

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

**Implementación de Metodología de Envejecimiento de Asfaltos Mediante
Radiación UV**

Trabajo de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

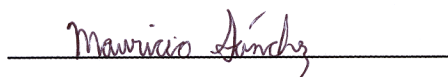
Mauricio José Sánchez Mora

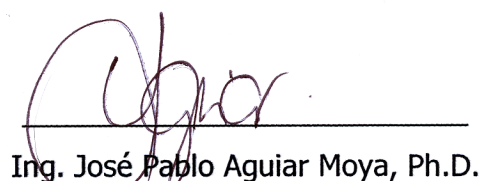
Director de Proyecto de Graduación:

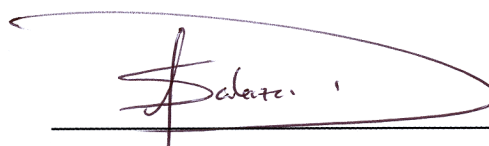
Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.

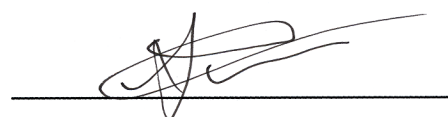
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Hoja de aprobación


Mauricio José Sanchez Mora


Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.
Director


Quim. Jorge Salazar Delgado
Asesor


Ing. Sharline López Ramírez
Asesor

Derechos de propiedad intelectual

Fecha: 2017, Febrero, 27

El suscrito, Mauricio José Sanchez Mora, cédula 1-1570-0818, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B16117, manifiesta que es autor (a) del Proyecto Final de Graduación: **Implementación de metodología de envejecimiento de asfaltos mediante radiación UV**, bajo la dirección del **Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Dedicatoria

Para mi papá y mamá con mucho amor.

Agradecimientos

A mi papá y mamá por todas las oportunidades que me han dado, por todo su amor y por ser ejemplos a seguir.

A mis hermanos por su apoyo constante y por impulsarme en todo momento.

A Hellen por todo su apoyo y por hacer que los años de universidad fueran los mejores.

A mis amigos del colegio y universidad por haber compartido juntos todos estos años, por sus consejos y buenos momentos.

A José Pablo Aguiar, Jorge Salazar y Sharline López por hacer posible el desarrollo de este proyecto y apoyar constantemente en su elaboración. A Alejandra Baldi por sus aportes y ayuda continua a lo largo del proyecto.

Índice

Hoja de aprobación	i
Derechos de propiedad intelectual	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Índice de figuras	ix
Índice de cuadros.....	xiv
Resumen	xvi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación.....	1
1.1.1 Problema específico	1
1.1.2 Importancia	2
1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.2.2 Objetivos específicos.....	4
1.3 Delimitación del problema.....	4
1.3.1 Alcance.....	4
1.3.2 Limitaciones.....	5
1.4 Descripción de la metodología a usar	5
1.4.1 Revisión bibliográfica	7

1.4.2	Desarrollo experimental	7
1.4.3	Análisis de resultados.....	8
1.4.4	Informe final	8
1.5	Mecanismos posibles de evaluación del proyecto	8
2.	MARCO TEÓRICO	10
2.1	Asfalto	10
2.2	Envejecimiento de asfaltos.....	11
2.2.1	Ensayo RTFO	11
2.2.2	Ensayo PAV.....	12
2.2.3	Radiación Ultravioleta	13
2.3	Caracterización del asfalto	15
2.3.1	Propiedades reológicas.....	15
2.3.2	Ensayos de reología.....	16
2.3.3	Propiedades químicas	19
2.3.4	Ensayos químicos	21
3.	PROCESO DE ENVEJECIMIENTO DEL ASFALTO EN CAMPO.....	23
3.1	Factores de envejecimiento.....	23
3.2	Radiación UV en Costa Rica	23
4.	METODOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO.....	27
4.1	Desarrollo y características de la cámara de envejecimiento.....	27
4.2	Confección de especímenes	28

4.3	Determinación de los tiempos de horno	34
4.4	Ensayos de caracterización	36
5.	MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y MECÁNICAS	39
5.1	Inspección Visual	39
5.2	Propiedades Químicas	40
5.2.1	Asfalto original	40
5.2.2	Radiación UV a temperatura ambiente.....	41
5.2.3	Radiación UV a temperatura de 60 °C	48
5.2.4	Muestra de control.....	54
5.2.5	Comparación de tratamientos	55
5.2.6	Propuesta de índices.....	60
5.3	Propiedades Mecánicas.....	62
5.3.1	Barrido de frecuencia y temperatura	62
5.3.2	Ensayo LAS.....	63
6.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA CON LOS ENSAYOS NORMADOS.....	73
6.1	Propiedades Químicas	73
6.2	Propiedades Mecánicas.....	75
6.2.1	Ensayo LAS.....	75
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
7.1	Conclusiones	77

7.2	Recomendaciones	80
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
9.	ANEXOS.....	A1

Índice de figuras

Figura 1. Esquema metodológico para el desarrollo del proyecto	6
Figura 2. Equipo del ensayo RTFO	12
Figura 3. Equipo del ensayo PAV	13
Figura 4. Proporción de radiación UV-B respecto a la radiación total UV en Sao Paulo, Brasil entre los años 2004 y 2012	15
Figura 5. Geometría del reómetro de corte dinámico, establecida según la norma ASTM.	17
Figura 6. Radiación promedio mensual según las estaciones del valle central	25
Figura 7. Radiación promedio mensual según las estaciones costeras	26
Figura 8. Espectro de emisión de las lámparas UV empleadas en la cámara de envejecimiento	27
Figura 9. Espectro de absorción del asfalto en la región UV	28
Figura 10. Cámara de envejecimiento mediante radiación UV y calor	28
Figura 11. Muestra de asfalto 0925-14 en su estado original	29
Figura 12. Moldes utilizados para la confección de muestras	29
Figura 13. Horno usado para el ensayo RTFO	31
Figura 14. Cámara usada para el ensayo PAV	32
Figura 15. Proceso de chorreado de las muestras y balanza utilizada	33
Figura 16. Muestras finales distribuidas en los moldes	33
Figura 17. Espectrómetro de infrarrojo usado para las pruebas químicas, FTIR-ATR Thermo Scientific	37

Figura 18. Reómetro de corte dinámico utilizado para las pruebas reológicas, DSR TA Instruments	38
Figura 19. Aspecto de las muestras posterior a 200 horas en el horno con radiación UV a temperatura ambiente	39
Figura 20. Espectro infrarrojo del asfalto 0925-14 en su estado original	40
Figura 21. Comparación de espectros para el envejecimiento de radiación UV a temperatura ambiente, cara superior	41
Figura 22. Espectros en el rango de los hidroxilos y compuestos aromáticos, bajo el tratamiento con radiación UV a temperatura ambiente, cara superior	42
Figura 23. Cuantificación de área de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV para el compuesto hidroxilo en ambas caras de la muestra	43
Figura 24. Cuantificación de área de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV para los compuestos aromáticos en ambas caras de la muestra	44
Figura 25. Espectros en el rango de los carbonilos y enlaces de doble carbono, bajo el tratamiento con radiación UV a temperatura ambiente, cara superior	45
Figura 26. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV para el grupo carbonilo en ambas caras de la muestra	46
Figura 27. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV para los dobles enlaces de carbono en ambas caras de la muestra	46
Figura 28. Espectros en el rango de los sulfóxidos, bajo el tratamiento con radiación UV a temperatura ambiente, cara superior	47
Figura 29. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV para el compuesto sulfóxido en ambas caras de la muestra	48
Figura 30. Comparación de espectros para el envejecimiento de radiación UV y temperatura de 60 °C, cara superior	49

Figura 31. Espectros en el rango de los hidroxilos y compuestos aromáticos, bajo el tratamiento con radiación UV y temperatura de 60 °C, cara superior.....	49
Figura 32. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV y temperatura de 60 °C para el compuesto hidroxilo en ambas caras de la muestra.....	50
Figura 33. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV y temperatura para los compuestos aromáticos en ambas caras de la muestra	50
Figura 34. Espectros en el rango de los carbonilos y enlaces de doble carbono, bajo el tratamiento con radiación UV y temperatura de 60 °C, cara superior.....	51
Figura 35. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV y temperatura para el grupo carbonilo en ambas caras de la muestra	52
Figura 36. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV y temperatura para los dobles enlaces de carbono en ambas caras de la muestra.....	52
Figura 37. Espectros en el rango de los sulfóxidos, bajo el tratamiento con radiación UV y temperatura de 60 °C, cara superior	53
Figura 38. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV y temperatura para el compuesto sulfóxido en ambas caras de la muestra.....	53
Figura 39. Comparación de ambos tratamientos implementados para el grupo hidroxilo en la cara superior de las muestras	56
Figura 40. Comparación de ambos tratamientos implementados para los compuestos aromáticos en la cara superior de las muestras	57
Figura 41. Comparación de ambos tratamientos implementados para los carbonilos en la cara superior de las muestras	57
Figura 42. Comparación de ambos tratamientos implementados para los dobles enlaces de carbono en la cara superior de las muestras	58

Figura 43. Comparación de ambos tratamientos implementados para los sulfóxidos en la cara superior de las muestras	59
Figura 44. Comparación de tendencias de índices según los valores obtenidos para el grupo de dobles enlaces de carbono en la muestra envejecida a radiación UV a temperatura ambiente	61
Figura 45. Curvas maestras para los tiempos de exposición del tratamiento de radiación UV a temperatura ambiente	62
Figura 46. Curvas maestras para los tiempos de exposición del tratamiento de radiación UV a 60°C.....	63
Figura 47. Curvas de esfuerzo contra deformación obtenidas mediante el ensayo LAS, de las muestras homogenizadas y sometidas a radiación UV y temperatura ambiente	64
Figura 48. Curvas de esfuerzo contra deformación obtenidas mediante el ensayo LAS, de las muestras homogenizadas y sometidas a radiación UV y temperatura de 60°C.....	65
Figura 49. Valor de A en el modelo del ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras homogenizadas	66
Figura 50. Valor de B en el modelo del ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras homogenizadas	67
Figura 51. Valor de Nf 2.5% en el modelo del ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras homogenizadas	67
Figura 52. Esfuerzo máximo obtenido en el ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras homogenizadas	68
Figura 53. Curvas de esfuerzo contra deformación obtenidas mediante el ensayo LAS, de las muestras de 2mm y sometidas a radiación UV y temperatura ambiente.....	69
Figura 54. Curvas de esfuerzo contra deformación obtenidas mediante el ensayo LAS, de las muestras de 2mm y sometidas a radiación UV y temperatura de 60°C	69

Figura 55. Valor de A en el modelo del ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras de 2mm.....	70
Figura 56. Valor de B en el modelo del ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras de 2mm.....	71
Figura 57. Valor de Nf 2.5% en el modelo del ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras de 2mm.....	71
Figura 58. Esfuerzo máximo obtenido en el ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras de 2mm.....	72
Figura A.1. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación Manzanillo	A1
Figura A.2. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación San José, Pinilla	A1
Figura A.3. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación Paquera..	A2
Figura A.4. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación CIGEFI ...	A2
Figura A.5. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación Aeropuerto, Limón	A3
Figura A.6. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación Puntarenas	A3
Figura A.7. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación Aeropuerto, Pavas Oeste	A4
Figura A.8. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación Aeropuerto, Juan Santamaría.....	A4
Figura A.9. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación IMN, Aranjuez	A5
Figura A.10. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación Golfito ..	A5

Índice de cuadros

Cuadro 1. Longitudes de onda según los tipos de radiación ultravioleta.	13
Cuadro 2. Coordenadas y altitud de las estaciones consideradas del valle central.....	24
Cuadro 3. Coordenadas y altitud de las estaciones consideradas en la costa.....	24
Cuadro 4. Radiación promedio mensual según las estaciones del valle central	25
Cuadro 5. Radiación promedio mensual según las estaciones costeras.....	26
Cuadro 6. Radiación promedio mensual y total para las estaciones del valle central	34
Cuadro 7. Radiación promedio mensual y total para las estaciones costeras	34
Cuadro 8. Condiciones de radiación UV de la cámara de envejecimiento propuesta.....	35
Cuadro 9. Tiempos de exposición en el horno para el ensayo acelerado.....	36
Cuadro 10. Comparación en la concentración del grupo de doble carbono en ambas superficies de la muestra de control	54
Cuadro 11. Comparación en la concentración del grupo de aromáticos en ambas superficies de la muestra de control	54
Cuadro 12. Comparación porcentual de la concentración de grupos químicos del tratamiento de UV a temperatura ambiente con el tratamiento de UV a 60°C en la superficie expuesta	59
Cuadro 13. Comparación porcentual de la concentración de grupos químicos del tratamiento de UV a temperatura ambiente con el tratamiento de UV a 60°C en la superficie no expuesta.....	60
Cuadro 14. Comparación porcentual de la concentración de grupos químicos del tratamiento de UV a temperatura ambiente en la superficie expuesta, con el procedimiento normado PAV	73

Cuadro 15. Comparación porcentual de la concentración de grupos químicos del tratamiento de UV a temperatura ambiente en la superficie no expuesta, con el procedimiento normado PAV	74
Cuadro 16. Comparación porcentual de la concentración de grupos químicos del tratamiento de UV a temperatura de 60 °C en la superficie expuesta, con el procedimiento normado PAV	75
Cuadro 17. Comparación porcentual de la concentración de grupos químicos del tratamiento de UV a temperatura de 60 °C en la superficie no expuesta, con el procedimiento normado PAV	75
Cuadro 18. Comparación porcentual del valor de Nf 2,5 % entre las muestras homogenizadas y de 2 mm, así como ambos tratamientos UV a temperatura ambiente y 60 C°	76

Sánchez Mora, Mauricio

Implementación de Metodología de Envejecimiento de Asfaltos Mediante Radiación UV

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.:

M. J. Sánchez M., 2017

xvi, 83, [5]h; ils. col. – 30 refs.

Resumen

En este proyecto se busca determinar los efectos de la radiación ultravioleta (UV) en el envejecimiento de los asfaltos. Para esto se propone una metodología que incorpore el efecto de esta radiación y de la temperatura. Los ensayos normados actuales de envejecimiento de asfaltos se basan en presión y calor, lo cual deja por fuera elementos importantes como el agua y la radiación. Es por esto que se busca comparar, desde el punto de vista mecánico y químico, la metodología propuesta con los ensayos normados. El constante uso de los pavimentos asfálticos y la condición de estos en el país justifica que se generen estudios para tener un mejor entendimiento del tema.

Para cumplir con los objetivos se realizó una revisión bibliográfica de los temas asociados como envejecimiento, radiación y normativas actuales. Se obtuvieron datos de radiación global del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), los cuales mediante proporciones encontradas en la literatura se pasaron a radiación UV. Se implementó la cámara de radiación UV y temperatura desarrollada en el LanammeUCR, la cual cuenta con cuatro lámparas de radiación UV-A y regulación de temperatura. Se sometieron muestras de 1 mm y 2 mm de espesor al horno mencionado y se ensayaron posteriormente para la comparación de metodologías. Se usaron los ensayos de barrido de frecuencia y temperatura y ensayo de barrido de amplitud lineal mediante el reómetro de corte dinámico, para medir las propiedades mecánicas de las muestras. Por su parte se usó el ensayo de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier para observar indicadores de oxidación en las muestras.

A partir de los resultados obtenidos se observó que las muestras presentan un aumento de los grupos carbonilo, sulfóxidos e hidroxilos en la cara superior expuesta a la radiación. Todos estos grupos químicos son indicadores de oxidación y superan los valores obtenidos de las muestras de envejecidas mediante el ensayo normado (PAV). Por su parte no se observaron grandes cambios en las propiedades mecánicas debido a que la radiación afecta la superficie expuesta que no corresponde a la mayoría de la muestra. Los valores obtenidos en los ensayos de reología se mantienen dentro de los rangos de los ensayos normados (RTFO y PAV), a pesar de que si muestran ligeras variaciones. M.J.S.M.

Conceptos clave: ultravioleta, UV, radiación, asfalto, envejecimiento, RTFO, PAV, LAS, barrido de frecuencia y temperatura, FTIR.

Ing. José Pablo Aguiar Moya, Ph.D.

Escuela de Ingeniería Civil

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

1.1.1 Problema específico

Los pavimentos asfálticos son estructuras viales diseñadas para el transporte seguro de la población, así como de mercancías y en general para la movilización de un país. Estas tienen una incidencia directa sobre la economía de una nación por lo que se deben tomar consideraciones estrictas de diseño y construcción. Por lo tanto es ideal que dentro de todo el proceso de desarrollo de carreteras, se incluyan procedimientos técnicos de ingeniería.

En Costa Rica el estado de las vías es deficiente ya que algunas de estas se encuentran en un proceso acelerado de deterioro. La falta de mantenimiento, una vez que se construye una carretera, ha generado que los deterioros lleguen a niveles inaceptables. En estos casos la inversión de reparación resulta varias veces mayor a la que se daría en caso de que se contara con planeación y mantenimiento periódico. Lo anterior ha generado en los últimos años que se hagan múltiples esfuerzos desde la óptica de ingeniería para mejorar en el campo de las carreteras y pavimentos.

Particularmente, se estima que el 90% de los pavimentos del mundo están compuestos de material asfáltico (Fernandez, 2014). De ahí que se deba investigar exhaustivamente el tema de ligantes asfálticos para lograr un entendimiento adecuado. Uno de los tipos de deterioro que se debe considerar a la hora del diseño de un pavimento es el envejecimiento. Este corresponde al daño producido por el proceso constructivo y relacionado con las condiciones climáticas de servicio como por ejemplo el calor, el aire, la lluvia y la radiación solar. Si bien la mezcla asfáltica es un material compuesto diferente al ligante asfáltico, el comportamiento reológico del ligante influencia significativamente en las propiedades de la mezcla (Cárdenas & Fonseca, 2009)

Actualmente se tienen normas ASTM que buscan replicar el envejecimiento en campo mediante la aplicación de calor y presión a la muestra. Esto para simular el corto y largo plazo. Sin embargo en el largo plazo se debe reconocer que la mezcla asfáltica se verá sometida a otros factores climáticos como los mencionados anteriormente (aire, lluvia y radiación solar). La representación correcta de la realidad del servicio en el laboratorio siempre ha sido uno de los objetivos de la investigación por lo que la inclusión de más factores en los ensayos es deseable.

Al ser la radiación ultravioleta (UV) uno de los factores que actúan continuamente a lo largo de la vida útil del pavimento, surge la necesidad de implementar un ensayo que considere su efecto en el desempeño.

El conocimiento que se adquiriera en este trabajo final de graduación pretende aportar al entendimiento general del envejecimiento de asfaltos. La información técnica generada se debe usar para tomar medidas que contrarresten los efectos negativos del envejecimiento y así extender la vida útil de los pavimentos. Por último se busca aportar información valiosa acerca de qué tan aplicables o acertados son las especificaciones actuales de envejecimiento de pavimentos.

1.1.2 Importancia

Como se mencionó anteriormente como parte del problema, los pavimentos tienen un impacto económico importante para los países. Los indicadores como el índice de regularidad internacional (IRI), muestran que tan regular o irregular es la superficie del pavimento, lo cual afecta directamente el confort del usuario o conductor, y además afecta el rendimiento y los componentes de los vehículos. Unido a esto, se puede llegar a niveles de calidad tan bajos en el pavimento, que el nivel de servicio de las vías se vea reducido, afectando a los usuarios desde el punto de vista de tiempo y calidad de vida. Es por esto que se busca avanzar hacia diseños de pavimentos duraderos, que se comporten adecuadamente durante su vida útil.

Para lograr diseños integrales se deben estudiar todos los aspectos que pueden afectar el rendimiento y respuestas del pavimento. Dentro de las variables se encuentran las relacionadas con el material como la granulometría y tipo agregado, la composición del asfalto y dosificaciones. Por otro lado se tienen las variables externas como la carga de diseño, y las condiciones climáticas. Si bien todas las anteriores se han considerado para los diseños, actualmente en el tema de envejecimiento por condiciones climáticas se tienen únicamente ensayos normados que incluyen la variable de temperatura y presión.

No obstante, se sabe que la radiación solar dentro de su espectro incluye rayos UV (banda de radiación entre 100 nm – 400 nm), los cuales se encuentran presentes siempre que la luz del sol irradie sobre la superficie terrestre. Por esta razón, se afirma que existen ciclos de radiación que corresponden al día y la noche, que afectan de forma directa y constante a los pavimentos. Se busca entonces plantear una metodología experimental que incorpore la radiación para determinar si tiene incidencia en las propiedades mecánicas y químicas del asfalto a largo plazo.

Específicamente se buscará una correlación entre la radiación y la susceptibilidad a los agrietamientos en el asfalto. Este estudio pretende ser un precursor en el área de envejecimiento de asfaltos en el país para formar con el tiempo cada vez más conocimiento en esta área.

1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema

Como parte de los antecedentes principales al estudio del envejecimiento de asfaltos, se han generado a través de los años numerosos ensayos y metodologías basadas en su mayoría en procesos de altas temperaturas, seguido de procesos o métodos de evaluación como cambios de peso, penetración de la muestra, ductilidad, viscosidad, entre otros. Vargas y Reyes en el año 2010 en su trabajo describen el envejecimiento de los asfaltos y recopilan información de una gran cantidad de autores y sus aportes a este tema.

El primer ensayo documentado en el tema de envejecimiento fue realizado por Dow en 1903 y consistió en relacionar la temperatura aplicada a un asfalto con la pérdida de peso y valores de penetración. En 1940 los investigadores Lewis y Welborn emplean una práctica de envejecimiento acelerado que se usa en la actualidad, esta corresponde a un proceso acelerado mediante una película delgada conocida como Thin Film Oven (TFO) Test.

Posteriormente en el año 1968 Sisko y Burnstrum fueron los primeros en evaluar el envejecimiento producto de la oxidación mediante técnicas de caracterización de propiedades viscoelásticas, de mucha importancia en la ingeniería. Estos investigadores “usaron un reómetro con geometría de cono y plato para medir el módulo complejo de asfaltos envejecidos y sin envejecer en un amplio rango de temperaturas y frecuencias, concluyendo que la oxidación cambia la dependencia de la temperatura del material y que los cambios tienden a aumentar con el incremento de la temperatura...” (Vargas & Reyes, 2010). Por su parte Dickinson y Witt concluyeron que el envejecimiento por oxidación resulta en un cambio en la respuesta viscoelástica de las curvas maestras de los asfaltos, y encontraron que depende de la temperatura y del tipo de envejecimiento.

