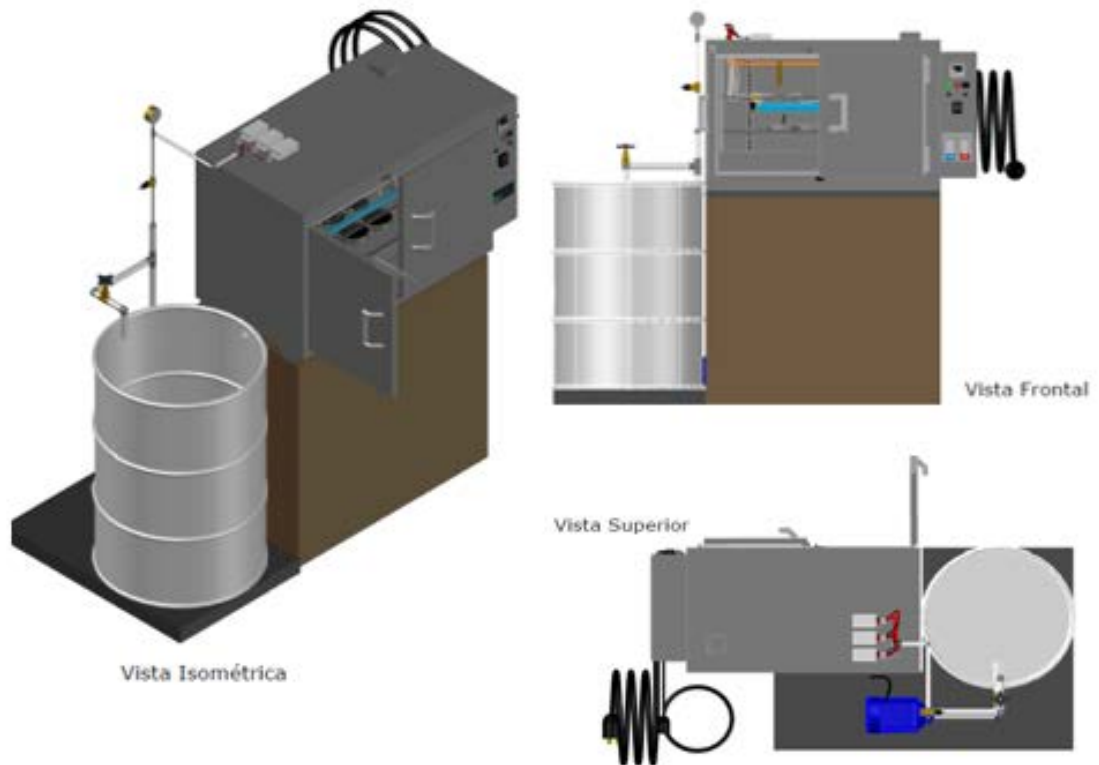


Figura B.3. Portamuestras del EEMA



**Figura B.4.** Vistas generales del EEMA



## C. Componentes del EEMA

**Cuadro C.1. Componentes constructivos del EEMA**

| Material   |
|--|
| Bomba periférica Toolcraft TC26666 ½ HP                        |
| Bombillos UV OSRAM HNS 15 W G13                                |
| Tanque de agua de 55 gal                                       |
| Manómetro de Glicerina de (0 – 100) psi, Macho                 |
| Válvula reguladora de presión de ½" y de (15 – 75) psi, hembra |
| Válvula de bola 1"   |
| Válvula de compuerta 1"  |
| Aspersores de bombas atomizadoras de ¼" NPT                    |
| Tubo PVC 1" Sch. 40  |
| Tubo PVC ½" Sch. 40  |
| Tubo Cobre 3/8"  |
| Uniones tubo-tubería en bronce ¼" NPT con sello mecánico       |
| Teflón de 1"   |
| Teflón de ½"   |
| Codo HG Sch. 40 ½"   |
| Codo HG Sch. 40 1"   |
| Reducción tipo campana HG 1" x ½" Sch. 40                      |
| Reducción tipo campana bronce ½" x ¼" NPT                      |
| Tees hembra bronce ¼" NPT                                      |
| Tee macho unión tubo-tubería con sello mecánico, bronce ¼" NPT |
| Tee HG hembra  |
| Sch. 40 1"   |
| Tee HG hembra  |
| Sch. 40 ½"   |
| Gaza doble ¾"  |
| Uniones hembra (tubo) – macho (tubería)                        |
| PVC Sch. 40 1"   |
| Uniones hembra (tubo) – macho (tubería)                        |
| PVC Sch. 40 1"   |
| Cable de fibra de vidrio 12 AWG 600V 250 °C                    |
| Balastro electrónico   |
| 1x17 W   |
| Base para fluorescentes  |
| Portmuestras aluminio  |
| Pintura blanca anticorrosiva                                   |

## D. Experimentos en el EEMA

**Cuadro D.1.** Notación de las siglas del tipo de ciclo según radiación, precipitaciones y temperatura.

| Descripción general de siglas |
|-------------------------------|
| S: seco                       |
| HS: húmedo seco               |
| H: húmedo                     |
| MH: Muy húmedo                |
| BI: Baja irradiancia          |
| MI: Media irradiancia         |
| AI: Alta irradiancia          |
| TB: temperatura máxima baja   |
| TI: Temperatura máxima media  |
| TA: temperatura máxima alta   |
| Tb: temperatura mínima baja   |
| Ti: temperatura mínima media  |
| Ta: temperatura mínima alta   |