Actualmente se tienen dos procedimientos normados para el envejecimiento en laboratorio. Se tiene el envejecimiento para corto plazo, el cual simula la pérdida de volátiles durante la fabricación, colocación y compactación de la mezcla asfáltica. A este le corresponde el ensayo normado de película delgada rotatoria o Rolling Thin Film Oven, RTFO por sus siglas en inglés. Por su parte se tiene el envejecimiento a largo plazo que busca reproducir los cambios en las

propiedades producto de las condiciones climáticas a lo largo de la vida útil considerando entre siete y diez años de servicio. El ensayo normado asociado corresponde a la cámara presurizada de envejecimiento o Pressure Aging Vessel, PAV por sus siglas en inglés. Ambos procedimientos anteriores se basan en tratamientos con temperatura, aire y presión para el proceso de envejecimiento del ligante asfáltico.

Recientemente se han desarrollado investigaciones en esta área, específicamente con la variable de radiación UV. Estudios como los de Wilmar Fernández en el 2014 y Sharline López en ese mismo año, incorporan dentro del envejecimiento a largo plazo el efecto de la radiación UV. En ambos casos se utilizan métodos para caracterizar la muestra envejecida que buscan determinar las características reológicas, además de su composición química. Estos estudios se concentran en ciertos parámetros de penetración que no logran cuantificar adecuadamente la fragilidad o propensión al agrietamiento. Se busca cuantificar este parámetro dentro del actual proyecto.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Analizar el efecto de la radiación UV en la oxidación del asfalto en laboratorio.

1.2.2 Objetivos específicos

- Describir el proceso de envejecimiento de asfalto en campo.
- Proponer una metodología e implementar un ensayo de envejecimiento acelerado en el laboratorio que incorpore el efecto de la radiación ultravioleta, así como de la temperatura.
- Medir las propiedades mecánicas y químicas antes y después de llevar a cabo el ensayo de laboratorio.
- Comparar los resultados obtenidos con los ensayos actualmente normados y los obtenidos con la metodología propuesta.

1.3 Delimitación del problema

1.3.1 Alcance

Este proyecto tiene como alcance la comparación reológica y química, mediante el ensayos en el reómetro de corte dinámico y el ensayo de espectrometría infrarroja con transformada de

Fourier, de ligantes asfálticos a diferentes tiempos de exposición a radiación UV. Además se compara el envejecimiento con radiación UV con el envejecimiento de las normas o procedimientos estándar actuales. Los niveles de radiación se estudiarán para la ciudad de San José, por medio de consulta a entidades meteorológicas.

Específicamente se utiliza el ligante asfáltico clasificado como PG 64-22 para todas las pruebas. Se busca implementar una cámara de temperatura y radiación desarrollada en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Como primer estudio que se realiza en el LanammeUCR con este equipo, se utiliza con las variables de temperatura y radiación UV. La humedad podrá ser un factor para incorporar en futuros estudios.

1.3.2 Limitaciones

Una de las limitaciones para la ejecución del presente proyecto es la poca cantidad de ensayos relacionados con el envejecimiento con radiación UV que se han realizado hasta el momento. A pesar de que no se cuenta con mucha información, el proyecto pretende precisamente generar conocimiento en el área.

Los ensayos se limitan al equipo con el que cuenta el laboratorio, específicamente se limita a la cámara de radiación y calor con la que se cuenta, con cuatro lámparas de radiación UV tipo A y regulación de la temperatura.

Adicionalmente, se propuso hacer los ensayos para un tipo de ligante asfáltico (PG 64-22), por lo que los resultados son directamente aplicables solo a este tipo de material. El ligante que se usó es el distribuido por la Refinería Costarricense de Petróleo (RECOPE) y no se tiene proveedores adicionales para realizar los ensayos con otros ligantes.

Por otra parte, el estudio se deberá limitar a una zona geográfica para la simulación de la radiación UV. Lo anterior implica que los resultados aplican a esta zona, debido a la variabilidad de radiación que existe en el país.

1.4 Descripción de la metodología a usar

La metodología a seguir para la elaboración del proyecto propuesto se muestra en la Figura 1.

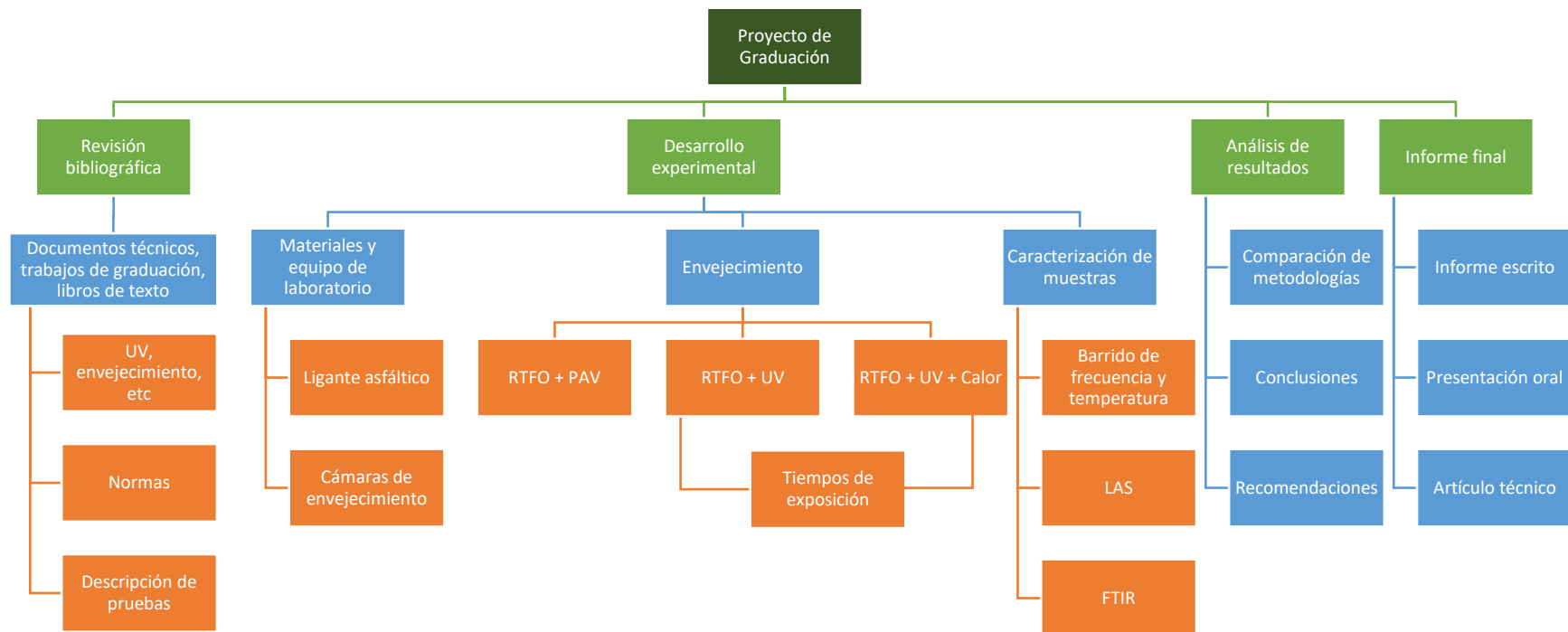


Figura 1. Esquema metodológico para el desarrollo del proyecto

1.4.1 Revisión bibliográfica

Se deberá iniciar el estudio mediante una revisión bibliográfica exhaustiva acerca de los temas relacionados con el proyecto. Se deben definir conceptos básicos, como radiación ultravioleta, envejecimiento, oxidación, entre otros para partir de conceptos claros. Posteriormente se deben revisar las normas actuales relacionadas con el objeto de estudio, dentro de las cuales se destacan las normas ASTM. Las normas que apliquen se deben estudiar y se deben describir las pruebas asociadas.

1.4.2 Desarrollo experimental

Para este apartado se inicia con la identificación de los equipos por utilizar y la caracterización de los materiales que se usarán. Específicamente se deben establecer las características principales del ligante asfáltico que se usará e identificar los equipos como cámaras de envejecimiento que se deberán utilizar en el desarrollo del proyecto.

Posteriormente se pasa a una etapa de envejecimiento de las muestras, donde se propone mantener un grupo control que corresponde al ligante asfáltico en condición original (sin ningún tipo de envejecimiento o recalentamientos). A partir de esto se realizará el envejecimiento siguiendo la normativa o prácticas actuales como lo son el RTFO y el RTFO + PAV. Cabe destacar que el ensayo de envejecimiento a corto plazo RTFO se aplicará a todas las muestras con el objetivo de que la variable a evaluar sea el largo plazo con la radiación UV. Las muestras envejecidas a corto plazo se someterán posteriormente a radiación UV con ciclos definidos e intensidades variables, y por aparte a ciclos de radiación y temperatura juntos. Específicamente se contará con una cámara equipada con lámparas de radiación ultravioleta UVA (315nm-400nm) lo cual representa la parte o fracción de la radiación que logra llegar a la superficie terrestre. La cámara podrá aplicar temperatura hasta los 200°C con control de 0.1°C.

Seguidamente se procede a caracterizar las muestras en sus diferentes condiciones, mediante procedimientos estándar de caracterización, como lo es la clasificación de rendimiento (PG), la obtención de curvas maestras para las muestras mediante un barrido de frecuencias, parámetros de fragilidad como el barrido de amplitud lineal (LAS) y el análisis químico mediante radiación infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Además se buscará incluir un parámetro de fragilidad que permita cuantificar el efecto del envejecimiento en esta variable.

A partir de lo anterior y de acuerdo con el alcance del estudio se esperan realizar las siguientes pruebas. Se pretende realizar aproximadamente 14 combinaciones de radiación UV más temperatura (temperatura ambiente y a 60 °C), en conjunto con el envejecimiento tradicional y una muestra sin envejecer como referencia. A cada tratamiento posteriormente se le realiza un barrido de frecuencia y temperatura, un ensayo de barrido de amplitud lineal (LAS) y finalmente un análisis químico por triplicado para cada tratamiento mediante la técnica de Infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR). Esto significa un total de 5 pruebas por tratamiento con lo que se obtiene un total de 70 pruebas para los 14 tratamientos.

1.4.3 Análisis de resultados

En la sección de análisis de resultados se busca inicialmente comparar las metodologías o procedimientos de envejecimiento, a partir de la caracterización de las muestras anteriormente realizada. Se buscará determinar cuál condición de radiación representan los ensayos normados que se desarrollan actualmente para verificar la aplicabilidad de estos métodos.

Posteriormente se concluye de acuerdo con los objetivos y se evalúa el desarrollo del proyecto. Se buscará además recomendar según los resultados obtenidos, si se debe considerar como suficiente los métodos actuales o si se recomienda el uso de la metodología o futuras investigaciones.

1.4.4 Informe final

Finalmente se redacta el informe final escrito y se prepara la presentación oral. Como parte de los requerimientos y con el objetivo de que se publiquen y se den a conocer los resultados obtenidos con el proyecto, se generará un artículo técnico.

1.5 Mecanismos posibles de evaluación del proyecto

La eficiencia del proyecto se determinará comparando el avance contra la programación realizada. Si se cumple el cronograma propuesto, se tendrá un rendimiento adecuado. De la misma manera, los objetivos planteados se podrán cumplir eficientemente si los datos obtenidos en los ensayos previstos son suficientes y utilizables para el análisis posterior, la repetición de ensayos implicarán mayores gastos tanto económicos como de tiempo.

La eficacia del proyecto se mide según el cumplimiento de los objetivos. Esto implica que para que el proyecto sea eficaz, se deberá representar mediante los ensayos el envejecimiento del

asfalto en campo mediante la implementación de la metodología propuesta y se deberán medir las propiedades mecánicas en las diferentes condiciones para su comparación.

El trabajo tendrá un impacto positivo si los resultados y recomendaciones generadas se utilizan en primera instancia para generar más investigación y posteriormente para tener un control más adecuado de los pavimentos asociados a ligantes asfálticos en el país. Al conocer de mejor manera las propiedades de los materiales que se utilizan, es posible tomar mejores y más acertadas decisiones respecto a las vías del país.

La importancia del proyecto está en que se podrá conocer de una mejor manera el comportamiento y el proceso de envejecimiento de los ligantes asfálticos. Se deben determinar el grado de confiabilidad de los resultados obtenidos para poder comprobar que el envejecimiento con radiación UV es una técnica adecuada y que representa una mejora con respecto a las prácticas y normas empleadas actualmente en el país.

La perdurabilidad del proyecto se considerará adecuada si se generan investigaciones en el área de envejecimiento, ya sea con radiación UV o incorporando nuevas variables para obtener mejoras en los procedimientos y resultados.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Asfalto

El asfalto es un hidrocarburo producto del residuo de destilación del petróleo. Este proceso de destilación puede ocurrir de forma natural o bien en una refinería de petróleo a partir de petróleo crudo. El asfalto se caracteriza por ser un material con características físicas particulares que lo convierten en una alternativa competente frente a otros materiales. La característica física principal es la viscoelasticidad, lo que significa que el material tiene las propiedades elásticas de los sólidos y el comportamiento viscoso de un líquido (Huang, 2004). Un material elástico es el que tiene propiedades que le permiten recuperar su forma inicial cuando es deformado, mientras que el material viscoso tiene la particularidad de que fluye y que esta deformación depende del tiempo de aplicación de la carga así como de la temperatura.

Desde el punto de vista químico, el asfalto es un material orgánico complejo que “incluye parafinas, compuestos aromáticos, heterocíclicos, algunos átomos como oxígeno, nitrógeno, azufre y en menor proporción metales como níquel, vanadio, hierro entre otros” (Vargas & Reyes, 2010). Para su estudio, diferentes autores han definido grupos funcionales en los cuales se categorizan la gran cantidad de compuestos presentes en el material, según su función. Estos grupos simplifican el estudio y se comentan posteriormente.

Actualmente se cuenta con un sistema de clasificación de ligantes asfálticos llamado clasificación por desempeño Superpave. Esta clasificación tiene como objetivo asignar a cada tipo de ligante asfáltico una codificación, para su uso adecuado, según las condiciones del sitio de aplicación. Para esto, en el asfalto se realizan ensayos para determinar las características reológicas y por lo tanto sus variaciones según la temperatura y frecuencia de carga. Además se usan pruebas de acondicionamiento para buscar representar las condiciones reales en el laboratorio. La clasificación por desempeño se reporta usando dos números, donde el primero corresponde a la temperatura máxima promedio de siete días en el pavimento y el segundo es la temperatura mínima que se espera en el pavimento (U.S. Department of Transportation, 1999) . A partir de esta clasificación, es posible especificar ligantes asfálticos adecuados para las diferentes situaciones de temperatura que se puedan presentar.

Se debe notar que existen varias escalas de análisis, para el estudio del asfalto y los pavimentos. Según indica Loría (s.f.), existen cuatro escalas principales las cuales son la nano, la micro, la macro y la escala natural. El estudio del asfalto por si solo a nivel químico y mecánico cabe dentro de la categoría de escala micro.

2.2 Envejecimiento de asfaltos

El envejecimiento de asfaltos es una afectación de las propiedades iniciales del material, que incide directamente en las respuestas y durabilidad de los pavimentos en los que se utiliza. Vargas (2010) lo define como un proceso lento que involucra cambios en la composición química del asfalto. Actualmente se modela el proceso de envejecimiento en dos fases, una a corto plazo y otra a largo plazo. A continuación se presentan los ensayos normados que se aplican actualmente, así como información relevante de la radiación ultravioleta.

2.2.1 Ensayo RTFO

La primera prueba normada que aplica a este estudio corresponde a la que busca reproducir el envejecimiento a corto plazo. Específicamente simula en el laboratorio el proceso de mezclado en planta del asfalto con los agregados, así como el transporte y colocación del asfalto. En este proceso agresivo de temperatura, se producen pérdidas de componentes volátiles, lo cual produce un envejecimiento acelerado a corto plazo.

El ensayo que se ha tomado como norma, según la metodología Superpave, para este proceso corresponde a la norma ASTM D2872 llamada método de ensayo estándar para el efecto del calor y aire en una película móvil de asfalto, o RTFO por sus siglas en inglés. Como su nombre lo indica, el ensayo consiste en someter a temperaturas elevadas de $163,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ una película delgada, móvil, de material asfáltico durante 85 minutos. A esto se le suma que se mantiene dentro de la cámara del ensayo un flujo constante de aire de $(4,0 \pm 0,1)$ litros por min. Los efectos del ensayo se cuantifican realizando mediciones de las características del material antes y después del procedimiento, midiendo además el cambio de masa de la muestra (ASTM International, 2004). Un esquema del equipo que se utiliza en este ensayo se muestra en la Figura 2.

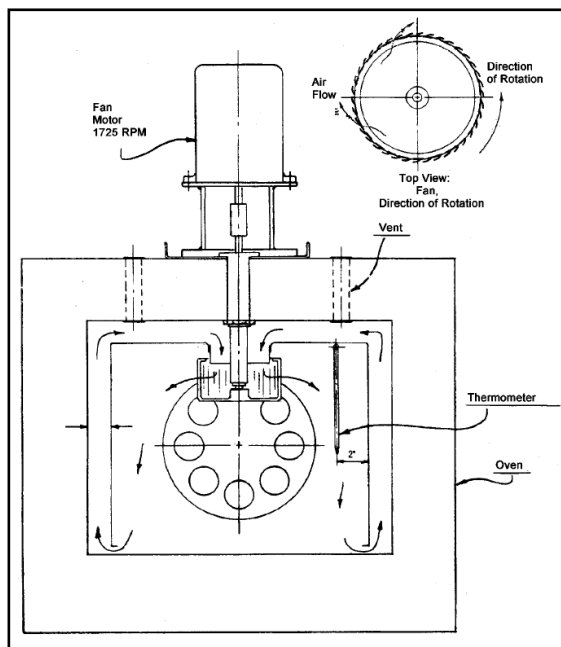


Figura 2. Equipo del ensayo RTFO

Fuente: ASTM, 2004

2.2.2 Ensayo PAV

Por otro lado se tiene el ensayo destinado a simular el envejecimiento a largo plazo del asfalto. A pesar de que se dice que es a largo plazo, la norma ASTM asociada indica que corresponde a varios años, sin definir un tiempo exacto dado que depende de las características del asfalto y de las condiciones climáticas a la que estará expuesto. Específicamente busca simular el envejecimiento producto de las condiciones climáticas a las que se encontrará expuesto el asfalto durante su vida útil. Las condiciones climáticas producen en el asfalto reacciones de oxidación que generan variaciones en las propiedades fisicoquímicas, resultando en un material más propenso a la falla por fatiga (aumento de fragilidad).

El ensayo normado para llevar a cabo este proceso corresponde a la norma ASTM D6521, con el nombre de práctica estándar para envejecimiento acelerado del ligante asfáltico usando una cámara presurizada de envejecimiento, o PAV por sus siglas en inglés. Este corresponde a un proceso de altas temperaturas entre 90 °C - 110°C y a presión de aire de 2.10 MPa por un tiempo de 20 horas, donde la muestra debe ser la obtenida del ensayo RTFO (ASTM International, 2005). El ensayo tiene como resultado un asfalto envejecido al cual se debe caracterizar según se requiera. Además se dice que el asfalto obtenido se debe usar para estimar las propiedades físicas de ligantes asfálticos después de 5 a 10 años de puesta en

operación (Farrar, et al., 2006). En la Figura 3 se observa el equipo utilizado para el ensayo PAV.

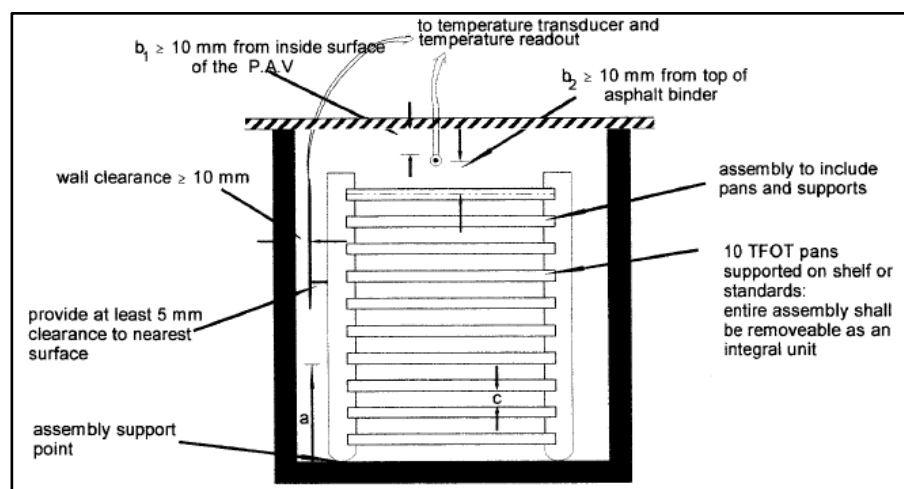


Figura 3. Equipo del ensayo PAV

Fuente: ASTM, 2004

2.2.3 Radiación Ultravioleta

El sol emite energía mediante la radiación, la cual se propaga en forma de ondas electromagnéticas con diferentes longitudes de onda. Según la longitud de onda, se genera un espectro donde se clasifican las diferentes clases de energía radiante. Existen varias clasificaciones a saber: radiación visible, infrarroja, rayos cósmicos, rayos gama, rayos X y los rayos ultravioleta. Los rayos UV, así como otras de las clases mencionadas, portan altas cantidades de energía por lo que son capaces de alterar millones de compuestos orgánicos. Los rayos UV se pueden clasificar según la longitud de onda en tres clases: UV-A, UV-B, UV-C. La radiación UV-A está comprendida por longitudes de onda de 320 a 400 nanómetros, la UV-B de 280 a 320 nm y la UV-C de 100 a 280 nm (Cuadro 1). La tercera es filtrada o retenida en su totalidad por la capa de ozono y el oxígeno, mientras que las primeras dos no son bloqueadas totalmente y llegan a la superficie terrestre (Instituto Meteorológico Nacional, 2015).

Cuadro 1. Longitudes de onda según los tipos de radiación ultravioleta.

	Longitud de onda (nm)
UV-A	320-400
UV-B	280-320
UV-C	100-280

Existen dos tipos de radiación solar comúnmente utilizadas y que afectan las superficies horizontales. La primera es la radiación directa que como su nombre lo indica, corresponde a la que incide directamente sobre la superficie terrestre. Mientras que la segunda es la radiación difusa que corresponde a la que es dispersada por la atmósfera y que, por lo tanto, depende de la interacción entre esta y las moléculas de aire, agua y polvo (Beckman, 1991). La radiación global o total consiste en la suma de las dos anteriores, por lo que se refiere a la totalidad de radiación recibida por una superficie.

Como se menciona anteriormente, la radiación solar se divide en varios grupos. Por esto resulta importante conocer qué porción de la radiación corresponde a UV. Se han realizado mediciones en diferentes partes del mundo, donde se estima el porcentaje de la radiación por debajo de los 400 nm, lo cual se considera radiación UV. En una medición en la ciudad de Munich, Alemania, se midió que este porcentaje corresponde a un 5 % (Aphalo, et al., 2012). Por otra parte Brune, et al. (2001) establecen que de la radiación total que llega a la tierra el 8 % está dentro del espectro ultravioleta, mientras que el que llega a nivel del mar es un 6%. Inzunza por su parte, expresa que la mayoría de la energía por radiación del sol se encuentra en el rango de longitudes de onda visible con un 43 % de luz visible, un 49 % del infrarrojo, 7 % de ultravioleta y 1 % en otros. Se puede obtener de los autores anteriores que el porcentaje de radiación UV puede variar entre un 5 % y un 7 %.

Adicionalmente es importante conocer en qué proporción se distribuye la radiación UV en cada uno de sus tipos (Tipo A, B o C). Como se mencionó anteriormente, la UV-C es filtrada totalmente por la atmósfera por lo que a la superficie terrestre no logra llegar radiación de este tipo. Por su parte, los tipos A y B de igual manera se filtran pero no en su totalidad. Según Corrêa, en un día despejado sin nubes, menos del 5 % del total de la radiación ultravioleta corresponde al tipo B, mientras que el restante 95% corresponde a UV-A. En la Figura 4 se muestra un ejemplo de la proporción de UV-B respecto al total de radiación que llega a la superficie terrestre. Este corresponde a la ciudad de São Paulo entre los años 2004 y 2012 (Corrêa, 2015). Como se puede observar en la Figura 4, el porcentaje de UV-B no supera en ninguno de los meses registrados un 3.5 % del total de la radiación por lo que la mayor parte de esta corresponde a UV-A.

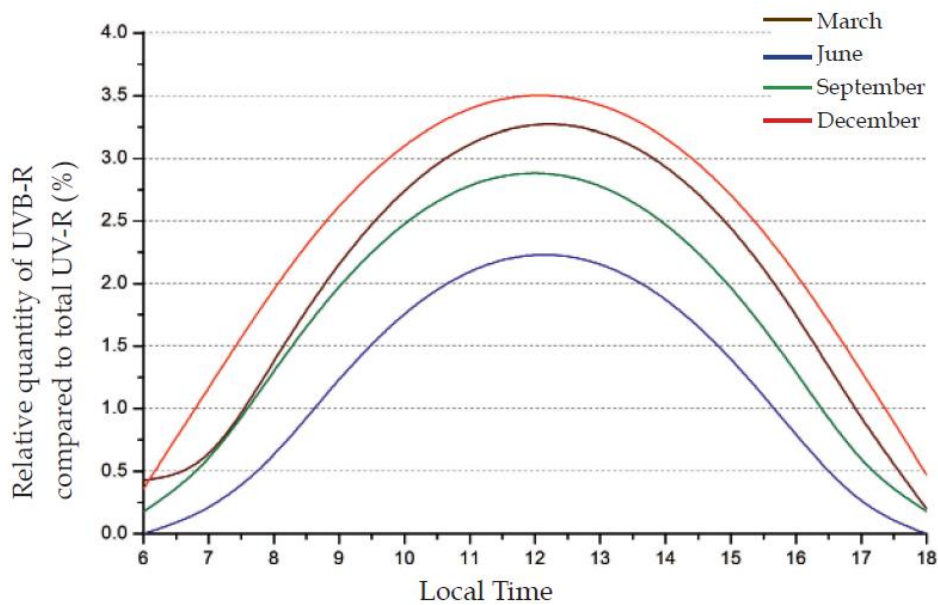


Figura 4. Proporción de radiación UV-B respecto a la radiación total UV en Sao Paulo, Brasil entre los años 2004 y 2012
Fuente: Corrêa, 2015

2.3 Caracterización del asfalto

2.3.1 Propiedades reológicas

La reología es el estudio de la deformación y el flujo de la materia. El asfalto es objeto de la reología por sus características de viscosidad. En los asfaltos, las características reológicas varían considerablemente según la temperatura. Es por esto que se ha determinado que a diferentes temperaturas, el material se puede clasificar de diferente forma. A temperaturas altas mayores a 60 °C se considera como un fluido Newtoniano, entre 0 °C y 60 °C como un material viscoelástico y por debajo de 0 °C como elástico (Vargas X. , 2007). Estos rangos han sido estudiados por varios investigadores por lo que varían en cada caso.

A continuación se explican ciertos conceptos básicos para el entendimiento de la reología del asfalto. El módulo complejo de corte (G^*) es considerado como la resistencia total del material a la deformación cuando se ensaya repetidamente al corte. Sin embargo, este módulo se divide en dos componentes, uno elástico (G') y uno viscoso (G''). El componente elástico, donde se encuentran en fase los esfuerzos y deformaciones por cortante, se relaciona a la energía almacenada. Mientras que en el componente viscoso, donde hay un desfase entre los esfuerzos y deformaciones, se da una relación con la pérdida de energía.

El ángulo de fase (δ) es el desfase de tiempo entre el esfuerzo cortante aplicado y la deformación de corte correspondiente. Este ángulo varía entre los valores de 0° y 90° , tomando en cuenta que si se obtiene el valor de 0° se trata de un material elástico puro y si se obtiene 90° se trata de un material viscoso puro.

Por su parte, la fatiga es una disminución en la resistencia de un material debido a la aplicación de cargas cíclicas dentro del rango lineal de esfuerzos. A pesar de estar dentro del rango donde los esfuerzos generan deformaciones completamente recuperables, se ha visto que en la práctica esta sucesión de cargas genera un daño acumulado. El fenómeno de la fatiga se intenta representar en laboratorio, para ligante asfáltico, mediante el ensayo de barrido de amplitud lineal o LAS por sus siglas en inglés, el cual que se presenta posteriormente.

2.3.2 Ensayos de reología

Barrido de frecuencia y temperatura

Uno de los ensayos para determinar las características reológicas en muestras de asfalto es la prueba estándar para determinar las propiedades reológicas del ligante asfáltico usando un reómetro de corte dinámico, particularmente la norma ASTM D7175. Este método de ensayo tiene como alcance determinar el módulo de corte dinámico y el ángulo de fase en un ensayo con placas paralelas, ante corte dinámico y oscilatorio. Este aplica para asfaltos con módulos entre 100 Pa y 10 MPa los cuales normalmente se obtienen entre las temperaturas de 4°C y 88°C . Se establece en la norma que el procedimiento es apto para especímenes sin envejecer y envejecidos mediante los métodos RTFO y RTFO + PAV, los cuales se especificaron anteriormente. Se define experimentalmente el módulo complejo de corte (G^*) como la proporción de dividir el valor absoluto del esfuerzo cortante de pico a pico entre la deformación unitaria a cortante de pico a pico (ASTM International, 2008).

Se define la geometría del reómetro como se observa en la Figura 5, donde el valor del diámetro de los platos (A) puede ser de 8 mm o de 25 mm. El plato de menor tamaño es usado para las temperaturas más bajas y muestras envejecidas y el de mayor tamaño para las temperaturas altas y hasta el envejecimiento RTFO. Por su parte, el espesor de los platos (B) debe ser mayor a 1.5 mm. La separación entre las placas debe ser de 1 mm para el plato de 25 mm y de 2 mm para el plato de 8 mm.

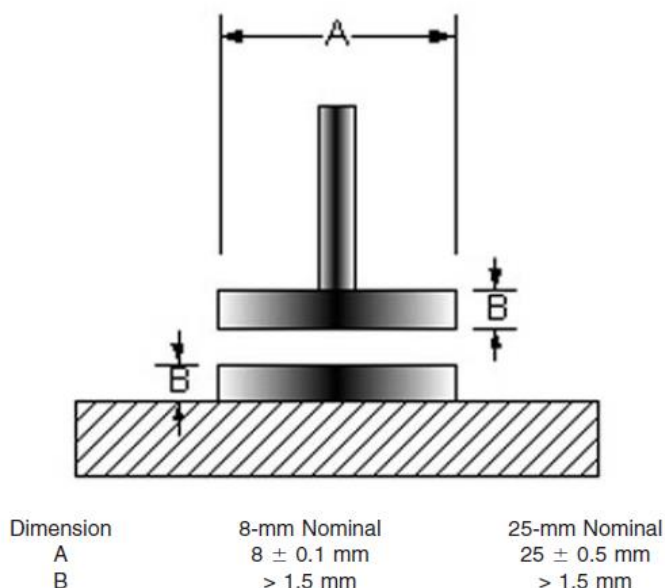


Figura 5. Geometría del reómetro de corte dinámico, establecida según la norma ASTM.

Fuente: ASTM, 2008

Barrido de amplitud lineal

El ensayo de barrido lineal de amplitudes tiene como objetivo fundamental estimar la tolerancia al daño del asfalto, mediante el reómetro de corte dinámico. La norma que se sigue para el desarrollo del ensayo es la AASHTO TP 101-14. En principio se usa el procedimiento para asfaltos envejecidos por el ensayo RTFO o bien por el anterior y el ensayo PAV. Se utiliza la geometría del instrumento de 8 mm de diametro, con una altura de muestra de 2 mm. La muestra se ensaya en cortante usando un barrido de frecuencias para determinar las características reológicas. Seguidamente la muestra se somete a ciclos oscilatorios con un aumento lineal de las amplitudes, a frecuencia constante. Lo anterior genera un daño acelerado por fatiga. Posteriormente para su análisis, se hace uso del enfoque de daño continuo para calcular la resistencia a la fatiga según los resultados obtenidos.

El enfoque mecánico viscoelástico de daño continuo empieza por considerar conceptos de procesos irreversibles de la termodinámica en donde se afirma que un material tiene cierto potencial para absorber energía externa, sin embargo, si maneja esta energía mediante deformación y energía disipada, el material no podrá volver a su estado original. De aquí se obtiene que la tasa de daño se define como un cambio en la energía potencial de un material respecto a la cantidad de daño en el material (Johnson, 2010). Posteriormente Schapery (1975)

en sus estudios propuso que el aumento de daño se rige por una ley de potencia de la cual resulta la siguiente expresión.

$$\frac{dD}{dt} = \left(-\frac{\partial W}{\partial D} \right)^\alpha \quad (1)$$

Donde D es el daño en el material, W es la energía potencial y α es la tasa de disipación de energía. Posteriormente se incorporó la teoría de potencial de trabajo, con el objetivo de relacionar cambios en el trabajo al parámetro de daño. El trabajo producido por cortante cíclico fue propuesto por Kim et al (2006) y establece la siguiente relación.

$$W = \pi E_D \gamma_0^2 |G^*| \sin \delta \quad (2)$$

Donde E es el módulo inicial sin daño, γ es la deformación unitaria a cortante aplicada, G es el módulo dinámico de corte y δ es ángulo de fase. Posteriormente se integró numéricamente la ecuación 1 para cuantificar el parámetro de daño, obteniendo lo siguiente.

$$\frac{dE}{dD} = \frac{dE}{dt} \frac{dt}{dD} \quad (3)$$

Al combinar las ecuaciones 1, 2, y 3 e integrando numéricamente en la forma de sumas de Riemann se obtiene la forma de calcular el daño acumulado como función del tiempo.

$$D(t) \cong \sum_{n=1}^N [\pi \gamma_i^2 (C_{i-1} - C_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (4)$$

Donde:

$$C(t) = \frac{|G^*|}{|G^*|_{inicial}} \quad (5)$$

Como se puede observar en la ecuación 5, C toma el valor de 1 en el tiempo inicial y disminuye según el avance del daño. Posteriormente se puede desarrollar un modelo matemático de ajuste de los valores de C contra los valores de daño para obtener:

$$C_{(t)} = C_0 - C_1 [D(t)]^{C_2} \quad (6)$$

Donde se tienen los coeficientes del modelo C_0 , C_1 y C_2 . Seguidamente al sustituir la ecuación 6 en la ecuación 2 y derivando respecto al daño se obtiene:

$$\frac{dW}{dD} = -\pi I_D C_1 C_2 (D)^{C_2-1} (\gamma_{max})^2 \quad (7)$$

La ecuación 6 se combina con la 1 para obtener el número de ciclos a la falla, dado un valor de daño de falla, como se muestra a continuación.

$$N_f = \frac{f(D_f)^{1+(1-C_2)\alpha}}{k(\pi I_D C_1 C_2)^\alpha} (\gamma_{max})^{-2\alpha} \quad (8)$$

Donde f es la frecuencia de carga y D_f es el daño acumulado a la falla.

La expresión anterior sigue el modelo de fatiga:

$$N_f = A(\gamma_{max})^{-B} \quad (9)$$

Y se obtienen los valores de A y B que corresponden al valor máximo de repeticiones de carga posibles para el material y la tasa de daño respectivamente.

$$A = \frac{f(D_f)^{1+(1-C_2)\alpha}}{k(\pi I_D C_1 C_2)^\alpha} \quad (10)$$

$$B = -2\alpha \quad (11)$$

2.3.3 Propiedades químicas

Como se mencionó anteriormente, el asfalto es una mezcla compleja que involucra grandes cantidades de compuestos. Por esta razón, se han desarrollado maneras de agrupar los componentes del material de forma conveniente. La clasificación por grupos funcionales, ha sido estudiada por varios autores, entre ellos Corbett y Knotnerus. Corbett definió cuatro grupos funcionales llamados saturados, aromáticos nafténicos, aromáticos polares y asfaltenos. El orden fue establecido por la polaridad de las moléculas que componen cada grupo. En el orden que se presentó, los saturados son los que presentan menor reactividad química (resistentes a la oxidación), mientras que los asfaltenos son los más reactivos o polares (propensos a oxidarse) (Petersen, 2009). Del estudio de los dos autores antes mencionados se llegó a determinar claramente que la reactividad es directamente proporcional a la polaridad de los grupos funcionales.

La oxidación se define como el proceso químico en el que un compuesto cede electrones. En muchos casos durante el proceso, el compuesto gana átomos de oxígeno sin embargo no siempre es el caso. Específicamente en la oxidación del asfalto se han hecho varios estudios donde se busca determinar los compuestos que se crean durante este proceso. Al conocer que

la formación de carbonilos ($C=O$) ha sido estudiada y probada como un indicador de la oxidación en asfaltos, los autores Domke, Davison y Glover (2000) entre otros han desarrollado modelos matemáticos para determinar la tasa de formación de carbonilos como función de la temperatura y presión. Esto muestra la relevancia que se le ha dado a la formación de carbonilos como evidencia del proceso oxidativo.

Petersen (2009) se refiere en su análisis de la oxidación del asfalto, a los grupos funcionales que se forman en dicho proceso. El grupo funcional con mayor concentración que se expone en este trabajo corresponde a las cetonas, las cuales se caracterizan por tener un grupo carbonilo. Esto concuerda con lo presentado por los autores anteriormente mencionados. Se ha obtenido evidencia de que las cetonas son provocadas principalmente por las posiciones bencílicas que son más susceptibles a la oxidación (Dorrence, Barbour, & Petersen, 1974).

Por su parte, el segundo grupo funcional de mayor importancia en la oxidación corresponde a los sulfóxidos. Estos se forman a partir de la oxidación de sulfuros orgánicos que son fracciones funcionales en muchas moléculas de asfalto (Petersen, 2009). Por último se tiene a los grupos funcionales anhídridos y ácidos carboxílicos, los primeros corresponden a un compuesto orgánico que tiene dos grupos acilo ($R-CO-$) enlazados al mismo átomo de oxígeno, mientras que el segundo es un ácido que puede llegar a formar un anhídrido común llamado anhídrido carboxílico. Estos dos compuestos se caracterizan por tener enlaces carbono-oxígeno al igual que las cetonas. La creación de un anhídrido carboxílico puede resultar de moléculas aromáticas particulares que tienen enlaces a dos fracciones de carbono bencílico (Petersen, Barbour, & Dorrence, 1975).

En otros estudios como el de Aguiar et al. (2015), en el que se estudia el efecto del envejecimiento en propiedades de adhesión de mezcla asfáltica, se reitera que la formación de grupos químicos como los carbonilos y los sulfóxidos es de importancia debido a que es un indicador del proceso de oxidación. De lo anterior se extrae que a pesar de hay varios compuestos indicadores de la oxidación, los más relevantes y utilizados son los sulfóxidos y los carbonilos.

2.3.4 Ensayos químicos

Ensayo FTIR

Para determinar las características químicas previas y posteriores al envejecimiento se tienen algunas herramientas, sin embargo el ensayo de espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier o FTIR por sus siglas en inglés, es adecuado para determinar posibles procesos de oxidación en las muestras. Este ensayo se basa en la interacción entre la energía de la radiación infrarroja y los enlaces covalentes de las moléculas dentro de la muestra. El instrumento, a través de su componente óptico de precisión (llamado interferómetro) hace llegar a la muestra todas las longitudes de onda de la luz. Esto mediante la generación de un patrón de interferencia con todos los movimientos vibracionales de la molécula que posteriormente se modifica matemáticamente con la transformada de Fourier para producir el espectro.

Al coincidir la frecuencia de la luz con la frecuencia natural de las vibraciones moleculares, se genera una resonancia que depende, entre otros, de la masa de los átomos enlazados y en el orden de los enlaces. Además, para que la radiación infrarroja sea absorbida, la vibración del enlace debe causar un cambio en el momento de dipolo de la molécula. Para completar la medición y mostrar el espectro de la muestra, el instrumento debe inicialmente realizar la medición del entorno, sin la muestra presente. Posteriormente se realiza la medición con la muestra, pasando la radiación por el material, donde parte será absorbida y parte pasará a través. Finalmente el instrumento usa los dos espectros obtenidos y mediante una proporción elimina lo registrado en el entorno, con lo cual se obtiene el espectro propio del material con sus características particulares (Gundlach, Paulsen, Garry, & Lowry, 2015).

Para interpretar los resultados se debe tomar en cuenta que los picos corresponden a frecuencias de vibración entre los enlaces atómicos del material y se puede determinar el tipo de moléculas que se generan según la longitud de onda en la que se encuentre este. El hecho de que cada material tenga una combinación de átomos que lo caracteriza, hace que los espectros sean diferentes en cada caso. Otro aspecto importante del ensayo es que la magnitud de los picos se puede relacionar con la concentración de las moléculas en la muestra, por lo cual se convierte en una herramienta ideal para cuantificar los efectos de reacciones e identificar materiales (Thermo Nicolet Corporation, 2001). La norma de referencia para este ensayo corresponde a ASTM E1252-98 con nombre técnicas generales para obtener espectros infrarrojos para análisis cualitativo.

Finalmente se introduce la ley de Beer que respalda la afirmación de que los picos en los espectros se pueden relacionar con la concentración de un compuesto en la muestra. La relación que propone esta ley se muestra en la ecuación 12. En esta ecuación se puede ver que existe una relación proporcional entre las variables. La variable A corresponde a la absorbancia, a corresponde a una constante de proporcionalidad llamada absorptividad, b es la longitud de trayectoria a través de un medio y c es la concentración del compuesto que absorbe (Skoog, Holler, & Crouch, 2008). Esto indica que existe una relación de proporcionalidad directa entre la absorbancia obtenida de los espectros y la concentración de determinado compuesto o grupo.

$$A = a * b * c \quad (12)$$

3. PROCESO DE ENVEJECIMIENTO DEL ASFALTO EN CAMPO

3.1 Factores de envejecimiento

El proceso de envejecimiento del asfalto en campo tiene que ver con muchas variables de tipo climáticas, como lo son la precipitación, la presión atmosférica, la temperatura y la radiación. Sin embargo, en las normas actuales no se consideran todas estas para simular el envejecimiento de los asfaltos.

En primera instancia, el agua de lluvia que cae sobre los pavimentos es un factor que afecta grandemente la estructura del pavimento. Sin embargo no solo afecta la estructura del pavimento sino que también interacciona con el asfalto y propicia su envejecimiento. Los ciclos de precipitación y evaporación que ocurren, no son aplicados actualmente y deben ser representados de alguna manera en los ensayos.

Por su parte la temperatura ha sido una de las causas del envejecimiento que más se ha estudiado y que se encuentra actualmente incorporada en los ensayos normados. De igual manera la presión y su incidencia en el asfalto sí se ha considerado en las normas actuales.

El último de los factores que se contemplan es la radiación ultravioleta, que tal y como se estudió anteriormente, transportan grandes cantidades de energía debido a su reducida longitud de onda. Es por esto que se debe estudiar la interacción entre esta radiación y los compuestos presentes en el asfalto.

3.2 Radiación UV en Costa Rica

Para describir el proceso de envejecimiento del asfalto en campo, se incorpora en este estudio la radiación ultravioleta proveniente del sol. Se realizó la búsqueda de información de radiación solar que recibe el país de Costa Rica con el objetivo de llegar a representar las condiciones locales a las cuales es sometido el asfalto utilizado en esta misma zona.

La información recopilada corresponde a estaciones de medición del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Se realizó la búsqueda para representar dos zona del país, el valle central y la costa. Se decidió investigar estas zonas debido a que se conoce que la radiación global varía según la altura y se desea tomar en cuenta de ser un cambio considerable. Se logró recopilar datos de cuatro estaciones del valle central y seis cercanas a la costa. En los cuadros 1 y 2 se pueden observar las estaciones meteorológicas utilizadas con su respectiva ubicación espacial.