**Cuadro D.2.** Notación y asociación de los ciclos de ensayos de envejecimiento acelerado por meteorización con base en factores meteorológicos costarricenses.

| Tipo de ciclo | Identificador | Regiones según la CMGV descritas en la Figura 1.1 y en el Cuadro 1.2      |
|---------------|---------------|---|
| S-MI-TA-ta    | A             | Cordillera de Guanacaste y Tilarán (CGT)                                  |
| S-MI-TI-ti    | B             | Valle Central (VC)  |
| S-AI-TA-ta    | C             | Golfo de Nicoya y Llanura Guanacasteca (GNG),<br>Península de Nicoya (PN) |
| HS-MI-TA-ta   | D             | Caribe Alta (CA), Caribe Sur (CS)   |
| HS-MI-TB-tb   | E             | Volcánica Central Pacífico (VCP)  |
| HS-BI-TA-ta   | F             | Upala y Los Chiles (UC)   |
| H-BI-TI-ti    | G             | Los Santos (LS), Talamanca (T)  |
| H-BI-TA-ta    | H             | Norte (N), Norte Alta (NA)  |
| H-MI-TA-ta    | I             | Pacífico Central (PC), Valle del General (VG)                             |
| MH-BI-TA-ta   | J             | Caribe (C), Pacífico Sur (PS)   |

**Cuadro D.3.** Ciclos de ensayos de envejecimiento acelerado por meteorización con base en factores meteorológicos costarricenses escalados a un año de exposición a la intemperie

| Parámetro  | Ciclo  |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | A      | B      | C      | D      | E      | F      | G      | H      | I      | J      |
| Tiempo del subciclo de calor y luz, $t_c$ (h)        | 3      | 3      | 4      | 3      | 3      | 3      | 3      | 3      | 3      | 3      |
| Tipo de radiación                                    | UVC    | UVC    | UVC    | UVC    | UVC    | UVC    | UVC    | UVC    | UVC    | UVC    |
| Longitud de onda, $\lambda$ (nm)                     | 240    | 240    | 240    | 240    | 240    | 240    | 240    | 240    | 240    | 240    |
| Temperatura del subciclo de calor, $T_c$ (°C)        | 64±2.5 | 58±2.5 | 64±2.5 | 64±2.5 | 46±2.5 | 64±2.5 | 58±2.5 | 64±2.5 | 64±2.5 | 64±2.5 |
| Tiempo del subciclo de condensación, $t_c$ (min)     | 11     | 11     | 12     | 16     | 16     | 18     | 23     | 23     | 21     | 25     |
| Temperatura del subciclo de condensación, $T_c$ (°C) | 19±2.5 | 15±2.5 | 19±2.5 | 19±2.5 | 8±2.5  | 19±2.5 | 15±2.5 | 19±2.5 | 19±2.5 | 19±2.5 |
| Total de subciclos de radiación                      | 17     | 17     | 14     | 17     | 17     | 15     | 15     | 15     | 17     | 15     |
| Total de subciclos de precipitación                  | 17     | 17     | 14     | 17     | 17     | 15     | 15     | 15     | 17     | 15     |

## E. Procedimiento para ensayos en el EEMA

### E.1. Indumentaria de seguridad e inspección inicial

Para la operabilidad del EEMA se requiere de la siguiente indumentaria de seguridad:

1. Lentes con protección UV oscuros.
2. Guantes anti cortadas con tallaje adecuado (la talla debe coincidir con el tamaño de las manos del analista).
3. Camiseta o camisa manga larga, ambas de colores claros y no muy holgadas para prevenir atrapamientos.
4. Zapatos antideslizantes.
5. Pantalón de tela gruesa o enagua larga

La inspección previa a operar el EMMA consiste en los siguientes puntos:

1. Verifique que el EEMA se encuentre desconectado.
2. Asegúrese que las extensiones del sistema de radiación y de bombeo **NO** se encuentran conectadas a los puertos de energización del EEMA (Figura E.1).
3. Revise que los botones que activan los sistemas de radiación y aspersion se encuentren en la posición **OFF** (Figura E.2).
4. Asegúrese que las válvulas de compuerta del *Bypass* de presión y de entrada a la bomba se encuentren totalmente abiertas y que la válvula reguladora de presión se encuentre totalmente cerrada (Figuras E.3).



**Figura E.1.** Alimentación a los sistemas de radiación y aspersión desconectadas.



**Figura E.2.** Botones de activación para los sistemas de aspersión y radiación en posición de apagado.



**Figura E.3.** De izquierda a derecha: válvulas del *Bypass* de presión, de la entrada de la bomba y reguladora de presión.

## E.2. Conexiones y encendido

1. Conecte el sistema de radiación del EEMA al toma de energización del EEMA y verifique que los acoples rápidos se encuentren conectados.
2. Conecte el EEMA al toma corriente de la pared de 220 V.
3. Presione el botón de encendido del EEMA (Figura E.4) y asegúrese que la temperatura inicial en la pantalla del controlador térmico es de 15 °C.