Cuadro 2. Coordenadas y altitud de las estaciones consideradas del valle central

Estación	Latitud N		Longitud O		Altitud m.s.n.m
	°	"	°	"	
CIGEFI, Aut	9	56	84	2	1210
IMN, Aranjuez	9	56	84	4	1181
Aeropuerto Juan Santamaría, Media	9	59	84	10	913
Aeropuerto Pavas Oeste	9	57	84	8	997

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional**Cuadro 3. Coordenadas y altitud de las estaciones consideradas en la costa**

Estación	Latitud N		Longitud O		Altitud m.s.n.m
	°	"	°	"	
San José, Pinilla, Aut	10	15	85	50	15
Paquera	9	49	84	56	10
Puntarenas	9	58	84	49	3
Aeropuerto, Limón	9	57	83	1	5
Golfito, Aut	8	38	83	10	6
Manzanillo	9	38	82	39	80

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional

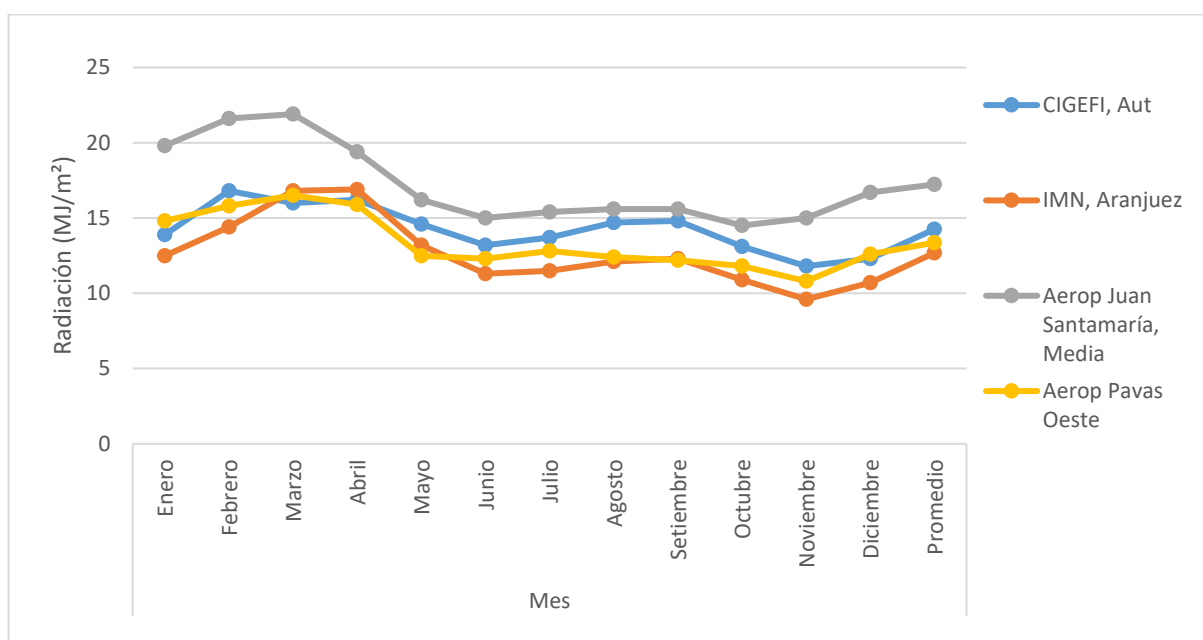
Como se observa en los cuadros anteriores, lo que diferencia a los dos grupos estudiados es la elevación sobre el nivel del mar. Las estaciones del valle central llegan a tener un promedio de altitud de 1075 m.s.n.m, mientras que las correspondientes a la costa tienen un promedio de 20 m.s.n.m.

Seguidamente en el Cuadro 4 y Cuadro 5 se puede observar los datos de radiación global promedio para cada mes del año, según la estación correspondiente. Adicionalmente se indica el promedio de todos los meses de manera ilustrativa en la Figura 6 y Figura 7. En el siguiente capítulo se trabaja más con estos datos como parte de la metodología.

Cuadro 4. Radiación promedio mensual según las estaciones del valle central

Estación		CIGEFI, Aut	IMN, Aranjuez	Aerop Juan Santamaría, Media	Aerop Pavas Oeste
Radiación (MJ/m ²)	Enero	13.9	12.5	19.8	14.8
	Febrero	16.8	14.4	21.6	15.8
	Marzo	16	16.8	21.9	16.5
	Abril	16.2	16.9	19.4	15.9
	Mayo	14.6	13.2	16.2	12.5
	Junio	13.2	11.3	15	12.3
	Julio	13.7	11.5	15.4	12.8
	Agosto	14.7	12.1	15.6	12.4
	Setiembre	14.8	12.3	15.6	12.2
	Octubre	13.1	10.9	14.5	11.8
	Noviembre	11.8	9.6	15	10.8
	Diciembre	12.3	10.7	16.7	12.6
	Promedio	14.3	12.7	17.2	13.4

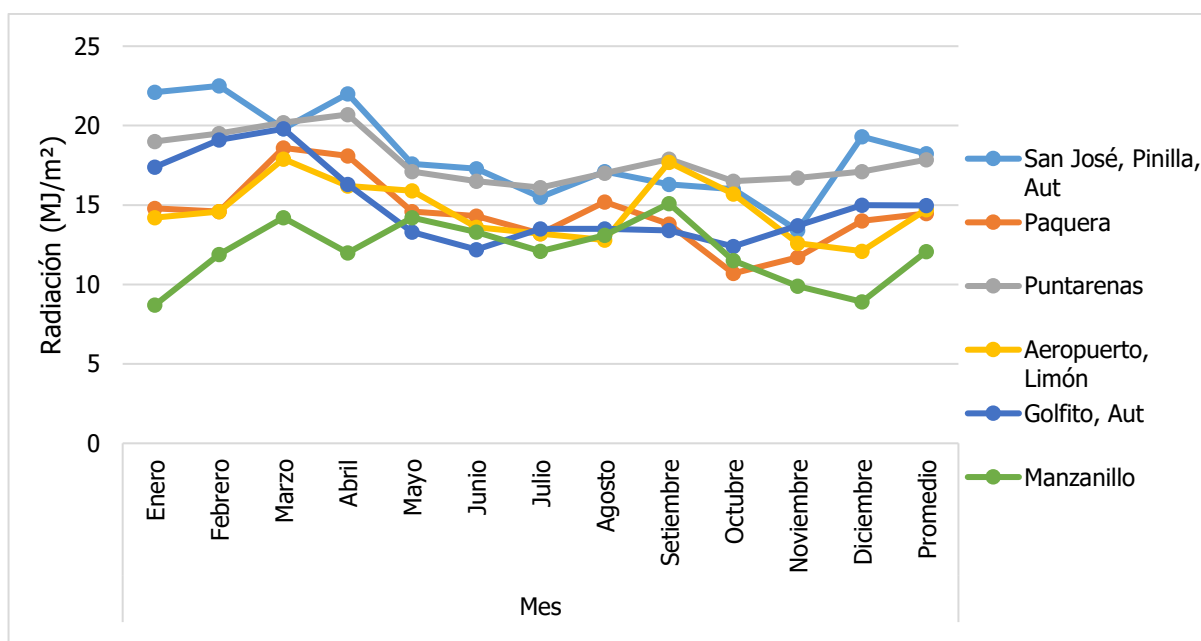
Fuente: Instituto Meteorológico Nacional

**Figura 6. Radiación promedio mensual según las estaciones del valle central**

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional

Cuadro 5. Radiación promedio mensual según las estaciones costeras

Estación		San José, Pinilla, Aut	Paquera	Puntarenas	Aeropuerto, Limón	Golfito, Aut	Manzanillo
Radiación (MJ/m ²)	Enero	22.1	14.8	19	14.2	17.4	8.7
	Febrero	22.5	14.6	19.5	14.6	19.1	11.9
	Marzo	19.8	18.6	20.2	17.9	19.8	14.2
	Abril	22	18.1	20.7	16.2	16.3	12
	Mayo	17.6	14.6	17.1	15.9	13.3	14.2
	Junio	17.3	14.3	16.5	13.6	12.2	13.3
	Julio	15.5	13.2	16.1	13.2	13.5	12.1
	Agosto	17.1	15.2	17	12.8	13.5	13.1
	Setiembre	16.3	13.8	17.9	17.7	13.4	15.1
	Octubre	16	10.7	16.5	15.7	12.4	11.5
	Noviembre	13.4	11.7	16.7	12.6	13.7	9.9
	Diciembre	19.3	14	17.1	12.1	15	8.9
	Promedio	18.2	14.5	17.9	14.7	15.0	12.1

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional**Figura 7. Radiación promedio mensual según las estaciones costeras****Fuente: Instituto Meteorológico Nacional**

4. METODOLOGÍA E IMPLEMENTACIÓN DEL ENSAYO

4.1 Desarrollo y características de la cámara de envejecimiento

Para llevar a cabo un ensayo de envejecimiento por radiación UV, se desarrolló en el LanammeUCR una cámara de envejecimiento que puede aplicar calor así como radiación UV. La cámara desarrollada puede llegar a temperaturas de hasta 200 °C con un control de 0.1°C. Por su parte, la cámara cuenta con cuatro lámparas instaladas, las cuales emiten en longitudes de onda de 368 nm y 415 nm aproximadamente. Lo anterior fue comprobado por el laboratorio a través del Espectrofotómetro AvaSpec 3648, marca Avantes con accesorio coseno colector para fibra óptica. Los resultados se pueden observar en la Figura 8. Las longitudes de onda que se reportaron anteriormente corresponden en parte a UV-A y la otra parte a radiación dentro del espectro visible. Además estas lámparas tienen una potencia de 10 Watts cada una y por lo tanto el conjunto alcanza los 40 W.

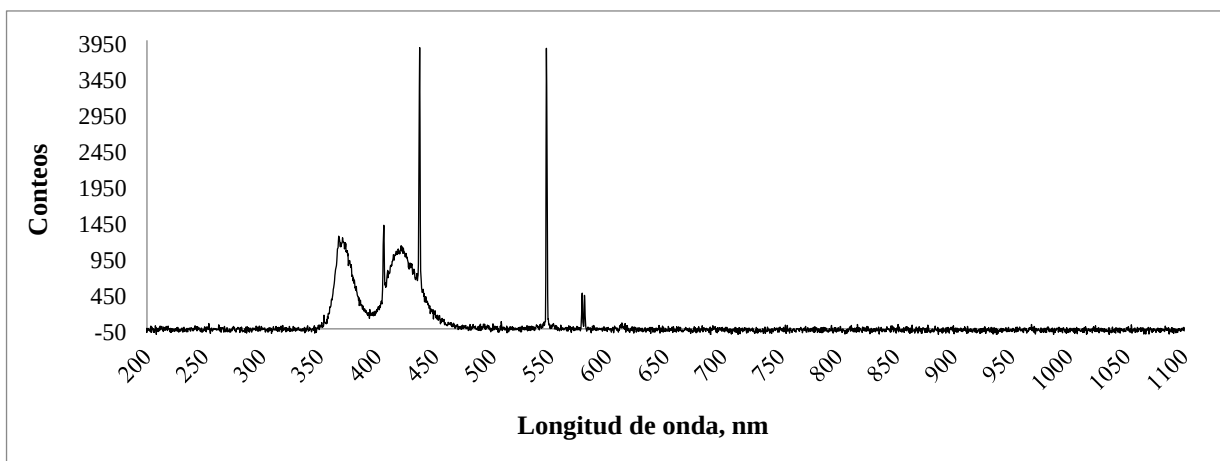


Figura 8. Espectro de emisión de las lámparas UV empleadas en la cámara de envejecimiento

Fuente: LanammeUCR, 2016

Además de lo anterior el LanammeUCR realizó una prueba para obtener las longitudes de onda que pueden ser absorbidas por el asfalto (Figura 9). La prueba se efectuó mediante el Espectrofotómetro L1050 High Performance, marca Perkin Elmer, utilizando una esfera integradora de 60 mm. De la Figura 9 se puede observar que el asfalto absorbe efectivamente en el rango de longitud de onda cercano a 368 nm correspondiente a la radiación UV emitida por las lámparas.

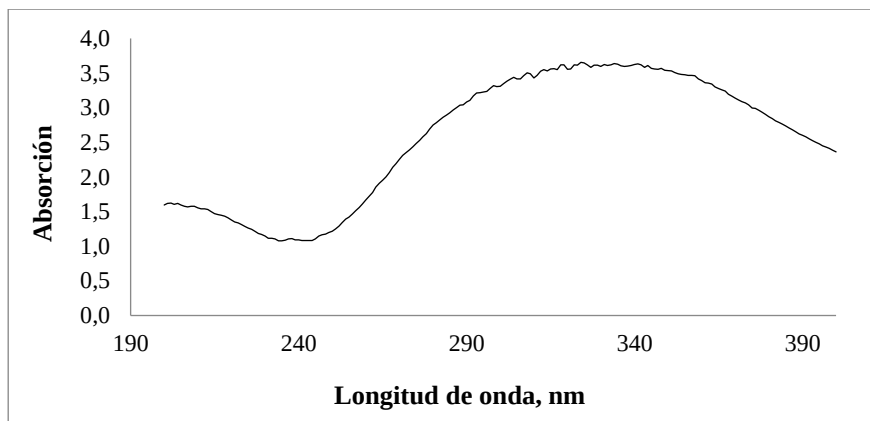


Figura 9. Espectro de absorción del asfalto en la región UV

Fuente: LanammeUCR, 2016

En cuanto a las dimensiones internas del horno, se tiene que la forma es rectangular con lados de 41.5 cm de ancho y 69 cm de largo. Finalmente se presenta una imagen de la cámara completa, la cual fue usada para el presente proyecto (Figura 10).

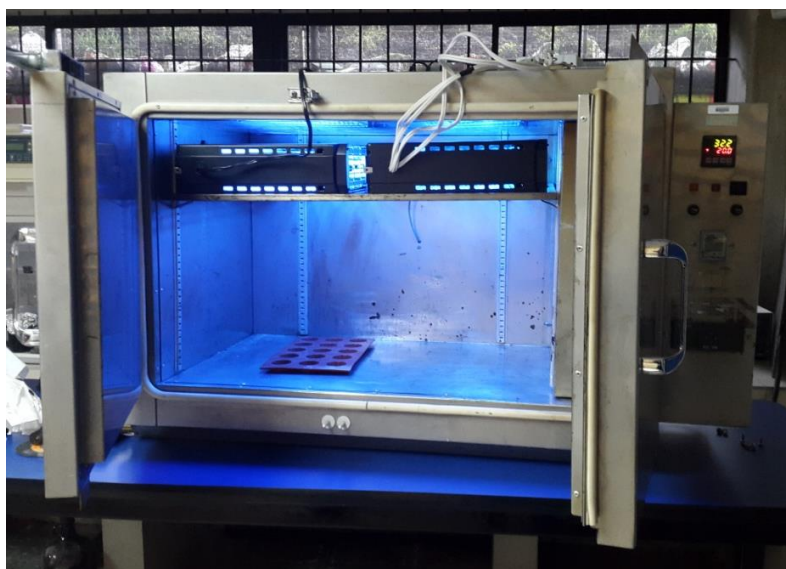


Figura 10. Cámara de envejecimiento mediante radiación UV y calor

Fuente: LanammeUCR, 2016

4.2 Confección de especímenes

Para la confección de especímenes se cuenta con el ligante asfáltico 0925-14 el cual clasifica según el grado de desempeño como PG 64-22. Se decidió que los especímenes sean de 1 mm de espesor para poder evaluar las condiciones en la parte superior e inferior y realizar comparaciones. Adicionalmente se confeccionaron muestras de 2 mm con el objetivo de que tuviera las dimensiones apropiadas para el ensayo LAS. La muestra original se pasó inicialmente

de un envase grande metálico a un beaker de 500 mililitros para su manejo y rotulación (Figura 11).

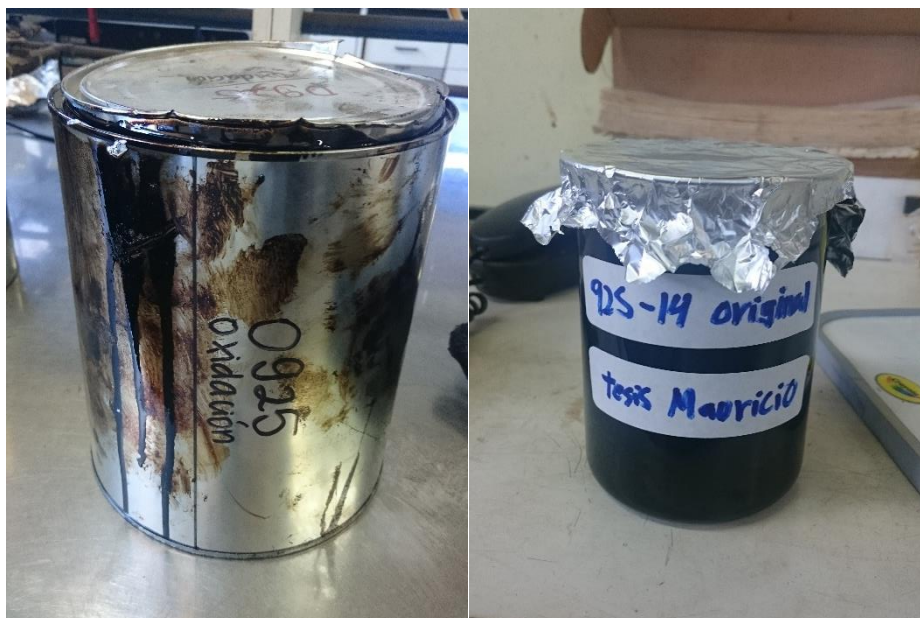


Figura 11. Muestra de asfalto 0925-14 en su estado original

El siguiente paso corresponde a envejecer la muestra mediante el ensayo RTFO o a corto plazo. Sin embargo, para esto se requiere saber previamente un aproximado de la cantidad de muestra que se necesitará por lo que a continuación se muestran las estimaciones realizadas.

Preparación de muestras

Se cuenta para la confección de muestras con moldes de silicón como los siguientes:



Figura 12. Moldes utilizados para la confección de muestras

Los moldes mostrados tienen la forma de cono truncado por lo que se realizan los cálculos para tener mayor certeza de que se obtengan muestras de 1 mm de espesor.

El volumen de un cono truncado se define mediante:

$$V = \frac{1}{3}\pi h(R^2 + r^2 + Rr)$$

Para todo el molde se tiene:

$$R=1.95 \text{ cm} \quad r=1.65 \text{ cm} \quad h=1.2 \text{ cm}$$

Sustituyendo en la ecuación se obtiene el volumen del molde.

$$V_{total} = \frac{1}{3}\pi 1.2(1.95^2 + 1.65^2 + 1.95 * 1.65) = 12.24 \text{ cm}^3$$

Seguidamente se obtiene el volumen para 1 mm de altura. Interpolando para obtener el diámetro superior se obtiene que corresponde a 1.675 cm y por lo tanto,

$$V_{1mm} = \frac{1}{3}\pi 0.1(1.675^2 + 1.65^2 + 1.675 * 1.65) = 0.868 \text{ cm}^3$$

Posteriormente para 2 mm de altura se obtiene de igual manera el volumen. Interpolando para obtener el diámetro superior se obtiene que corresponde a 1.7 cm y por lo tanto,

$$V_{2mm} = \frac{1}{3}\pi 0.2(1.7^2 + 1.65^2 + 1.7 * 1.65) = 1.763 \text{ cm}^3$$

Densidad del asfalto: $\rho_{asfalto} = 1.03 \text{ g/cm}^3$

Se obtiene entonces la masa de asfalto para 1mm de altura:

$$m_{asfalto_{1mm}} = 1.03 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 0.868 \text{ cm}^3 = \mathbf{0.894 \text{ g}}$$

De igual forma la masa de asfalto para 2mm de altura:

$$m_{asfalto_{2mm}} = 1.03 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 1.763 \text{ cm}^3 = \mathbf{1.816 \text{ g}}$$

Masa de asfalto requerida:

Para las bandejas:

- 9 muestras de 1 mm de espesor por cada uno de los 7 tiempos de exposición
- 1 muestras de 2 mm de espesor por cada uno de los 7 tiempos de exposición
- Dos tratamientos: UV y UV+Temperatura

$$M_{bandejas} = 2 * (9 * 7 * 0.894 + 1 * 7 * 1.816) = 138 \text{ g}$$

Para el ensayo PAV:

$$M_{PAV} = 50 \text{ g}$$

$$M_{total} = M_{bandejas} + M_{PAV} = 138 \text{ g} + 50 \text{ g} = \mathbf{188 \text{ g}}$$

Una vez teniendo el estimado de la masa requerida se procedió con el envejecimiento a corto plazo de la muestra mediante el ensayo RTFO, siguiendo la norma ASTM D2872. Este ensayo se llevó a cabo mediante equipo del LanammeUCR, específicamente con el horno de la marca James Cox & Sons modelo CS 325-B. El horno cumple con las especificaciones ASTM y para el desarrollo de la investigación se realizaron dos corridas del ensayo para cumplir con los requerimientos de masa obtenidos. El horno usado se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Horno usado para el ensayo RTFO

Fuente: LanammeUCR, 2016

Seguidamente como se vio en la determinación de masa, 50 gramos de los obtenidos del ensayo RTFO se usaron para el ensayo normado de envejecimiento a largo plazo PAV. Para esto se utilizó el horno de la marca Applied Test Systems fabricado para este ensayo y conforme a la norma correspondiente de ASTM (Figura 14). El asfalto obtenido se usará para comparaciones posteriores.



Figura 14. Cámara usada para el ensayo PAV

Fuente: LanammeUCR, 2016

Posteriormente se utilizó el asfalto envejecido a corto plazo (RTFO) para preparar los especímenes. Para esto se calentó el asfalto a 135 °C para obtener una consistencia adecuada para ser chorreado. Se usó una balanza de incertidumbre de ± 0.5 g por lo que se buscó para las muestras de 1 mm que la balanza registrara 0.9 g para acercarse adecuadamente a lo requerido, mientras que para las muestras de 2 mm se buscó una medición de la balanza de 1.8 g. En la Figura 15 se muestra la balanza, así como un momento durante el proceso de chorreado.



Figura 15. Proceso de chorreado de las muestras y balanza utilizada

Como se puede observar en la Figura 15, el asfalto al ser vertido en los moldes adquiere una forma redondeada no uniforme que no es la deseada para la prueba. Debido a esto, posterior al proceso de chorreado se introdujeron las bandejas al horno (135 °C) durante cortos periodos de tiempo con el objetivo de distribuir el ligante en la superficie del molde. El resultado son muestras de aproximadamente 1 y 2 mm de espesor, distribuidas homogéneamente en los moldes (Figura 16).



Figura 16. Muestras finales distribuidas en los moldes

4.3 Determinación de los tiempos de horno

Como se estableció en los objetivos, se propone en este estudio una metodología para la implementación de un ensayo de envejecimiento en el laboratorio mediante radiación ultravioleta y temperatura. Para esto es necesario conocer las condiciones de radiación que se desean incorporar en el ensayo. Se buscaron entonces, como se vio anteriormente, los datos de radiación para Costa Rica en diferentes fuentes. A partir de esta búsqueda se lograron recopilar datos del Instituto Meteorológico Nacional (IMN), los cuales corresponden a la radiación solar global, medido en megajulios por metro cuadrado (MJ/m²). Esta recopilación de datos se hizo además tratando de representar dos zonas diferentes en el país. Estas zonas diferenciadas por su altura, la primera representando la zona costera del país con alturas cercanas a 0 m.s.n.m y la segunda representando el valle central con alturas cercanas a los 1000 m.s.n.m. Los datos que se presentaron anteriormente se resumieron mediante los promedios y se muestran en el Cuadro 6 y Cuadro 7.

Cuadro 6. Radiación promedio mensual y total para las estaciones del valle central

Estación	Altitud (m.s.n.m)	Radiación (MJ/m ²)	
		Promedio	Promedio total
CIGEFI, Aut	1210	14.3	13.8
IMN, Aranjuez	1181	12.7	
Aerop Juan Santamaría, Media	913	17.2	
Aerop Pavas Oeste	997	13.4	

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional

Cuadro 7. Radiación promedio mensual y total para las estaciones costeras

Estación	Altitud (m.s.n.m)	Radiación (MJ/m ²)	
		Promedio	Promedio total
San José, Pinilla, Aut	15	18.2	15.4
Paquera	10	14.5	
Puntarenas	3	17.9	
Aeropuerto, Limón	5	14.7	
Golfito, Aut	6	15.0	
Manzanillo	80	12.1	

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional

Como se observa en los datos resumidos, la radiación global promedio mensual para la zona costera es mayor que la registrada en promedio para la zona del valle central. Se obtiene que la segunda es aproximadamente un 10 % menor que la primera lo cual no se considera lo suficientemente diferente para hacer dos ensayos. Se toma la decisión de proceder con el caso más crítico o agresivo que es el de la zona costera con un promedio mensual de 15.4 MJ/m².

Como se obtuvo una magnitud global, es necesario determinar qué porción de esta corresponde a radiación ultravioleta. Tal y como se muestra en el marco teórico, se han hecho mediciones de la radiación UV en diferentes lugares del mundo, obteniendo que del total de radiación solar, esta representa de un 5 % a un 7 %. A partir de esto se usará para los cálculos posteriores un 7 % al ser este valor el más crítico.

Se obtiene entonces la radiación ultravioleta promedio mensual de:

$$\text{Radiación UV prom mensual} = 0.07 * 15.4 = 1.08 \text{ MJ/m}^2$$

Ahora se deben establecer las características del horno que se implementará. Se cuenta con cuatro lámparas de radiación ultravioleta tipo A (368 nm) las cuales juntas alcanzan una potencia de 40 W. Además se tiene que las dimensiones de la parte inferior rectangular de la cámara de envejecimiento son de 41.5*69 cm lo cual comprende un área de 0.29 m². Con esto se obtiene que la radiación en potencia por unidad de área de la cámara es de 140 W/m². Estos datos se resumen en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Condiciones de radiación UV de la cámara de envejecimiento propuesta

Radiación en cámara (W)	Ancho (m)	Largo (m)	Área (m²)	Radiación en cámara (W/m²)
40	0.415	0.69	0.29	140

Ahora tomando en cuenta la definición de Julio y Watt, se pueden hacer las conversiones de la radiación promedio mensual a su tiempo equivalente en la cámara.

Julio: unidad de trabajo

$$1J = 1N * m = 1 \left(kg * \frac{m}{s^2} \right) * m = 1 \frac{kg * m^2}{s^2}$$

Watt: unidad de potencia

$$1W = 1 \frac{J}{s} = 1 \frac{kg * m^2}{s^3}$$

Como tenemos que en un mes hay $1.08 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$, y se sabe que la radiación en la cámara es de 140 W/m^2 o $140 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}$ entonces basta con realizar la razón entre estos valores para encontrar la cantidad de segundos equivalentes.

Se obtiene el tiempo de exposición a 140 W/m^2 para representar el promedio mensual:

$$\text{Radiación (1 mes)} = \frac{1.08 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}}{140 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}} = 7710 \text{ s} = 2.1 \text{ h}$$

A partir de esto se puede obtener para la cantidad de meses o años que se deseen. En el Cuadro 9 se muestran los días y horas correspondientes a la cantidad de años escogidos.

Cuadro 9. Tiempos de exposición en el horno para el ensayo acelerado

	Tiempo de exposición a 140 W/m^2 para representar						
	1 mes	4 meses	1 año	2 años	4 años	8.5 años	16 años
Horas	2.1	8.6	26	51	103	218	411
Días	0.1	0.4	1.1	2.1	4.3	9.1	17.1

Cabe destacar que los tiempos escogidos se hicieron tomando en cuenta el horario laboral del laboratorio para poder recoger las muestras en el tiempo determinado.

Se decidió condicionar o envejecer las muestras de dos maneras diferentes para incorporar las posibilidades del horno provisto por el laboratorio. Por esta razón se determinó que el primer caso corresponderá a un envejecimiento con radiación ultravioleta, a temperatura ambiente y el segundo con radiación y una temperatura de $60 \text{ }^\circ\text{C}$ la cual se considera una temperatura crítica de servicio.

4.4 Ensayos de caracterización

Finalmente para obtener resultados del proceso de envejecimiento, se procedió a realizar ensayos de las muestras realizadas. A continuación se detallan los ensayos realizados

Ensayo FTIR

Para este ensayo se utilizó un espectrómetro de infrarrojo por transformada de Fourier, este es de la marca Thermo Scientific y es el modelo Nicolet iS50 FTIR-ATR. El hecho de que este espectrómetro use la reflexión total atenuada (ATR) hace que se pueda evaluar las muestras en estado sólido o líquido sin tener que confeccionar pastillas ni ninguna preparación adicional.

Los resultados fueron obtenidos por triplicado y se realizaron mediciones de las muestras por su parte expuesta o superior y la no expuesta o inferior. Lo anterior para poder valorar la extensión de la oxidación por radiación UV. El espectrómetro utilizado, así como un ejemplo de la muestra lista para la medición, se observa en la Figura 17.

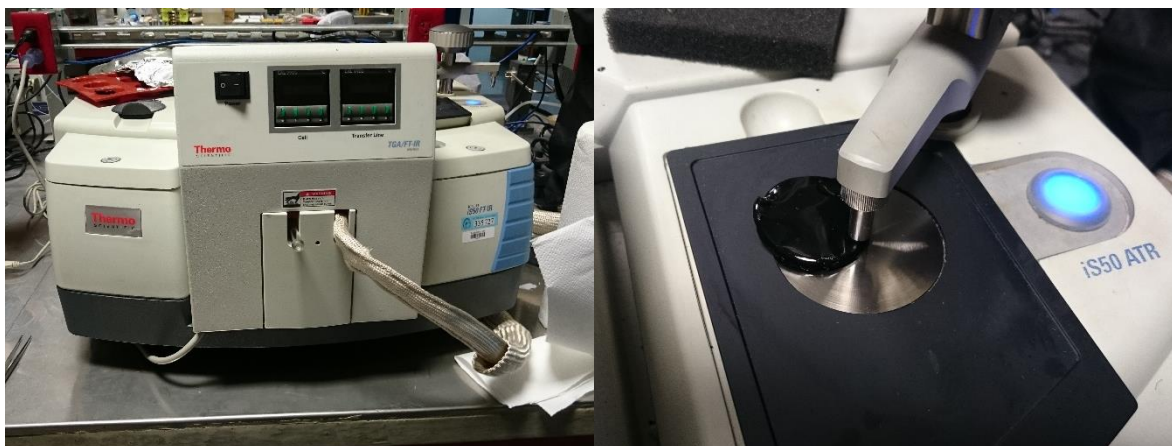


Figura 17. Espectrómetro de infrarrojo usado para las pruebas químicas, FTIR-ATR Thermo Scientific

Fuente: LanammeUCR, 2016

Barrido de frecuencia y temperatura y LAS

Para estos ensayos se utilizó un reómetro de corte dinámico, DSR TA Instruments (Figura 18). Para el barrido de frecuencias y temperaturas se desarrolló el ensayo a tres temperaturas las cuales son 5 °C, 15 °C y 25 °C; y a las frecuencias determinadas para este ensayo desde 0.1 rad/s a 100 rad/s. Por su parte el ensayo LAS se efectuó inicialmente mediante un barrido de frecuencias de 0.1 Hz a 30 Hz y posteriormente el barrido de amplitudes desde 0.01% a 30% de deformación unitaria a 10 Hz de frecuencia.



Figura 18. Reómetro de corte dinámico utilizado para las pruebas reológicas, DSR TA Instruments

Fuente: LanammeUCR, 2016

5. MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES QUÍMICAS Y MECÁNICAS

5.1 Inspección Visual

Inicialmente, antes de revisar las propiedades medidas en el laboratorio, cabe observar el aspecto físico de las muestras después de su envejecimiento en el horno UV. Se busca en este caso diferenciar el aspecto de la muestra inicial con el obtenido posterior al tratamiento.

En primera instancia las muestras tienen todas un aspecto homogéneo y brillante tal y como lo es el asfalto. Esto se puede observar en la Figura 16. Tras observar el aspecto de las muestras envejecidas con radiación ultravioleta a temperatura ambiente, se nota que durante las primeras 100 horas no se presentan cambios en la apariencia de las muestras y es a partir de las muestras de 200 horas que se observa una textura diferente en estas. Las muestras adquieren un aspecto rugoso y opaco, lo cual se puede apreciar en la Figura 19.

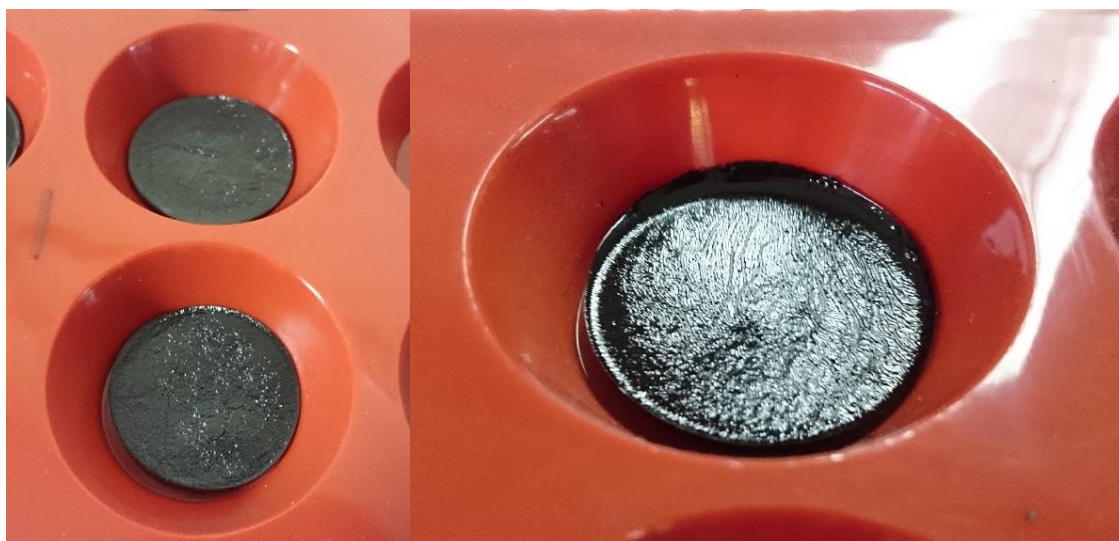


Figura 19. Aspecto de las muestras posterior a 200 horas en el horno con radiación UV a temperatura ambiente

Al revisar las muestras sometidas a radiación UV y temperatura de 60 °C, se puede determinar que no hay cambios en la apariencia de las muestras a ninguno de los tiempos de exposición implementados. Más adelante se podrá determinar si la apariencia física de las muestras se relaciona con sus características mecánicas o químicas.

5.2 Propiedades Químicas

5.2.1 Asfalto original

Para realizar un estudio apropiado de las propiedades químicas del asfalto se debe iniciar por determinar los grupos funcionales característicos del asfalto original con el que se trabaja. Por lo tanto se presenta a continuación el espectro del ligante utilizado (Figura 20), donde se aprecian las bandas de los grupos funcionales. Es importante establecer que la medición se presenta en absorbancia debido a que esta se puede relacionar con la concentración de determinado compuesto. La base teórica para la afirmación corresponde a la ley de Beer-Lambert.

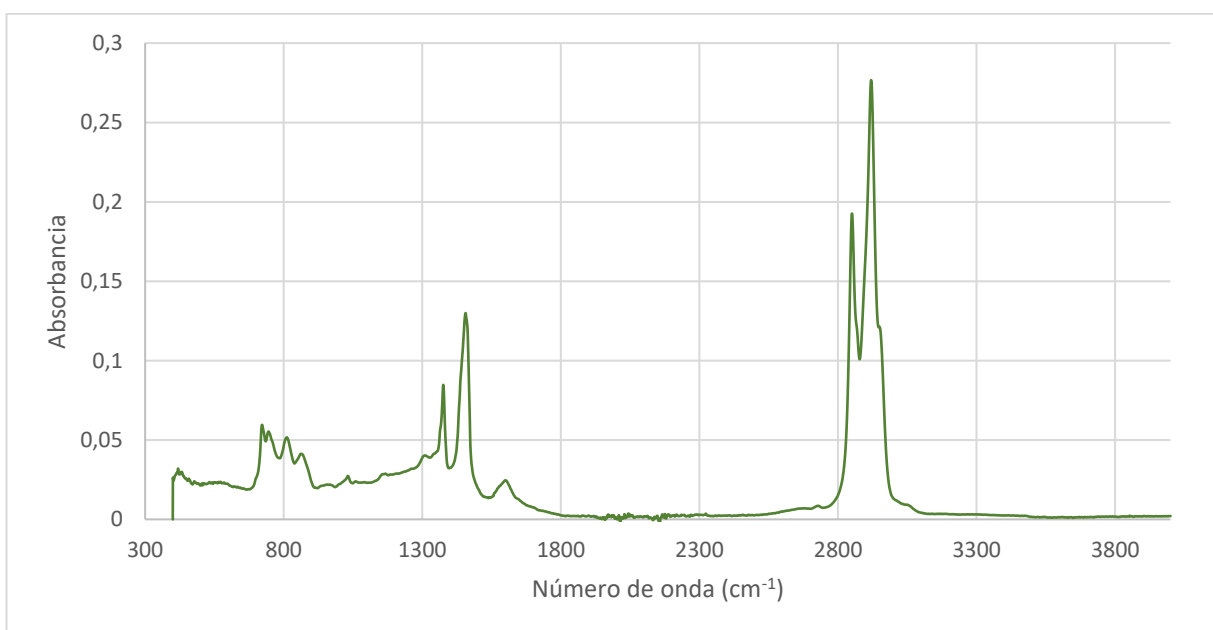


Figura 20. Espectro infrarrojo del asfalto 0925-14 en su estado original

Cuadro 10. Bandas y grupos funcionales característicos del asfalto 0925-14 en su estado original

Bandas	Grupos funcionales
2851 cm ⁻¹ - 2920 cm ⁻¹	banda de intensidad alta del grupo CH ₂ y CH ₃ Hidrocarburos saturados.
1600 cm ⁻¹	banda de intensidad baja de los C=C (Ar) Hidrocarburos aromáticos.
1500 cm ⁻¹	banda de intensidad media de los C=C (Ar) Hidrocarburos aromáticos.
1450 cm ⁻¹	banda de intensidad media del grupo CH ₂ y CH ₃ Hidrocarburos saturados.

1340 cm ⁻¹	banda de intensidad media de los C-N Aminas aromáticas.
1170 cm ⁻¹	banda de intensidad baja de los R-O-Ar de los alquil Aril eteres.
1000 cm ⁻¹ -1090 cm ⁻¹	banda de intensidad baja de los R-S=O de los sulfóxidos.
1030 cm ⁻¹	banda de intensidad baja de los R-O-Ar de los alquil Aril eteres.
750 cm ⁻¹	banda de intensidad baja de los C-H <i>meta</i> de compuestos aromáticos.
720 cm ⁻¹	banda de intensidad baja de los C-H <i>para</i> de compuestos aromáticos.

5.2.2 Radiación UV a temperatura ambiente

Iniciando con el tratamiento de radiación a temperatura ambiente, se presentan los espectros medidos en la parte superior de las muestras de cada tiempo de exposición seleccionado, junto con el original y los propios de los ensayos normados (Figura 21). En esta figura se observan las diferencias en el espectro que se explicarán posteriormente, sin embargo los cambios incrementales que se observan, dan una idea preliminar de la oxidación del asfalto.

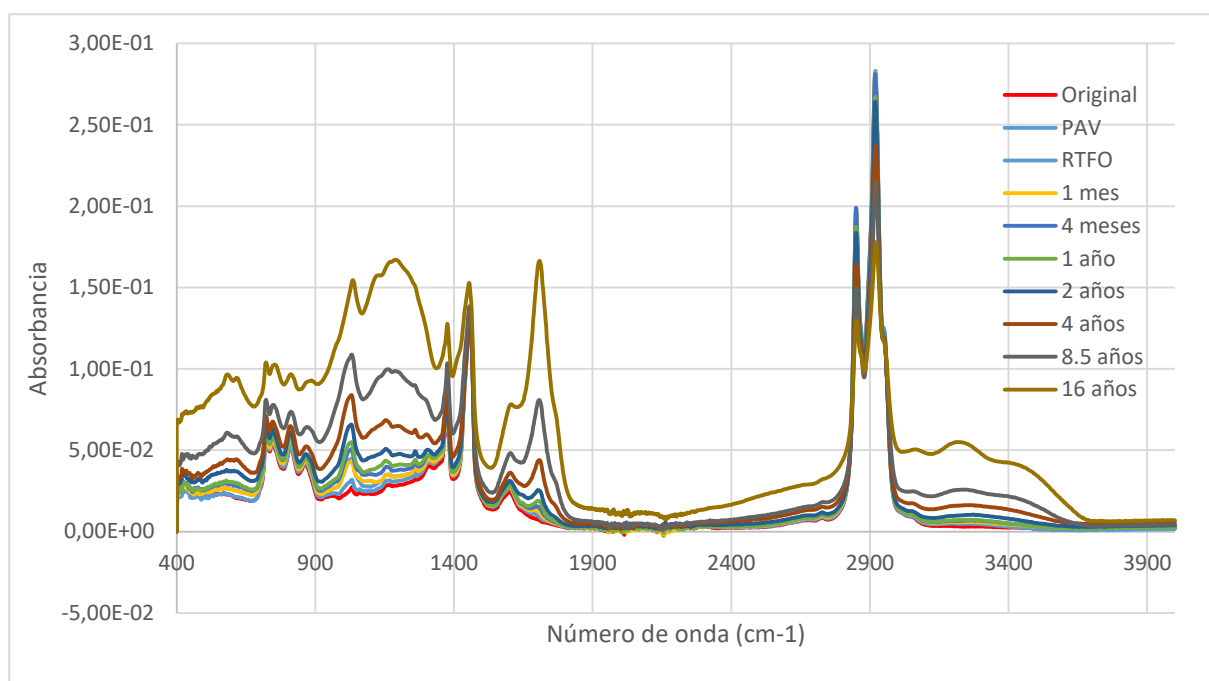


Figura 21. Comparación de espectros para el envejecimiento de radiación UV a temperatura ambiente, cara superior

A continuación (Figura 22) se muestra un acercamiento de los espectros dentro del rango de 3000 cm⁻¹ a los 3800 cm⁻¹ donde se encuentran los compuestos aromáticos (3050 cm⁻¹) y el grupo hidroxilo (3500cm⁻¹). Como se observa, los espectros se alinearon a una línea base para

una mejor comparación visual. A pesar de que se pueden apreciar los cambios directamente de las figuras, se debe cuantificar el cambio de alguna manera por lo que se procedió a determinar el área bajo la curva de los picos mediante el programa OMNIC Software, el mismo donde se obtienen los espectros. De esta cuantificación se obtuvieron figuras donde se muestra el área bajo la curva contra el tiempo de exposición. Se debe mencionar que el área medida tiene las unidades de absorbancia/cm y se presenta en las figuras como "área en absorbancia (A/cm)".