**Figura E.4.** Botón de encendido del EEMA.

### E.3. Colocación de las muestras

Para colocar las muestras de ensayo del EEMA se emplean portamuestras como los que se muestran en la Figura B.3. Seguidamente, se ejecutan los siguientes pasos:

1. Anote el valor de densidad del tipo de asfalto que desea estudiar.
2. Colóquese guantes contra calor.
3. Coloque en precalentamiento a 135 °C el asfalto por estudiar y un Beaker de inferior tamaño al que contiene la muestra original en un horno distinto al EMMA. Esto permite fluidizar el asfalto en estudio, lo cual facilita el vertido en los portamuestras.
4. Limpie los portamuestras de aluminio con una toalla de papel y alcohol.
5. Mida y anote el diámetro de los portamuestras por emplear y obtenga el valor promedio.
6. Escoja un valor de espesor de muestra y anótelo. Asegúrese que dicho valor no exceda la capacidad de los portamuestras.
7. Introduzca los datos de densidad del asfalto, espesor designado y diámetro del portamuestras en la Ecuación E.1. Con ello obtendrá la cantidad de masa requerida para lograr el espesor escogido en los portamuestras de ensayo.

$$M_{req} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot E \cdot \rho_{asfalto}}{4}$$

**Ecuación E.1.** Cálculo de masa requerida por portamuestra.

(Verifique siempre la consistencia dimensional).

8. Vierta del tanque receptor original al Beaker precalentado una cantidad de asfalto que aproxime los 3/4 de capacidad del Beaker. Procure que nada que contenga asfalto ni el asfalto mismo, se enfríen.
9. Coloque el portamuestra de la primera muestra en una balanza granataria y tare.

## Página 14

10. Vierta el asfalto en el portamuestras hasta que la balanza brinde una lectura de masa aproximada a la obtenida de la Ecuación E.1.
11. La masa que se registra por muestra es un valor de masa caliente.
12. Finalizada la medición, proceda a golpear con precaución, el portamuestra contra una superficie plana de modo que le permita liberar aire ocluido en el espécimen.
13. Deje enfriar las muestras y están listas para ensayo.

### E.4. Pre calentamiento

1. Disponga los portamuestras por ensayar de la forma más semejante a la distribución que se observa en la Figura B.3 (**MÁXIMO 6 PORTAMUESTRAS**) dentro del EEMA.
2. Centre el conjunto de portamuestras en la cámara del ensayo del EEMA y verifique la existencia de un espacio de aproximadamente 3 cm entre los bombillos UV y la capa superior de las muestras del EEMA.
3. Cierra las puertas del EEMA y configure la temperatura del subciclo de radiación en el controlador térmico, según el ciclo escogido del Cuadro D.3.
4. Deje estabilizar la temperatura del EEMA durante un periodo de 30 minutos.
5. Durante el tiempo de espera para la estabilidad térmica **NO** encienda el sistema de radiación.

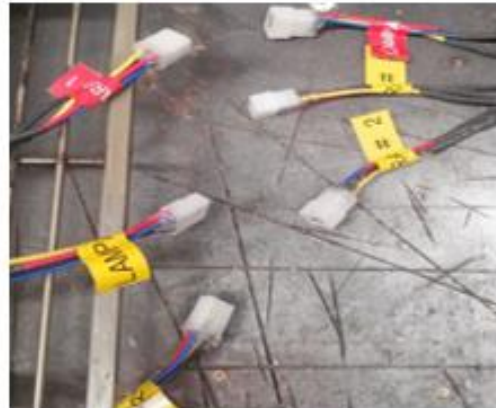
### E.5. Subciclo de radiación

1. Una vez alcanzada la estabilidad térmica, prepare un cronómetro y active los bombillos UV mediante el botón designado, tal como se observa en la Figura E.2.
2. Cuando finalice el tiempo de radiación del ciclo escogido del Cuadro D.3, apague el sistema de radiación.



### E.6. Enfriamiento

1. Baje la temperatura del controlador térmico hasta la temperatura del subciclo de precipitación para el ciclo escogido del Cuadro D.3.
2. Apague el EEMA mediante el botón de la Figura E.4.
3. Desconecte el sistema de radiación del canal de energización del EEMA.
4. Desconecte los acoples rápidos de los bombillos UV, tal como se observa en la Figura E.5.



**Figura E.5.** Acoples rápidos de los bombillos UV desconectados.

5. Hale los cables térmicos desde el interior del horno mientras empuja los acoples rápidos desde el exterior del horno según se muestra en la Figura E.6. Realice esta operación con precaución para evitar desprendimientos del cableado.
6. Coloque el módulo de radiación en un lugar seguro.
7. Cierre los aspersores totalmente y, luego, ábralos hasta 5 giros.
8. Verifique nuevamente que las válvulas del *Bypass* de presión y de entrada a la bomba están totalmente abiertas y la válvula reguladora de presión completamente cerrada.
9. Llene el tanque de agua del EEMA hasta 3/4 partes de capacidad.
10. Verifique que la bomba esté llena de agua. Esto se revisa cuando al quitar el tornillo de la Figura E.7 sale agua. En caso de no tener agua, llenar manualmente.



Figura E.6. Extracción de los Acoples rápidos.



Figura E.7. Tornillo para verificar que la bomba está llena de agua.

11. Conecte la bomba al canal de energización del EEMA.
12. Retire la bandeja con las muestras de ensayo.
13. Encienda el EEMA.
14. Encienda el sistema de aspersión. Puede notar que la bomba comienza a emitir un ruido agudo y constante, de no ser así, apague el sistema y llame al personal de mantenimiento.
15. Asegúrese que el manómetro no brinda ninguna lectura y que toda el agua vuelve al tanque a través del *Bypass* regulador de presión.
16. Configure la presión del manómetro entre 20 psi y 25 psi realizando lo siguiente:
  - 16.1. Abra gradualmente la válvula reguladora de presión (**no del todo**).
  - 16.2. Cierre gradualmente la válvula de compuerta del *Bypass* (**no del todo**).

17. Una vez lograda la presión indicada en el manómetro, apague el sistema de aspersión.

### **E.7. Subciclo de precipitación**

1. Verifique la temperatura configurada en el controlador térmico y la que brinda el sensor de temperatura.
2. Si la temperatura configurada es menor a la de ensayo puede enfriar encendiendo el sistema de aspersión hasta estabilidad térmica y, luego, introducir la bandeja de las muestras para iniciar el subciclo de aspersión.
3. Por otro lado, si la temperatura configurada es mayor o igual a la temperatura del sensor, puede introducir la bandeja de las muestras para iniciar el subciclo de aspersión.
4. Disponga los portamuestras por ensayar de la forma más semejante a la distribución que se observa en la Figura B.3 (**MÁXIMO 6 PORTAMUESTRAS**) dentro del EEMA.
5. Centre el conjunto de portamuestras en la cámara del ensayo del EEMA tal que la aspersión sea lo más homogénea posible.
6. Cierra las puertas del EEMA.
7. Prepare un cronómetro y active el sistema de aspersión mediante el botón designado, tal como se observa en la Figura E.2.
8. Cuando finalice el tiempo de aspersión del ciclo escogido del Cuadro D.3, apague el sistema de aspersión.

### **E.8. Drenaje, limpieza y apagado**

1. Apague el EEMA.

## Página 18

2. Desconecte el sistema de aspersión.
3. Desconecte el EEMA de la alimentación del edificio.
4. Deje drenar el EEMA hasta que el agujero de drenaje sobre salga del nivel del agua.
5. Coloque un embudo en el agujero de drenaje
6. Con un paño de tela absorbente, retire el agua remanente y retuerza el exceso de agua en el embudo.
7. Repita el paso 6 hasta sequedad.
8. Con un paño seco retire la humedad de las paredes internas del EEMA y el líquido excedente en los aspersores.
9. Introduzca el sistema de radiación al EEMA y su cableado de forma similar a como lo extrajo, según la Figura E.6.
10. Si se van a ejecutar ensayos constantemente, puede dejar fija la configuración de las válvulas.

## F. Análisis de los Modos y Efectos de Fallas de Diseño (DFMEA)

En la siguiente sección se detallan los aspectos de riesgos del diseño del EEMA. En el DFMEA se analizaron los componentes principales del EEMA bajo las categorías de severidad, ocurrencia y detección. Un valor de 10 supone el máximo en cada categoría.

### F.1. Escalas de severidad, ocurrencia y detección

**Cuadro F.1.** Escala de severidad para la evaluación de los componentes del EEMA

| Clasificación de severidad       | S  | Descripción  |
|----------------------------------|----|--|
| Peligro máximo sin advertencia   | 10 | Fallas durante la operación sin síntomas previsibles con efectos mortales                                    |
| Muy alto peligro con advertencia | 9  | Fallas durante la operación con síntomas previsibles con efectos mortales                                    |
| Muy alto peligro                 | 8  | Fallas durante la operación sin síntomas previsibles con lesiones presentes                                  |
| Alto peligro                     | 7  | Fallas durante la operación con síntomas previsibles con lesiones presentes                                  |
| Peligro moderado                 | 6  | Efectos mapeados sobre el usuario que no comprometen la vida   |
| Bajo peligro                     | 5  | Componente en operación con desperfectos y que no compromete la vida del usuario. Requiere reparación        |
| Muy bajo peligro                 | 4  | Existen efectos acumulativos previsibles que no comprometen la vida del usuario. Puede requerir reparaciones |
| Menor peligro                    | 3  | Operabilidad normal del componente con ajustes requeridos  |
| Mínimo peligro                   | 2  | Componente inoperable o deficiente   |
| Sin peligro                      | 1  | Desempeño normal del componente  |

**Cuadro F.2.** Escala de ocurrencia para la evaluación de los componentes del EEMA.

| Clasificación de ocurrencia | O  | Descripción  |
|-----------------------------|----|--|
| Máxima ocurrencia           | 10 | El componente siempre presenta el evento                 |
| Muy alta ocurrencia         | 9  | Evento muy altamente probable durante manipulación       |
| Alta ocurrencia             | 8  | Evento altamente probable durante manipulación           |
| Recurrente ocurrencia       | 7  | Evento probable aun con buenas prácticas                 |
| Común ocurrencia            | 6  | Evento de común ocurrencia producido por monotonía       |
| Ocasional ocurrencia        | 5  | Evento que, bajo condiciones específicas, sucede         |
| Baja ocurrencia             | 4  | Eventos en descuidos prolongados (12-24 horas)           |
| Muy baja ocurrencia         | 3  | Eventos en descuidos extensos (más de 24 horas)          |
| Remota ocurrencia           | 2  | Eventos bajo descuidos extensos y condiciones especiales |
| Mínima ocurrencia           | 1  | Componente transcurre sin fallas                         |