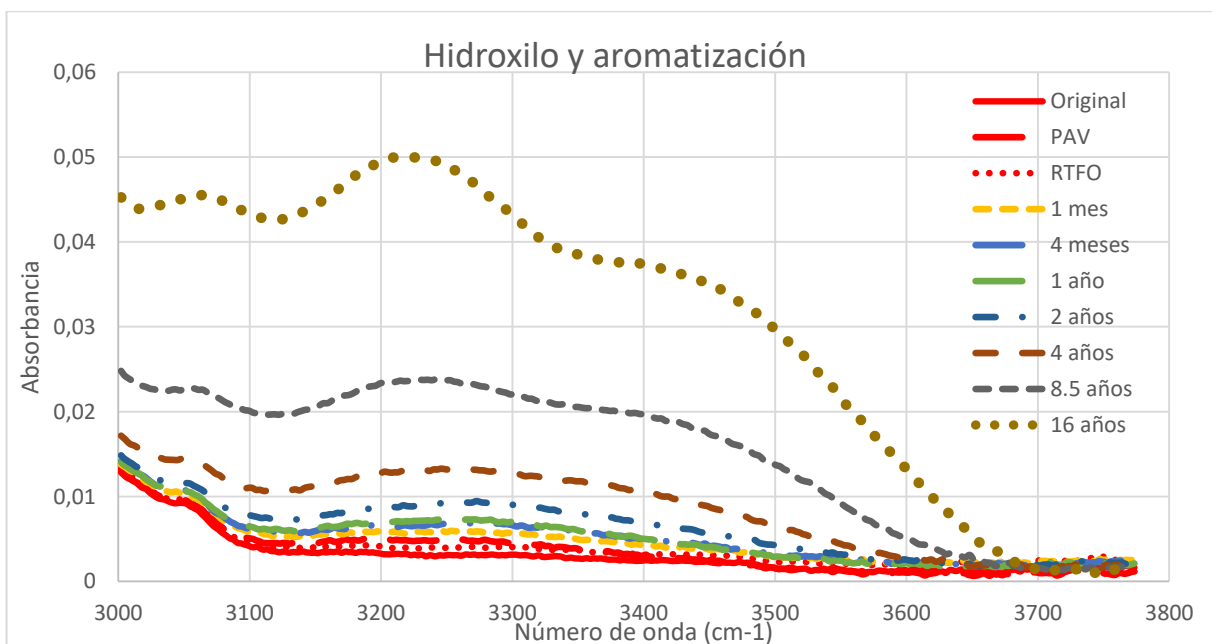


Figura 22. Espectros en el rango de los hidroxilos y compuestos aromáticos, bajo el tratamiento con radiación UV a temperatura ambiente, cara superior

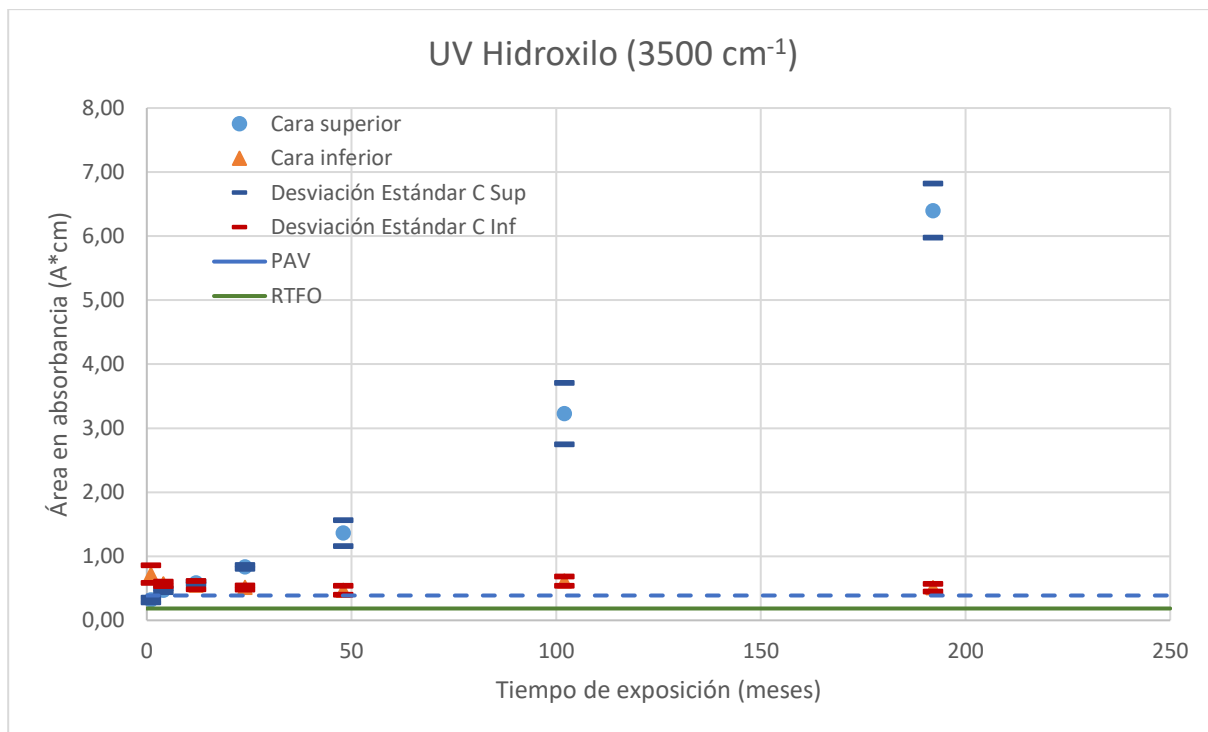


Figura 23. Cuantificación de área de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV para el compuesto hidroxilo en ambas caras de la muestra

Como se mencionó anteriormente en la Figura 23 y Figura 24 se muestra la cuantificación realizada para los grupos hidroxilo y aromáticos respectivamente. En estas figuras tal y como se establece en la simbología, los símbolos redondos y azules corresponden a las mediciones hechas en la parte superior de las muestras, mientras que los triángulos rojos corresponden a las inferiores. Se puede observar que cada dato tiene asociada su desviación estándar, dada por el hecho de que cada dato es el promedio de las tres mediciones realizadas. Por último se aclara que el tiempo de exposición mostrado en estas figuras corresponde al simulado por la cámara.

En el grupo hidroxilo se puede observar una tendencia muy clara, en donde las mediciones en la parte superior aumentan considerablemente con el tiempo de exposición. Se debe notar en la Figura 22 que la sección considerada desarrolla hacia la última medición dos crestas separadas, con lo cual se debe mencionar que en estas longitudes de onda se espera la aparición del hidroxilo, además de la posible formación de amidas o aminas. Al estar dentro de las mismas longitudes de onda se puede decir que el área obtenida y las dos crestas se pueden deber a que se comparte entre los grupos mencionados.

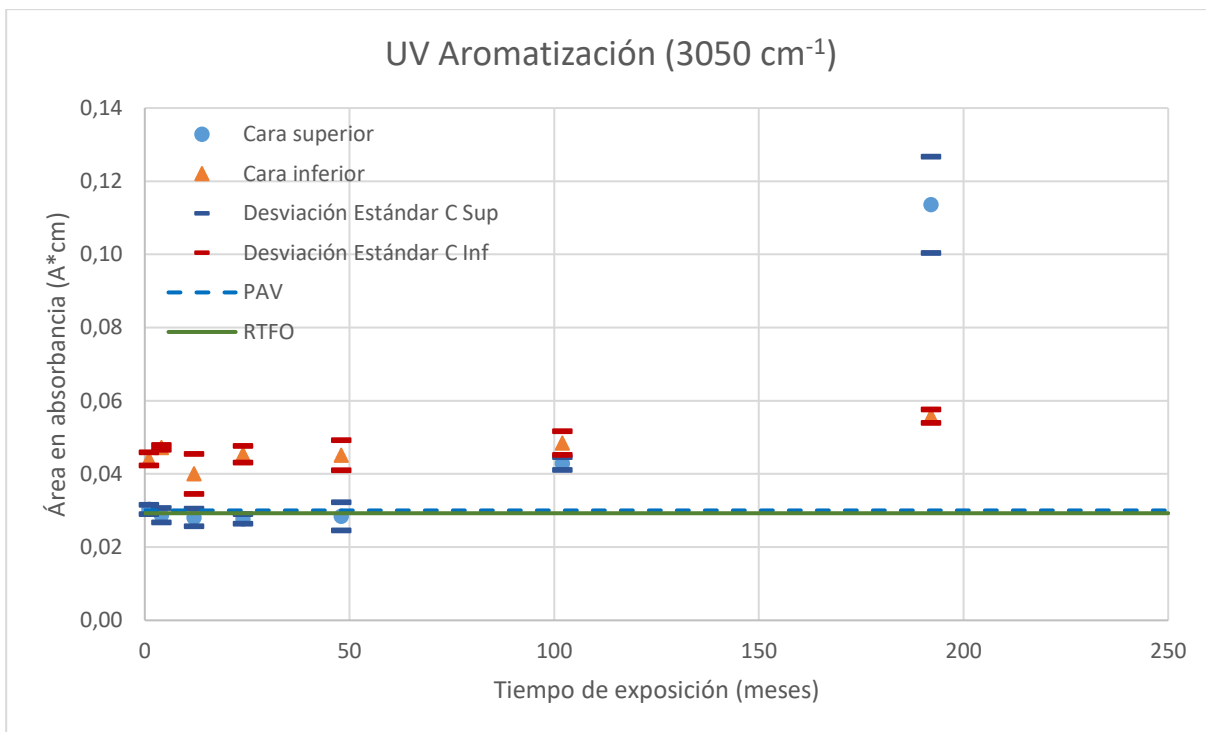


Figura 24. Cuantificación de área de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV para los compuestos aromáticos en ambas caras de la muestra

En cuanto a los compuestos aromáticos, se puede observar que inicialmente los valores de arriba y abajo son similares, aunque ligeramente mayores en la parte inferior. Sin embargo, hacia el final del tiempo de exposición hay un incremento en la cara superior. La diferencia inicial entre las caras superior e inferior se buscará justificar en la sección 5.2.4.

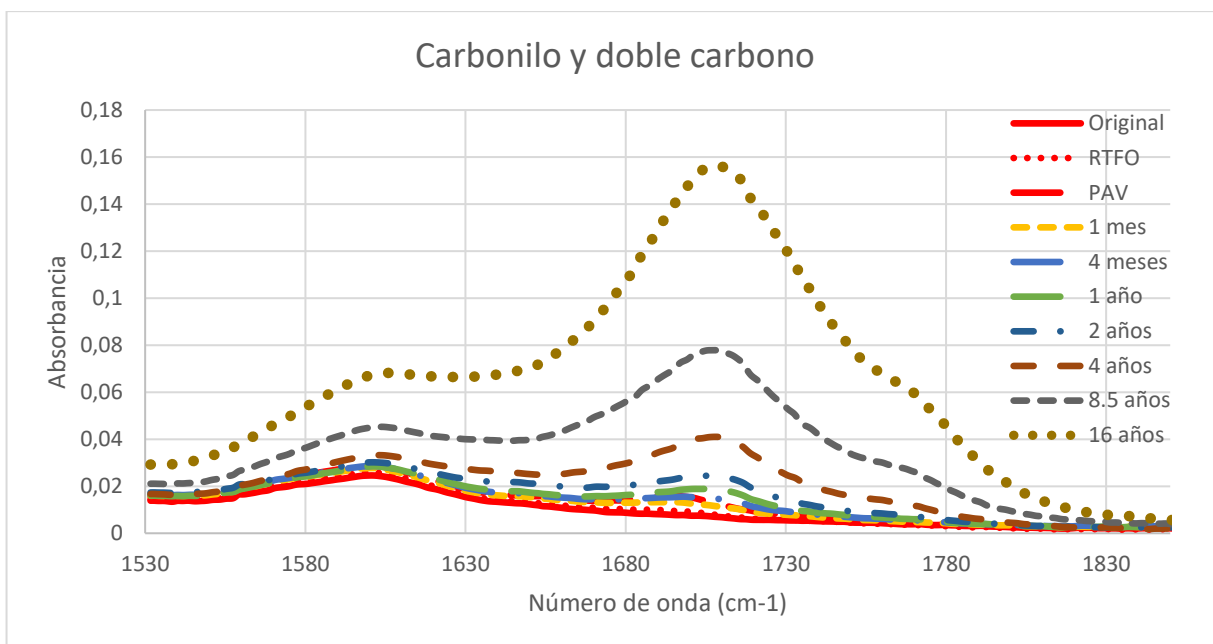


Figura 25. Espectros en el rango de los carbonilos y enlaces de doble carbono, bajo el tratamiento con radiación UV a temperatura ambiente, cara superior

Dentro del rango de 1530 cm^{-1} a 1830 cm^{-1} se encuentra la Figura 25 en la que se pueden encontrar los carbonilos entre 1650 cm^{-1} y 1800 cm^{-1} y los dobles enlaces de carbono alrededor de 1600 cm^{-1} . En esta figura comparativa de los espectros se puede ver un aumento en los dos grupos, donde el mayor incremento se da claramente en los carbonilos.

En la Figura 26 y Figura 27 se cuantifican nuevamente las áreas de los picos mostrados en los espectros anteriores. Como se puede observar, efectivamente existe un crecimiento grande en el grupo de carbonilos. Por su parte, en los enlaces de doble carbono no se observa un crecimiento en las mediciones de la parte superior de la muestra, lo cual puede deberse a un traslape de picos por la predominancia de los carbonilos. Además se observan valores mayores en el caso de las mediciones en la parte inferior, lo cual se intentará explicar posteriormente en la sección 5.2.4.

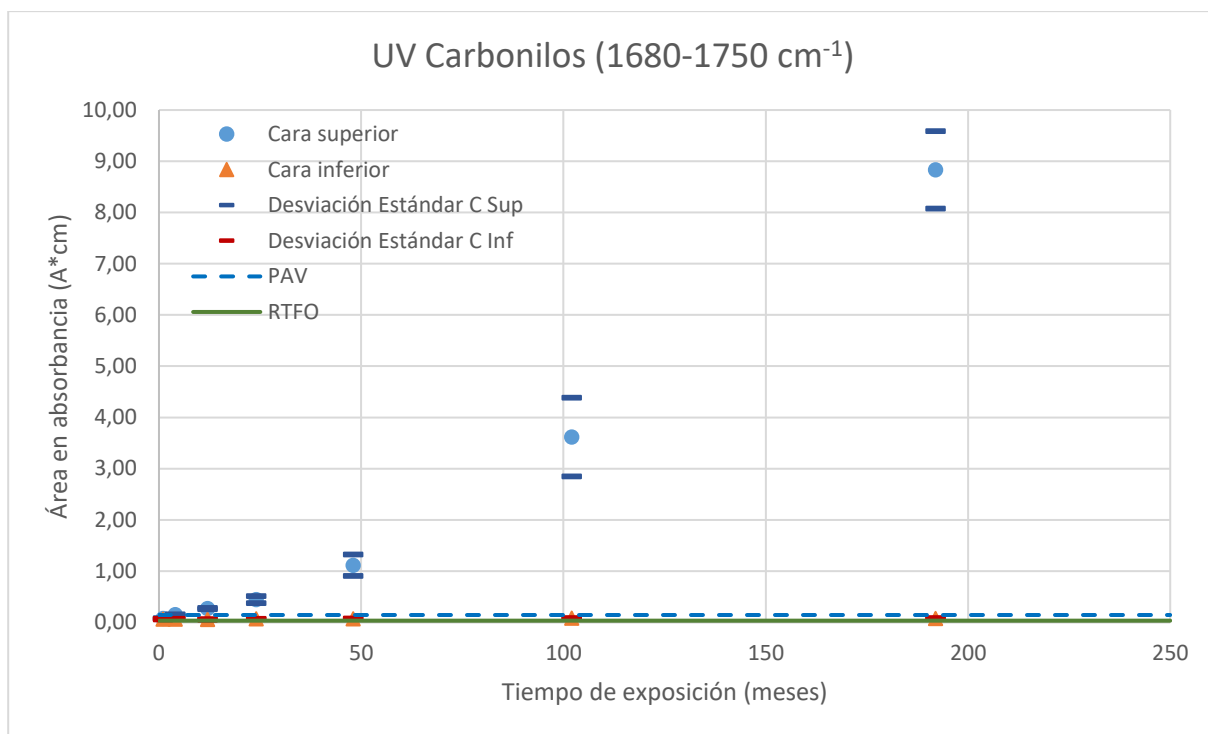


Figura 26. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV para el grupo carbonilo en ambas caras de la muestra

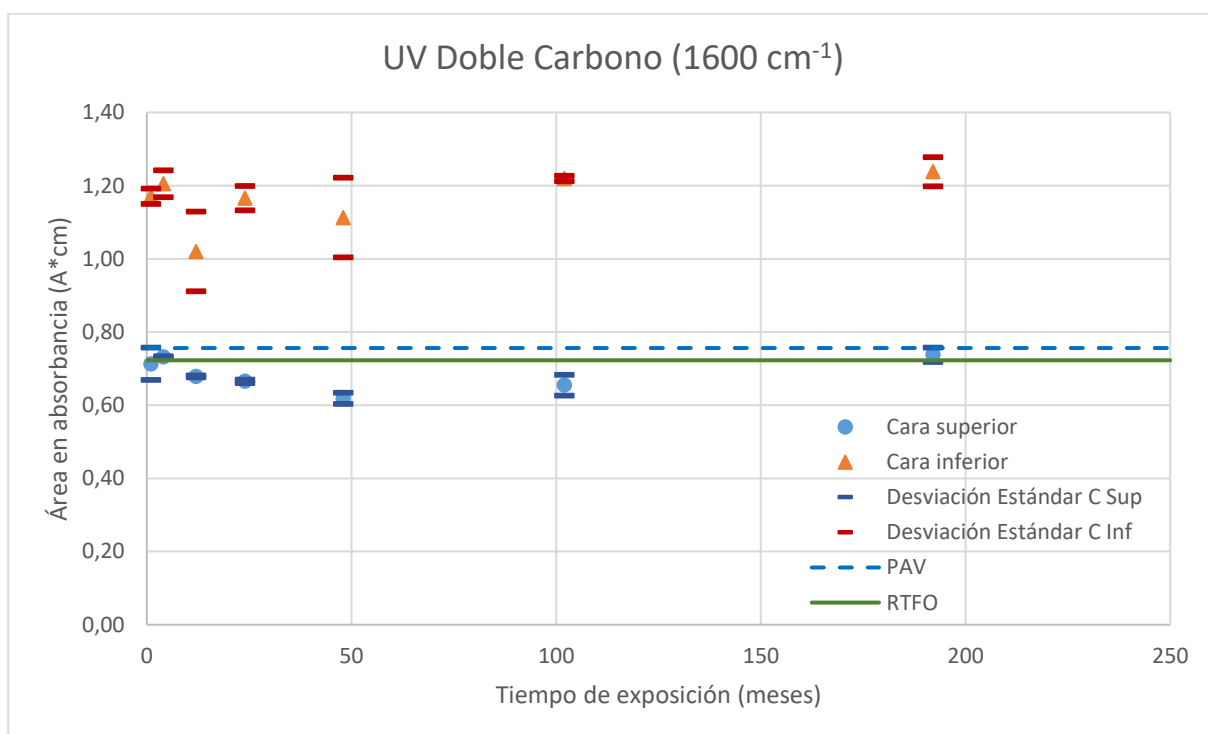


Figura 27. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV para los dobles enlaces de carbono en ambas caras de la muestra

Por último se estudia el rango alrededor de 1030 cm^{-1} , el cual corresponde a los sulfóxidos mayormente, con baja probabilidad de éteres. De nuevo se puede observar en la Figura 28 que hay un incremento considerable en el espectro.

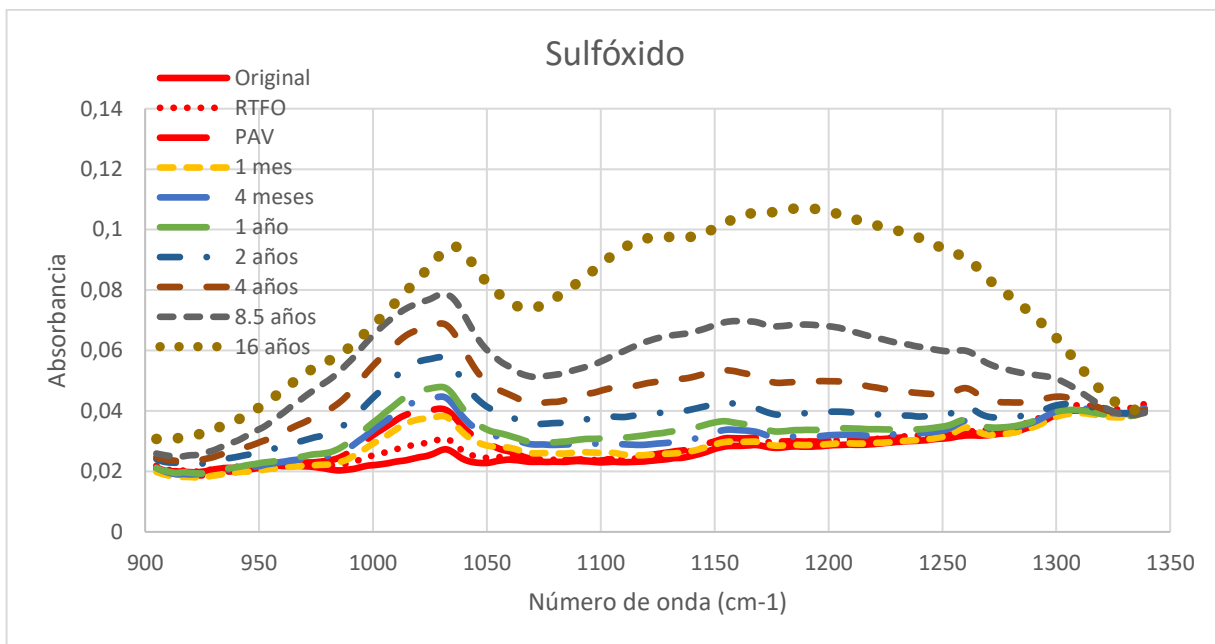


Figura 28. Espectros en el rango de los sulfóxidos, bajo el tratamiento con radiación UV a temperatura ambiente, cara superior

En la Figura 29 se puede observar la cuantificación de los sulfóxidos en donde de igual manera se aprecia un aumento, hasta el penúltimo tiempo de exposición, a partir del cual decrece. El hecho de que la concentración decrezca no es lo normal y no coincide a la valoración visual que se hizo anteriormente. Sin embargo, al ver de nuevo la Figura 28, se nota como en el rango de 1075 cm^{-1} a 1300 cm^{-1} (aproximadamente) se generó una gran área bajo la curva, lo cual afecta claramente la última medición. Se determina que efectivamente hay un incremento en el grupo de los sulfóxidos y que la medición anómala forma parte de las limitaciones del método utilizado.

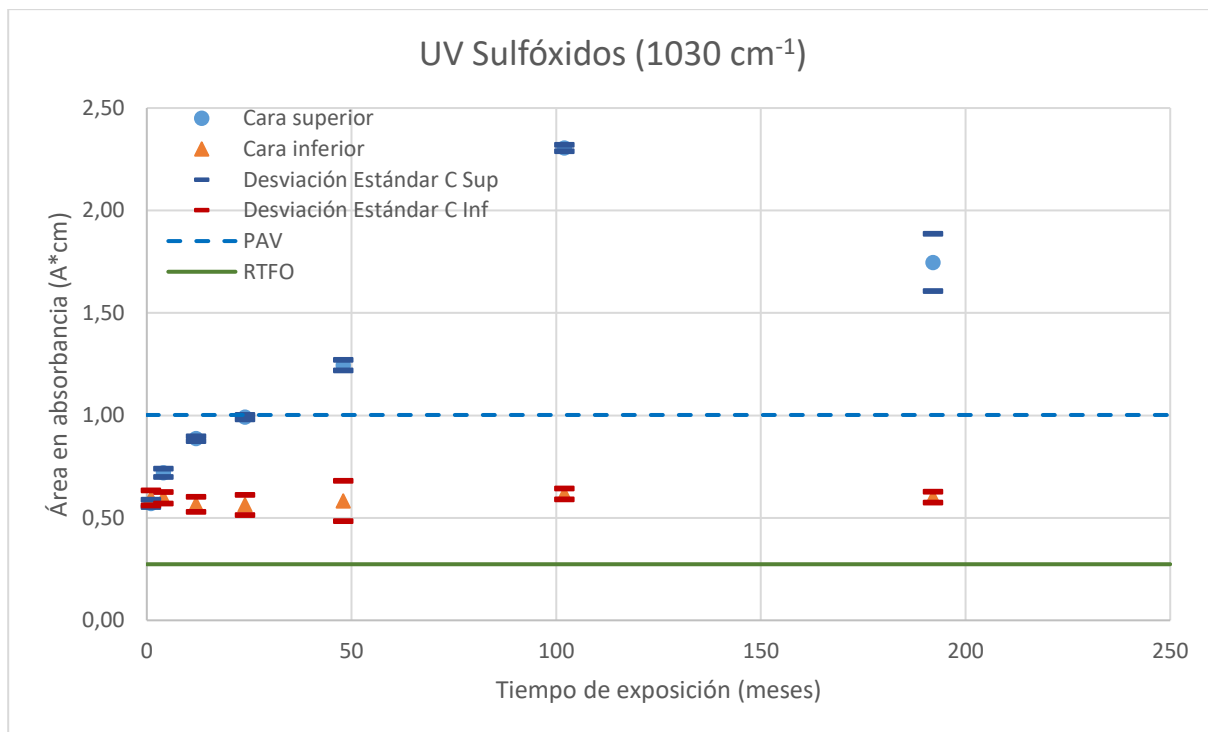


Figura 29. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV para el compuesto sulfóxido en ambas caras de la muestra

5.2.3 Radiación UV a temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Como se observó y cuantificó anteriormente, en la mayoría de los casos se obtuvo un aumento en los compuestos que indican envejecimiento u oxidación en el asfalto. A continuación, se hace la misma revisión para el segundo tratamiento que corresponde a la radiación UV con una temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. De igual manera en la Figura 30 se inicia con una comparación gráfica de los espectros original, RTFO, PAV y todos los tiempos de exposición, para las mediciones en la parte superior de las muestras. Al observar las diferencias, se nota de manera preliminar que hay un incremento en ciertas bandas, sin embargo no es tan evidente como en el caso anterior. Estos cambios se estudian y cuantifican a continuación para una comparación entre los tratamientos.