**Cuadro F.3.** Escala de detección para la evaluación de los componentes del EEMA.

| Clasificación de detección | D  | Descripción  |
|----------------------------|----|--|
| Imposible de detectar      | 10 | La falla es imperceptible  |
| Muy improbable de detectar | 9  | Se requiere de inspección muy rigurosa para detectar con desarme de componentes y uso de instrumentación |
| Improbable de detectar     | 8  | Se requiere de inspección rigurosa para detectar sin desarme, pero sí instrumentación                    |
| Baja detección             | 7  | Se requiere de inspección mediante instrumentación   |
| Muy baja detección         | 6  | La falla es audible  |
| Moderadamente detectable   | 5  | Se requiere inspección visual detallada y ajustes de prueba y error                                      |
| Alta detección             | 4  | Se requiere inspección visual detallada  |
| Muy alta detección         | 3  | Se requiere inspección visual  |
| Máxima detección           | 2  | La falla es perceptible a simple vista   |
| Certeza de presencia       | 1  | Se tiene certeza de un desperfecto de diseño que no compromete la operabilidad                           |

## F.2. DFMEA

Cuadro F.4. Análisis de los modos y efectos de fallas del diseño del DFMEA

| No. | Componente                  | Modo de falla                       | Causa de la falla   | Efecto de la falla   | S  | O  | D | PR  | PR máximo | Acciones preventivas  |
|-----|-----------------------------|-------------------------------------|---|--|----|----|---|-----|-----------|---|
| 1   | Bombillos UV                | Fisura o fractura en el bombillo    | Golpes, caídas, cambios de temperatura bruscos                      | Bombillo inoperable  | 5  | 2  | 2 | 20  | 128       | Instalar los bombillos posteriores a ajustar el soporte del sistema de radiación  |
|     |                             | Pérdida de potencia                 | Desgaste  | Incremento de tiempo de ensayo                                 | 2  | 10 | 1 | 20  |           | Medir la radiación, ajustar tiempos de ensayo, reemplazar bombillos en tiempos estándar   |
|     |                             | Liberación de vapor de mercurio     | Golpes y caídas   | Bombillo inoperable, peligro de salud                          | 8  | 8  | 2 | 128 |           | Manipular bombillos sobre bases suaves  |
|     |                             | Bombillos no energizados            | Contactos aislados  | Bombillo inoperable  | 2  | 6  | 2 | 24  |           | Inspeccionar y limpiar contactos previo a cada ensayo   |
| 2   | Armario eléctrico del horno | Horno no enciende                   | Enchufe aislado, cables desconectados                               | Equipo inoperable sin peligros a la salud                      | 2  | 5  | 9 | 90  | 350       | Inspeccionar y limpiar contactos previo a cada ensayo. Realizar mantenimiento rutinario al armario eléctrico  |
|     |                             | Corto circuito                      | Cables no aislados, contactos entre los núcleos de cables distintos | Equipo dañado, inoperable y peligroso                          | 10 | 5  | 7 | 350 |           | Realizar mantenimiento periódico y emplear multimetro para detectar superficies energizadas, además de emplear guantes aislantes  |
|     |                             | Algunos componentes no se energizan | Cables desconectados, tornillos de regleta interna harridos         | Equipo inoperable, potenciales peligros                        | 7  | 2  | 9 | 126 |           |   |
|     |                             | Carcasa energizada                  | Cables en contacto con la carcasa                                   | Equipo inoperable y con peligro de descargas eléctricas        | 10 | 5  | 7 | 350 |           |   |
| 3   | Resistencia térmica         | La resistencia no genera calor      | Resistencia quemada   | Componente inoperable  | 2  | 5  | 5 | 50  | 350       | Realizar acondicionamientos térmicos, inspección, realizar mantenimiento periódico y emplear multimetro para detectar superficies energizadas, además de emplear guantes aislantes  |
|     |                             | Carcasa energizada                  | Resistencia no aislada  | Equipo inoperable y con peligro de descargas eléctricas        | 10 | 5  | 7 | 350 |           |   |
| 4   | Bases de los bombillos      | Polímero fundido                    | Temperaturas mayores a las de tolerancia                            | Sistema de radiación inoperable                                | 2  | 2  | 2 | 8   | 20        | Emplear bases que resistan temperaturas de hasta 100 °C   |
|     |                             | Contactos oxidados                  | Efecto acumulado de humedad retenida                                | Baja potencia o inoperabilidad                                 | 2  | 2  | 2 | 8   |           | Proteger contactos de la humedad  |
|     |                             | Caída o movimiento de la pieza      | Tornillo de ajuste harrido o mal instalado                          | Sistema operable con riesgo de electrocución                   | 5  | 2  | 2 | 20  |           | Ajustar bien los tornillos de soporte y probar desprenderlos previo operación   |
| 5   | Ventilador                  | Ventilador atorado                  | Tuercas sobre ajustadas, resistencia eléctrica desmontada           | Distribución de calor no uniforme, sistema operable con fallas | 2  | 2  | 4 | 16  | 90        | Verificar el estado del eje del ventilador y la libre rotación. Además, inspeccionar la aparición de óxido periódicamente. Realizar mantenimiento periódico y emplear multimetro para detectar superficies energizadas, además de emplear guantes aislantes |
|     |                             | Rotación con ruidos                 | Eje desajustado   | Distribución de calor no uniforme, sistema operable            | 2  | 5  | 6 | 60  |           |   |
|     |                             | Desprendimiento del ventilador      | Tuerca de eje ausente   | Distribución de calor no uniforme, riesgo de electrocución     | 5  | 2  | 6 | 60  |           |   |
|     |                             | Eje de rotación pulido              | Mal torquedo  | Riesgo de desprendimiento del ventilador                       | 2  | 5  | 9 | 90  |           |   |

## Página 22

**Cuadro F.4 (Continuación). Análisis de los modos y efectos de fallas del diseño del DFMEA**

| No. | Componente           | Modo de falla   | Causa de la falla                                       | Efecto de la falla                                     | S | O | D | PR | PR máximo | Acciones preventivas  |
|-----|----------------------|-----------------|---|--|---|---|---|----|-----------|---|
| 6   | Tubería PVC          | Fisuras         | Material deteriorado, sobre exposición al sol           | Riesgo de fracturas y fugas, sistema inoperable        | 2 | 2 | 2 | 8  | 60        | Realizar una prueba de fugas preliminar. Inspeccionar el estado general de la tubería y reemplazar componentes con desgaste. Mantener fuera de la luz directa del sol |
|     |                      | Fracturas       | Golpe de ariete, golpes o caídas de material            | Sistema inoperable, con riesgos físicos significativos | 9 | 2 | 2 | 36 |           |   |
|     |                      | Fugas           | Ausencia de teflón, ajustes inadecuados                 | Derrames y riesgo de caídas                            | 6 | 5 | 2 | 60 |           |   |
| 7   | Tubería Cobre        | Fisuras         | Material deteriorado                                    | Riesgo de fracturas y fugas, sistema inoperable        | 2 | 2 | 2 | 8  | 60        | Realizar una prueba de fugas preliminar. Inspeccionar el estado general de la tubería y reemplazar componentes con desgaste.  |
|     |                      | Fracturas       | Golpe de ariete, golpes o caídas de material            | Sistema inoperable, con riesgos físicos significativos | 9 | 2 | 2 | 36 |           |   |
|     |                      | Fugas           | Ausencia de teflón, ajustes inadecuados                 | Derrames y riesgo de caídas                            | 6 | 5 | 2 | 60 |           |   |
|     |                      | Corrosión       | Desgaste, limpieza inadecuada, mal tratamiento de aguas | Riesgo de fisuras, fracturas y derrames                | 6 | 2 | 2 | 24 |           |   |
| 8   | Tubería bronce       | Fisuras         | Material deteriorado                                    | Riesgo de fracturas y fugas, sistema inoperable        | 2 | 2 | 2 | 8  | 60        | Realizar una prueba de fugas preliminar. Inspeccionar el estado general de la tubería y reemplazar componentes con desgaste.  |
|     |                      | Fracturas       | Golpe de ariete, golpes o caídas de material            | Sistema inoperable, con riesgos físicos significativos | 9 | 2 | 2 | 36 |           |   |
|     |                      | Fugas           | Ausencia de teflón, ajustes inadecuados                 | Derrames y riesgo de caídas                            | 6 | 5 | 2 | 60 |           |   |
|     |                      | Corrosión       | Desgaste, limpieza inadecuada, mal tratamiento de aguas | Riesgo de fisuras, fracturas y derrames                | 6 | 2 | 2 | 24 |           |   |
| 9   | Válvula de bola      | Fisuras         | Material deteriorado                                    | Riesgo de fracturas y fugas, sistema inoperable        | 2 | 2 | 2 | 8  | 90        | Realizar una prueba de fugas preliminar. Inspeccionar el estado general de la válvula, reemplazarla cuando sea necesario. Engrasar piezas móviles.                    |
|     |                      | Fracturas       | Golpe de ariete, golpes o caídas de material            | Sistema inoperable, con riesgos físicos significativos | 9 | 2 | 2 | 36 |           |   |
|     |                      | Fugas           | Ausencia de teflón, ajustes inadecuados                 | Derrames y riesgo de caídas                            | 6 | 5 | 2 | 60 |           |   |
|     |                      | Corrosión       | Desgaste, limpieza inadecuada, mal tratamiento de aguas | Riesgo de fisuras, fracturas y derrames                | 6 | 2 | 2 | 24 |           |   |
|     |                      | Piezas atoradas | Falta de lubricación                                    | Riesgo de golpe de ariete y daños a la bomba           | 9 | 2 | 5 | 90 |           |   |
| 10  | Válvula de compuerta | Fisuras         | Material deteriorado                                    | Riesgo de fracturas y fugas, sistema inoperable        | 2 | 2 | 2 | 8  | 90        | Realizar una prueba de fugas preliminar. Inspeccionar el estado general de la válvula, reemplazarla cuando sea necesario. Engrasar piezas móviles.                    |
|     |                      | Fracturas       | Golpe de ariete, golpes o caídas de material            | Sistema inoperable, con riesgos físicos significativos | 9 | 2 | 2 | 36 |           |   |
|     |                      | Fugas           | Ausencia de teflón, ajustes inadecuados                 | Derrames y riesgo de caídas                            | 6 | 5 | 2 | 60 |           |   |
|     |                      | Corrosión       | Desgaste, limpieza inadecuada, mal tratamiento de aguas | Riesgo de fisuras, fracturas y derrames                | 6 | 2 | 2 | 24 |           |   |
|     |                      | Piezas atoradas | Falta de lubricación                                    | Riesgo de golpe de ariete y daños a la bomba           | 9 | 2 | 5 | 90 |           |   |