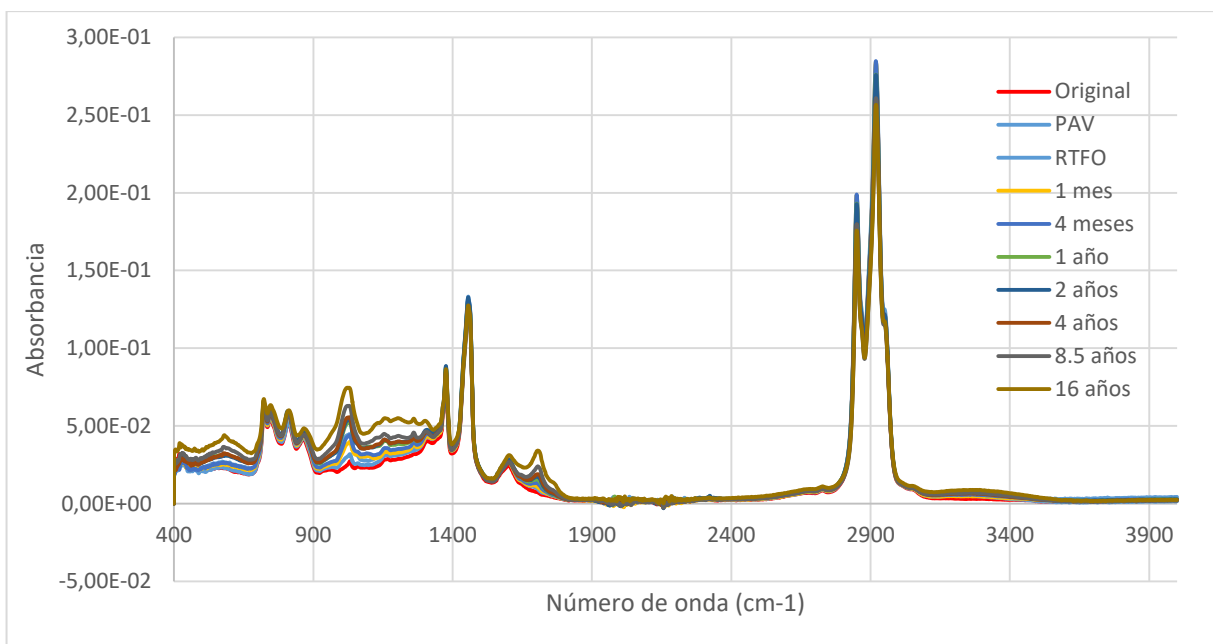


Figura 30. Comparación de espectros para el envejecimiento de radiación UV y temperatura de 60 °C, cara superior

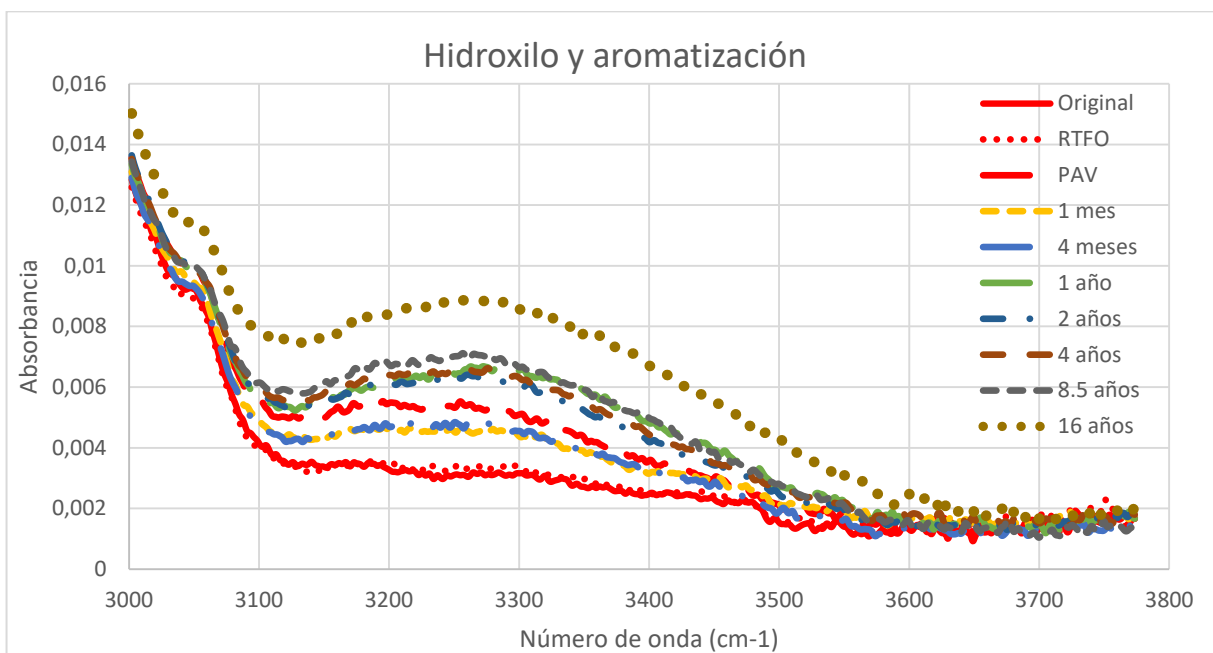


Figura 31. Espectros en el rango de los hidroxilos y compuestos aromáticos, bajo el tratamiento con radiación UV y temperatura de 60 °C, cara superior

En la Figura 31 se observan los espectros dentro del rango donde se encuentran los hidroxilos y los compuestos aromáticos. En este caso se observa un aumento en los hidroxilos mas no en los aromáticos, se espera observar estas tendencias en las siguientes figuras.

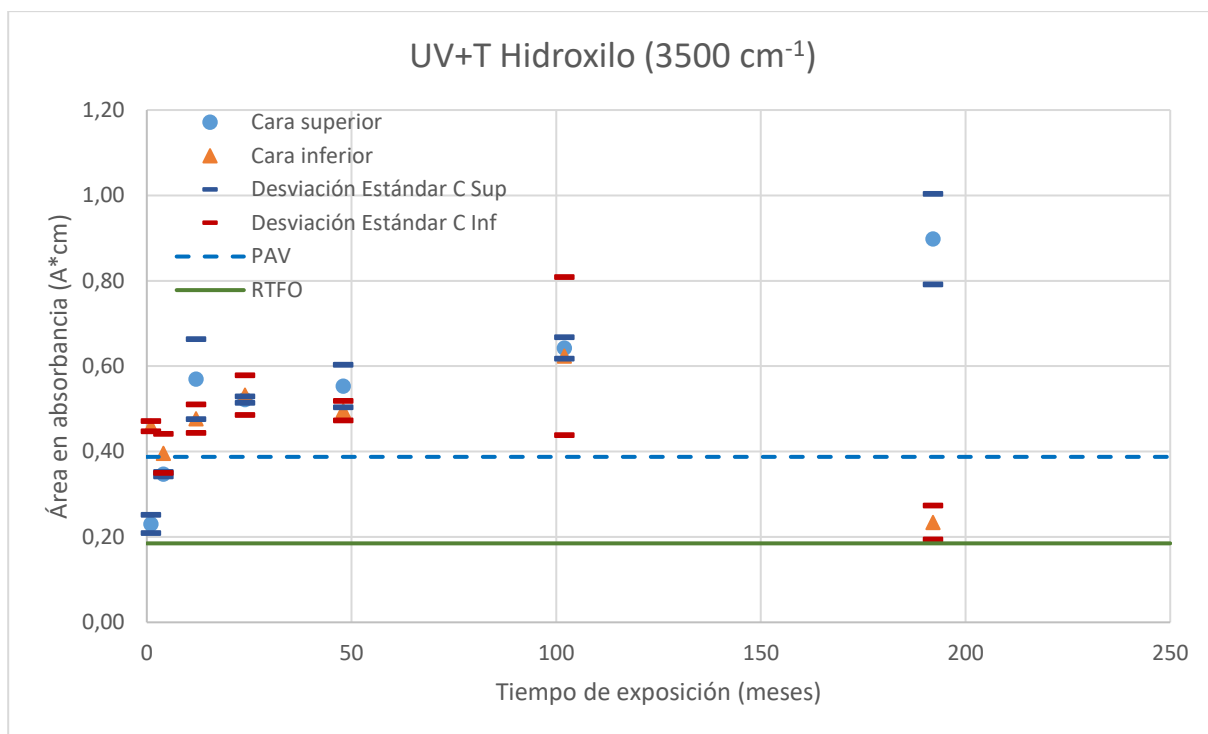


Figura 32. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV y temperatura de 60 °C para el compuesto hidroxilo en ambas caras de la muestra

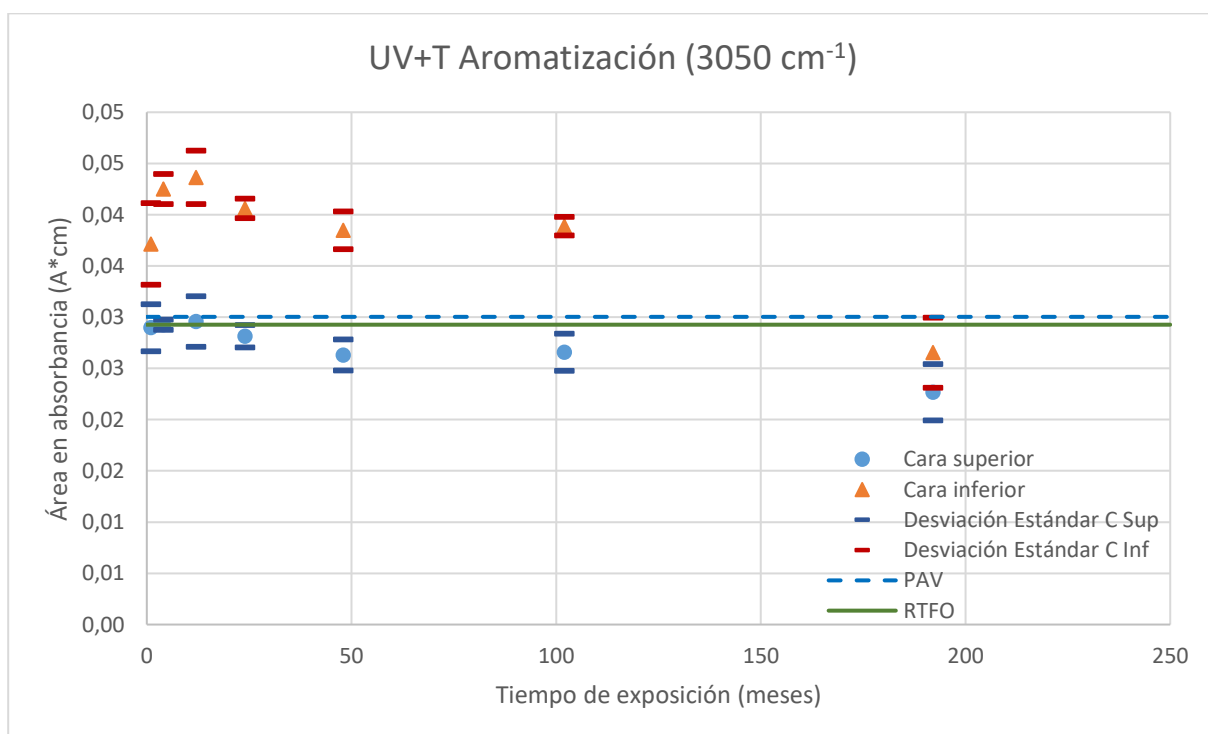


Figura 33. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV y temperatura para los compuestos aromáticos en ambas caras de la muestra

La cuantificación de los hidroxilos y los aromáticos se observa en la Figura 32 y Figura 33, como se esperaba se observa un aumento en la concentración de los hidroxilos en la superficie superior, mientras que en la cara inferior se obtiene un comportamiento relativamente constante. Por su parte los compuestos aromáticos en ambas caras muestran un comportamiento prácticamente invariable, con el cual no se puede concluir que exista un cambio significativo. Como ocurrió anteriormente, los valores de la superficie inferior no expuesta son superiores a los de la expuesta, lo cual tiene una explicación que se puede encontrar en la sección 5.2.4.

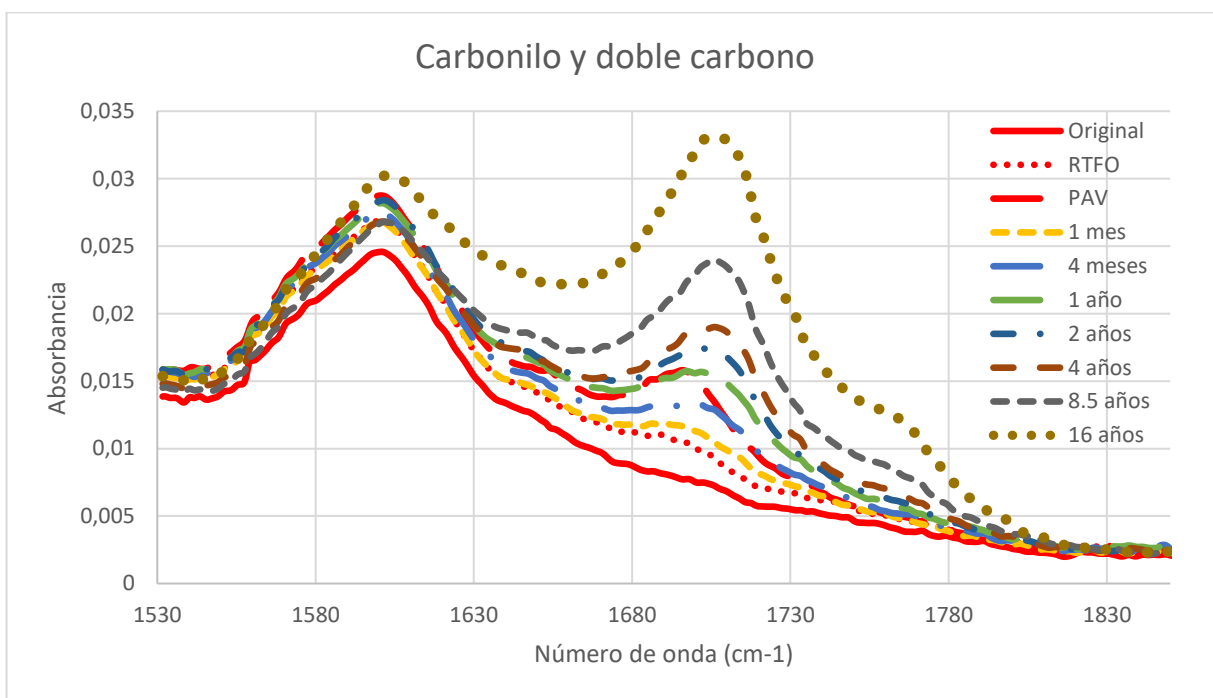


Figura 34. Espectros en el rango de los carbonilos y enlaces de doble carbono, bajo el tratamiento con radiación UV y temperatura de 60 °C, cara superior

Continuando con el segundo tratamiento propuesto se puede observar el efecto en los carbonilos y en los dobles enlaces de carbono en los espectros de la Figura 34. Al ver los resultados registrados se observa un incremento notable de los carbonilos conforme aumenta el tiempo de exposición. Caso distinto se observa gráficamente en los dobles enlaces, donde no se observa mayor cambio. Seguidamente se puede identificar el reflejo de lo observado en las cuantificaciones de la Figura 35 y Figura 36, donde los carbonilos muestran una tendencia creciente en su cara superior y donde los dobles enlaces de carbono no presentan cambios considerables. De igual manera se debe revisar la sección 5.2.4 para entender el cambio que se presenta entre las caras de la muestra en el caso de los dobles enlaces de carbono.

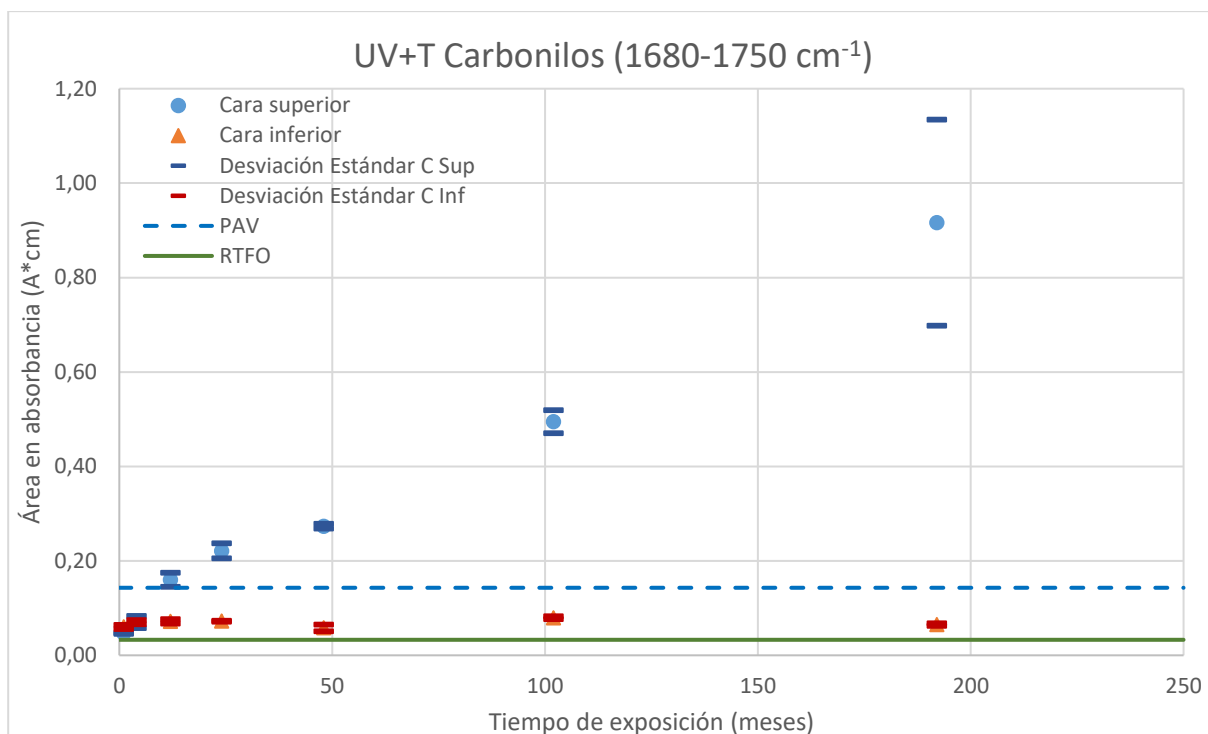


Figura 35. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV y temperatura para el grupo carbonilo en ambas caras de la muestra

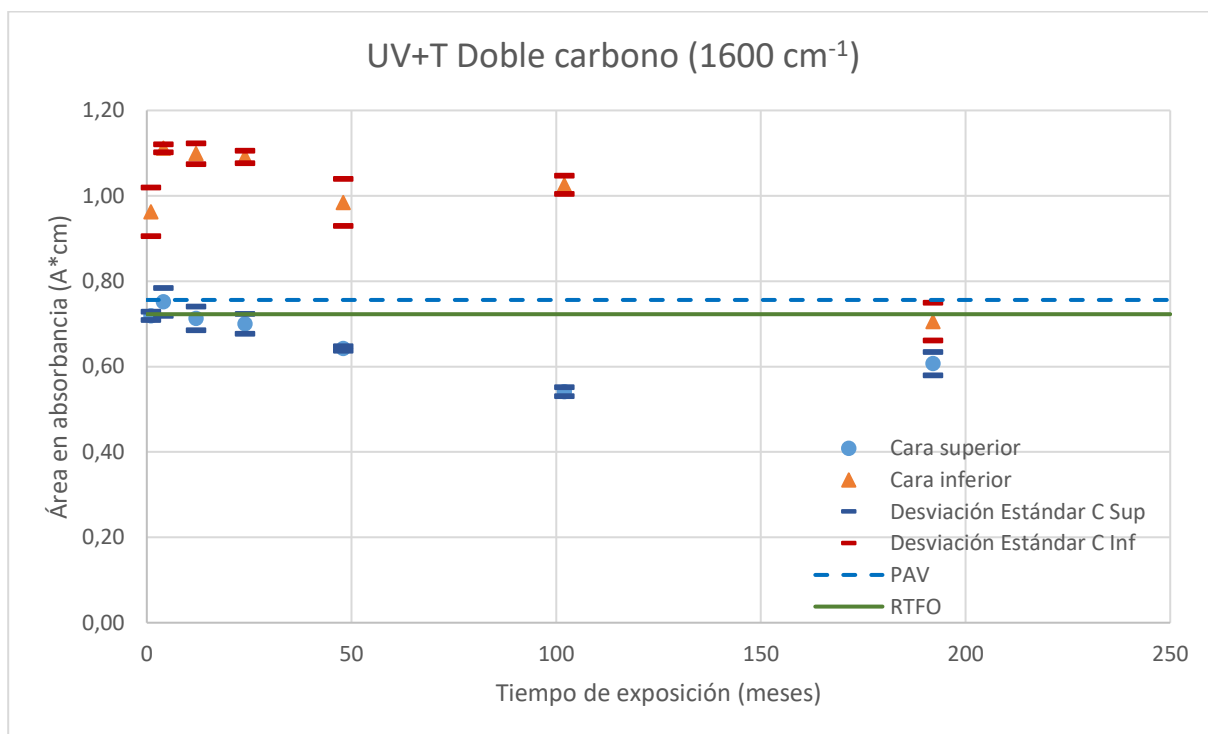


Figura 36. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV y temperatura para los dobles enlaces de carbono en ambas caras de la muestra

Por último se estudian los sulfóxidos nuevamente alrededor de los 1030 cm^{-1} y donde se observa un incremento en los espectros de la Figura 37. De la misma forma, en la Figura 38 se corrobora lo anterior al ver el aumento de la concentración de este grupo en la parte expuesta de la muestra.