Cuadro F.4 (Continuación). Análisis de los modos y efectos de fallas del diseño del DFMEA

| No. | Componente         | Modo de falla           | Causa de la falla                                       | Efecto de la falla  | S | O | D | PR  | PR máximo | Acciones preventivas  |
|-----|--------------------|-------------------------|---|---|---|---|---|-----|-----------|---|
| 11  | Válvula reguladora | Fisuras                 | Material deteriorado                                    | Riesgo de fracturas y fugas, sistema inoperable                   | 2 | 2 | 2 | 8   | 90        | Realizar una prueba de fugas preliminar. Inspeccionar el estado general de la válvula, reemplazarla cuando sea necesario. Engrasar piezas móviles.  |
|     |                    | Fracturas               | Golpe de ariete, golpes o caídas de material            | Sistema inoperable, con riesgos físicos significativos            | 9 | 2 | 2 | 36  |           |   |
|     |                    | Fugas                   | Ausencia de teflón, ajustes inadecuados                 | Derrames y riesgo de caídas                                       | 6 | 5 | 2 | 60  |           |   |
|     |                    | Corrosión               | Desgaste, limpieza inadecuada, mal tratamiento de aguas | Riesgo de fisuras, fracturas y derrames                           | 6 | 2 | 2 | 24  |           |   |
|     |                    | Piezas atoradas         | Falta de lubricación                                    | Riesgo de golpe de ariete y daños a la bomba                      | 9 | 2 | 5 | 90  |           |   |
| 12  | Aspersores         | Poco o nulo flujo       | Material obstructivo                                    | Riesgo de golpe de ariete y daños a los aspersores                | 7 | 5 | 5 | 175 | 175       | Realizar una prueba de fugas preliminar. Inspeccionar el estado general de los aspersores y reemplazarlos cuando sea necesario. Colocar un filtro en la línea de succión para prevenir la obstrucción por particulado en los aspersores |
|     |                    | Fugas                   | Ausencia de teflón, ajustes inadecuados                 | Flujo inadecuado, daños a empaques de aspersores                  | 6 | 5 | 2 | 60  |           |   |
|     |                    | Piezas atoradas         | Falta de lubricación                                    | Riesgo de golpe de ariete y daños a los aspersores                | 9 | 2 | 5 | 90  |           |   |
|     |                    | Piezas pulidas          | Mal torqueado   | Flujo inadecuado, daños a empaques de aspersores                  | 2 | 5 | 5 | 50  |           |   |
| 13  | Uniones internas   | Burbujeo                | Agujeros pequeños en el aislamiento                     | Riesgo de filtración y corto circuito                             | 9 | 5 | 3 | 135 | 180       | Aplicar sellador de unimes "duretán" y dejar secar por 48 h. Verificar con aire o pequeñas cantidades de agua con el equipo apagado, la filtración de fluidos   |
|     |                    | Fugas externas          | Agua filtrada del interior al exterior                  | Riesgo de derrames y caídas                                       | 7 | 5 | 2 | 70  |           |   |
|     |                    | Filtración de aguas     | Ausencia de aislamiento adecuado                        | Pérdidas de capacidad aislante térmica y riesgo de corto circuito | 9 | 5 | 4 | 180 |           |   |
| 14  | Bomba              | Sonidos inusuales       | Eje desajustado   | Riesgo de cavitación  | 5 | 5 | 6 | 150 | 150       | Verificar cebado de la bomba previo a la ejecución de ensayos. Revisar el ajuste de los pernos de la bomba. Encender y escuchar la operabilidad de la bomba. Iniciar el sistema con todas las válvulas abiertas                         |
|     |                    | Vibraciones             | Mal fijado al suelo                                     | Riesgo de fracturas y fugas, sistema inoperable                   | 7 | 5 | 2 | 70  |           |   |
|     |                    | No hay trasiego de agua | Bomba no cebada   | Sistema inoperable, riesgo de daño a la bomba                     | 2 | 5 | 4 | 40  |           |   |
|     |                    | Bomba no energizada     | Cables quebrados, motor dañado                          | Sistema inoperable  | 2 | 5 | 2 | 20  |           |   |
| 15  | Manómetro          | No proporciona lectura  | Aguja indicadora desajustada o rota                     | Sistema operable con potencial daño a los aspersores              | 2 | 5 | 2 | 20  | 70        | Verificar mediante flujos pequeños de agua, el funcionamiento del manómetro. Reemplazar de ser necesario  |
|     |                    | Vibraciones inusuales   | Pérdida de glicerina                                    | Sistema operable con riesgo de golpe de ariete                    | 7 | 5 | 2 | 70  |           |   |
|     |                    | Escala muy fluctuante   | Falta de purgado  | Sistema operable con riesgo de golpe de ariete                    | 7 | 5 | 2 | 70  |           |   |

Cuadro F.4 (Continuación). Análisis de los modos y efectos de fallas del diseño del DFMEA

| No. | Componente            | Modo de falla               | Causa de la falla                          | Efecto de la falla                                      | S  | O | D | PR  | PR máximo | Acciones preventivas   |
|-----|-----------------------|-----------------------------|--|---|----|---|---|-----|-----------|--|
| 16  | Acoples rápidos       | Contactos oxidados          | Suciedad y humedad acumuladas              | Inoperabilidad del sistema                              | 2  | 2 | 2 | 8   | 420       | Realizar las conexiones con el EEMA apagado y desde un ángulo de visión superior a fin de verificar que los contactos no estén torcidos u oxidados. Realizar mantenimiento periódico y emplear multímetro para detectar superficies energizadas, además de emplear guantes aislantes |
|     |                       | Contactos torcidos          | Conexiones inadecuadas                     | Riesgo de electrocución y daños colaterales al cableado | 9  | 6 | 3 | 162 |           |  |
|     |                       | Descargas de corriente      | Aislamiento de cableado deficiente         | Electrocución y riesgo de energización de la carcasa    | 10 | 6 | 7 | 420 |           |  |
|     |                       | Carcasa plástica dañada     | Golpes o caídas                            | Riesgo de electrocución y daños colaterales al cableado | 10 | 2 | 2 | 40  |           |  |
| 17  | Compuestas            | Movimientos en las bisagras | Mal ajuste en los tornillos                | Escapes de calor y derrames                             | 6  | 2 | 3 | 36  | 60        | Ajustar las bisagras periódicamente, verificar cierre completo con el equipo apagado. Utilizar gafas de protección UV y ropa de corte largo para cubrir la mayoría de la piel  |
|     |                       | Fugas                       | Hules desgastados                          | Derrames y riesgo de caídas                             | 6  | 5 | 2 | 60  |           |  |
|     |                       | Fugas de irradiancia        | Prensa de cerrado dañada                   | Exposición a radiación UV y flujos de calor             | 6  | 2 | 2 | 24  |           |  |
|     |                       | Ruidos inusuales            | Falta de lubricación                       | Riesgo de cierre adecuado de puertas                    | 2  | 2 | 6 | 24  |           |  |
| 18  | Tanque de agua        | Fugas                       | Falta de aislamiento                       | Derrames y riesgo de caídas                             | 6  | 5 | 2 | 60  | 60        | Aplicar varias capas de recubrimiento posterior a inspeccionar presencia de corrosión.   |
|     |                       | Corrosión                   | Falta de recubrimiento, golpes, rasgaduras | Riesgo de fisuras, fracturas y derrames                 | 6  | 5 | 2 | 60  |           |  |
| 19  | Balastos electrónicos | No hay energización         | Cables quebrados                           | Riesgo de electrocución y energización de la carcasa    | 9  | 5 | 7 | 315 | 315       | Incluir los balastos en un cajetín aislante separados entre sí. Inspeccionar la electrónica periódicamente   |
|     |                       | Falla en las soldaduras     | Uso insuficiente de estaño en la soldadura | Inoperabilidad y riesgo de electrocución                | 7  | 5 | 8 | 280 |           |  |
|     |                       | Componentes quemados        | Desgaste, picos de voltaje                 | Inoperabilidad y riesgo de electrocución                | 7  | 5 | 2 | 70  |           |  |

## G. Documentación de referencia

1. ASTM. (2013). Standard Guide for Addressing Variability in Exposure Testing of Nonmetallic. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/G0141-09R13.2>
2. ASTM. (2016a). Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet ( UV ) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/G0154-16.2>
3. ASTM. (2016b). Standard Terminology Relating to Natural and Artificial Weathering Tests of Nonmetallic Materials. ASTM International, 1–5. <https://doi.org/10.1520/G0113-16.2>
4. ASTM. (2017a). Standard Practice for Conditioning and Handling of Nonmetallic Materials for Natural and Artificial Weathering Tests. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/G0147-17.2>
5. ASTM. (2017b). Standard Test Method for Accelerated Weathering Test Conditions and Procedures for Bituminous Materials ( Fluorescent UV and Condensation. Current, 04(March 2000), 1–2. <https://doi.org/10.1520/D4799>
6. ASTM. (2018b). Standard Test Method for Failure End Point in Accelerated and Outdoor Weathering of. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1670>
7. ASTM. (2019a). Standard Practice for Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources. ASTM International, 15(ASTM G151-19), 1–11. <https://doi.org/10.1520/G0151-19.2>
8. ASTM. (2019b). Standard Practice for Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/G0151-19.2>
9. ASTM. (2019c). Standard Practice for Preparation of Test Panels for Accelerated and Outdoor Weathering of Bituminous Coatings. ASTM International, ASTM D1669. <https://doi.org/10.1520/D1669>
10. Behera, M., & Behera, B. (2016). Design Failure Modes and Effects Analysis ( DFMEA ) of a Human Powered Recumbent Vehicle. 5(04), 27–32. <https://www.ijert.org/research/design-failure-modes-and-effects-analysis-dfmea-of-a-human-powered-recumbent-vehicle-IJERTV5IS040105.pdf>
11. BTG. (2021). OSRAM HNS 15 W. BTG: Bulbtronics Group. <https://www.bulbtronics.com/Search-The-Warehouse/ProductDetail.aspx?sid=0065744&pid=OSG15T8OF+++++&Source=SearchResults#>
12. IMN. (2021). Mapa de Costa Rica: datos climáticos. Instituto Meteorológico Nacional. <https://www.imn.ac.cr/web/imn/mapa>
13. Orozco, G. (2007). Zonificación climática de costa rica para la gestión de infraestructura vial. Congreso Ibero Latinoamericano Del Asfalto.
14. Wright, J. (2008). Cálculo y mapeo de la radiación solar directa y difusa en Costa Rica. Uniciencia, Universidad Nacional de Costa Rica, 22, 55–69