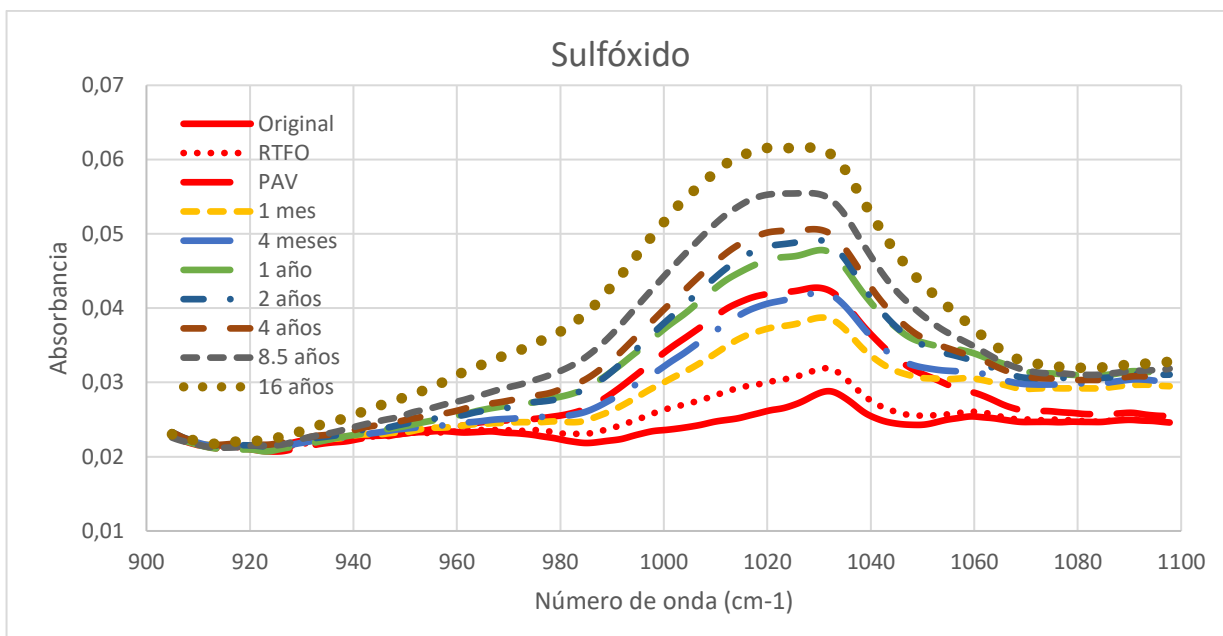


Figura 37. Espectros en el rango de los sulfóxidos, bajo el tratamiento con radiación UV y temperatura de 60 °C, cara superior

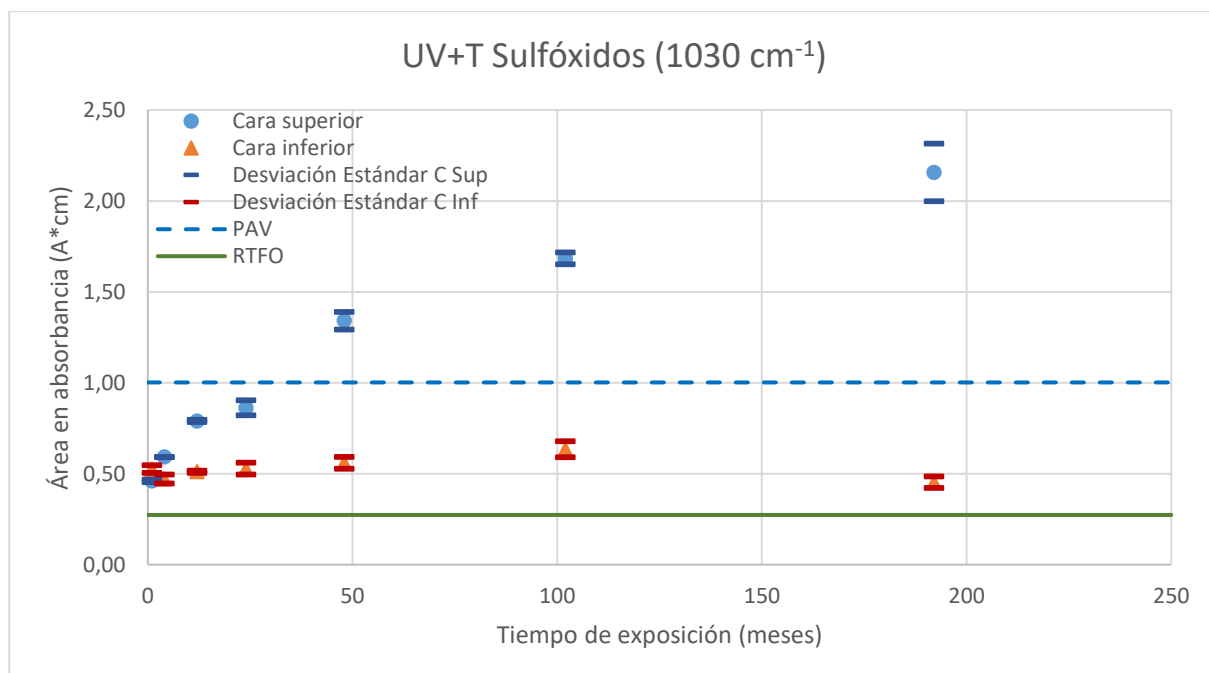


Figura 38. Cuantificación de absorbancia según el tiempo de exposición a radiación UV y temperatura para el compuesto sulfóxido en ambas caras de la muestra

5.2.4 Muestra de control

Como se observó anteriormente, en los grupos de dobles enlaces de carbono y los aromáticos se presenta la situación de que se llega a medir mayores concentraciones en la parte no expuesta. Al considerar que esta situación no es lógica y que posiblemente no haya sido por efecto de la radiación, se procedió a hacer mediciones en las muestras de control. Estas únicamente fueron calentadas para distribuir las en los moldes de silicón, es decir que corresponden a la condición de la muestra justo antes de someterla al proceso del horno UV. Además, se resalta el hecho de que las muestras de control fueron almacenadas durante aproximadamente 6 meses en esos moldes, antes de realizar la medición. Se realizaron las mediciones y se registraron en los siguientes cuadros.

Cuadro 11. Comparación en la concentración del grupo de doble carbono en ambas superficies de la muestra de control

Doble carbono	Rango de medición (cm^{-1})		Medición				Promedio	Diferencia (%)
			1	2	3	4		
Cara superior	1645.9	1538.4	0.596	0.605	0.628	0.613	0.610	58.0
Cara inferior	1645.9	1538.4	0.919	0.948	1.025	0.966	0.964	

Cuadro 12. Comparación en la concentración del grupo de aromáticos en ambas superficies de la muestra de control

Aromáticos	Rango de medición (cm^{-1})		Medición				Promedio	Diferencia (%)
			1	2	3	4		
Cara superior	3084.6	3029.6	0.0320	0.0319	0.0293	0.0317	0.0312	47.4
Cara inferior	3084.6	3027.2	0.0422	0.0494	0.0455	0.0469	0.0460	

Como se puede evidenciar en los cuadros anteriores, se registró el rango de medición y se registraron cuatro datos por cada superficie. Seguidamente se obtuvo el promedio y se calculó el porcentaje de diferencia entre los valores. Como se observa, el aumento obtenido en la superficie no expuesta en ambos casos ronda un 50 %. El incremento es considerable y al tratarse de la muestra de control, no se le puede atribuir al proceso de radiación.

Posteriormente se realizaron unas pruebas adicionales para tratar de identificar la causa del comportamiento de las muestras. Como posibles causas se consideran el proceso de confección

de la muestra y la interacción entre el molde y el asfalto. Al considerar como causa el proceso de elaboración de la muestra, se encuentra que es poco probable debido a que la muestra se calienta por periodos cortos de tiempo a 130 °C en los cuales no se debe presentar mayor oxidación. Para respaldar esto se considera el estudio del LanammeUCR en donde se someten muestras de asfalto a procesos de calentamiento a 135 °C a 2, 3 y 4 horas de exposición. Los resultados del estudio, muestran que no existe mayor oxidación debida al proceso mencionado.

De esta forma se llega a la conclusión de que debe existir alguna interacción entre el asfalto y el silicón de los moldes. A pesar de que esto es lo que indican las mediciones realizadas, se deben realizar a futuro pruebas para ver si existe esta interacción y que factores influyen.

5.2.5 Comparación de tratamientos

Una vez que se estudiaron los tratamientos por separado, es necesario compararlos para ver en qué medida afecta el cambio de temperatura entre ellas. Se hará la comparación en este caso únicamente con los resultados de la parte expuesta ya que como se vio anteriormente es la que experimenta cambios realmente considerables.

Inicialmente se comparan los resultados del grupo hidroxilo en la Figura 39, donde se pueden ver ambas tendencias crecientes tal y como se vio anteriormente. A pesar de esto, es muy notorio que la concentración del compuesto en el caso de radiación UV a temperatura ambiente es superior. Se puede observar que en el último dato registrado hay una diferencia aproximada de hasta 6 veces.

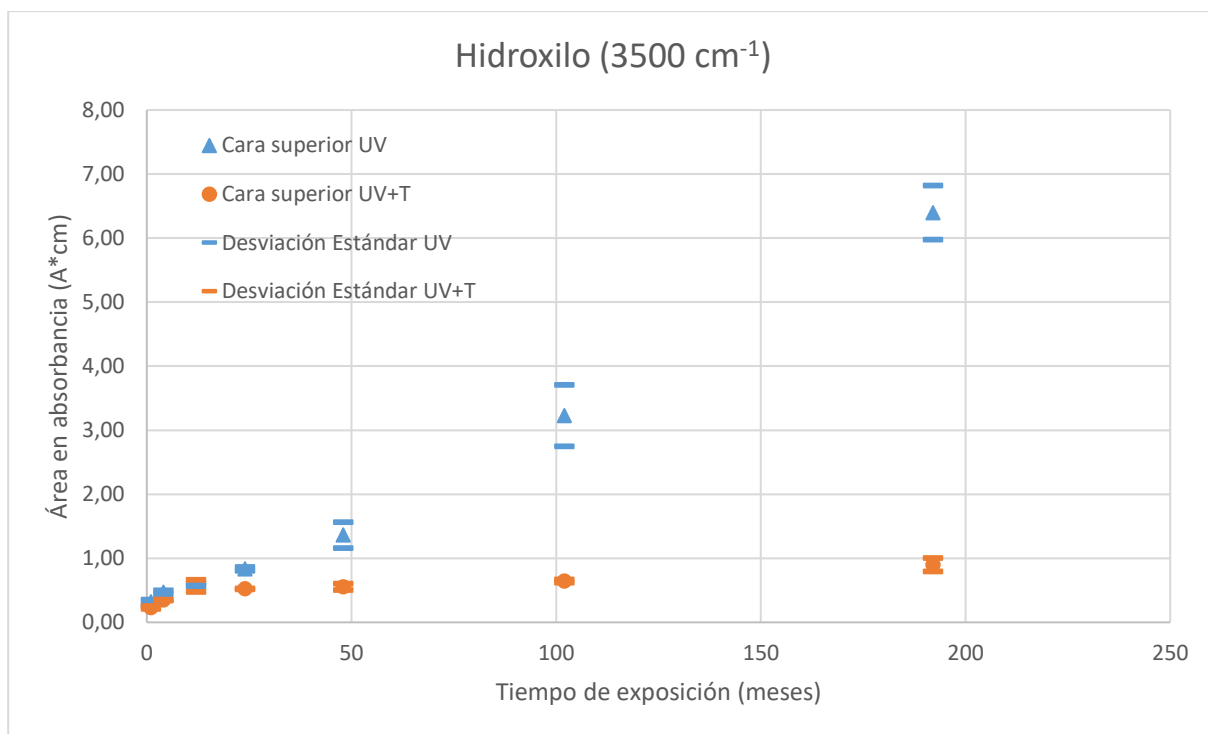


Figura 39. Comparación de ambos tratamientos implementados para el grupo hidroxilo en la cara superior de las muestras

Seguidamente (Figura 40) se observan los resultados en el caso de los compuestos aromáticos, se observa que inicialmente se obtienen valores prácticamente iguales y es hasta el penúltimo tiempo de exposición (218 horas correspondientes a 8,5 años de servicio) que se obtiene una diferencia en la cual se nota un incremento en la concentración de compuestos aromáticos en las muestras de radiación UV a temperatura ambiente.

En el caso de los carbonilos observados en la Figura 41, se observa un comportamiento similar al de los hidroxilos donde los dos presentan un incremento. Sin embargo, en el caso de radiación UV a temperatura ambiente, el incremento es mucho mayor. Se observan resultados hasta 9 veces mayores en el primer tratamiento, esto para la última medición.

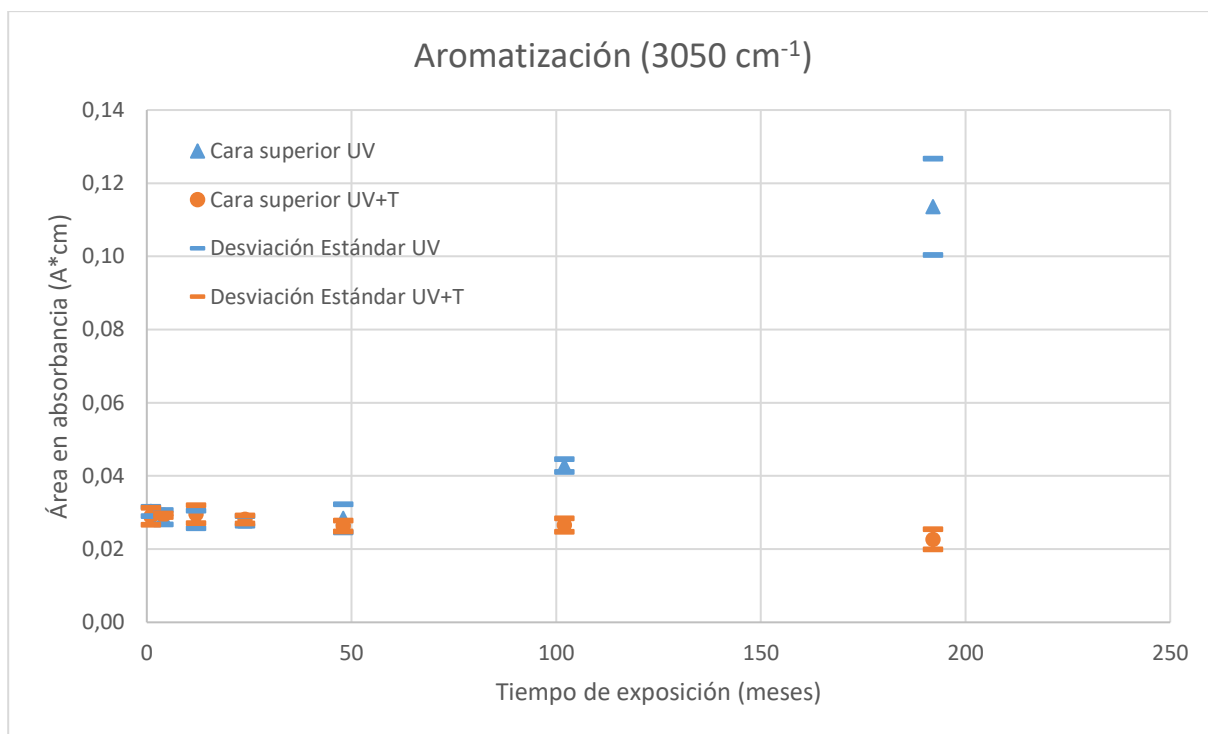


Figura 40. Comparación de ambos tratamientos implementados para los compuestos aromáticos en la cara superior de las muestras

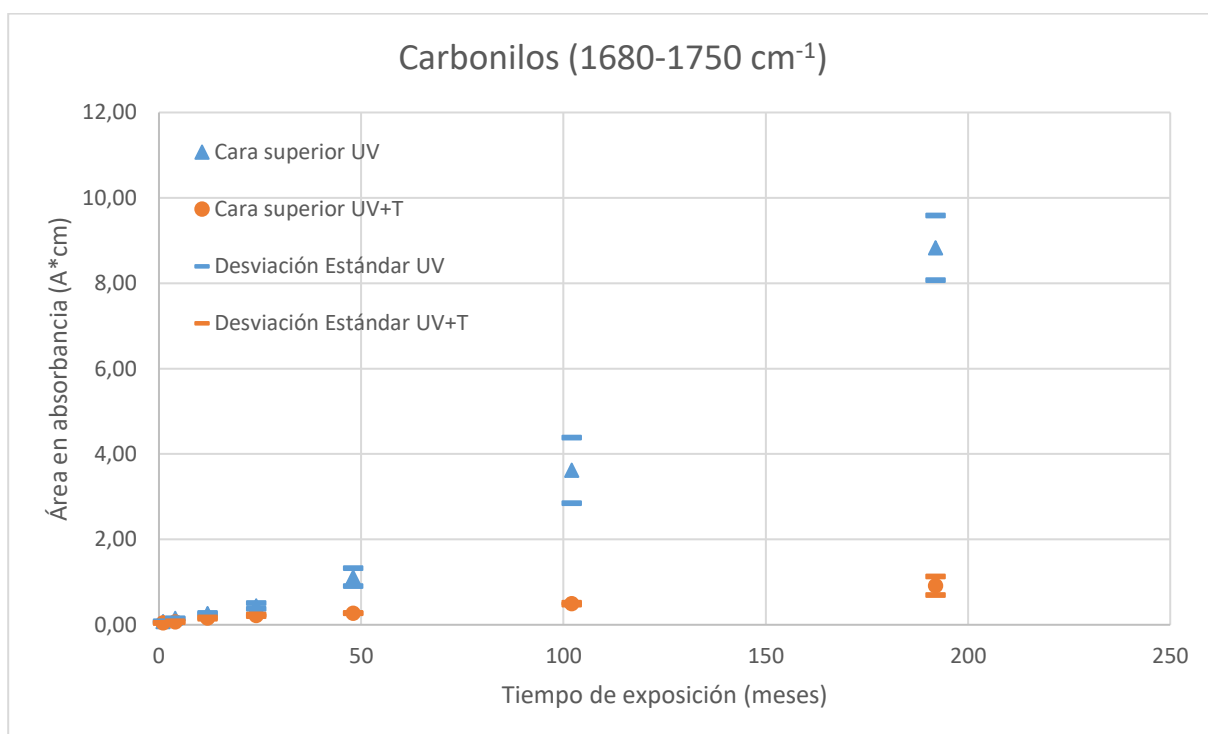


Figura 41. Comparación de ambos tratamientos implementados para los carbonilos en la cara superior de las muestras

Por su parte la comparación en el grupo de dobles enlaces de carbono, se puede ver en la Figura 42 que los comportamientos y magnitudes son muy similares en ambos casos y las diferencias se consideran bajas dentro de los rangos que se manejan.

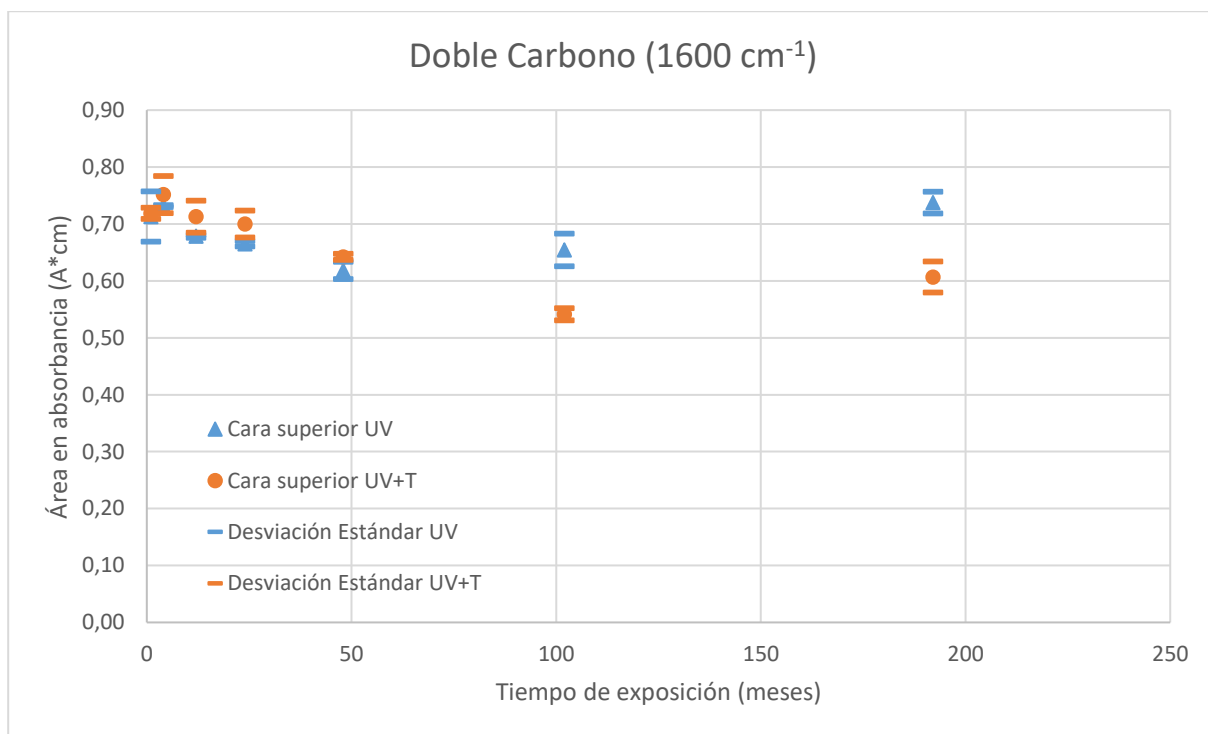


Figura 42. Comparación de ambos tratamientos implementados para los dobles enlaces de carbono en la cara superior de las muestras

Finalmente, los sulfóxidos se observan en la Figura 43 donde se observan de nuevo tendencias similares hasta las dos últimas mediciones donde en la penúltima se observa un valor mayor en el tratamiento a temperatura ambiente y en la última se revierte por el traslape de picos antes comentado. Se puede deducir que la concentración sin la limitante del traslape sería igual o superior a la presentada por el tratamiento de 60 °C.

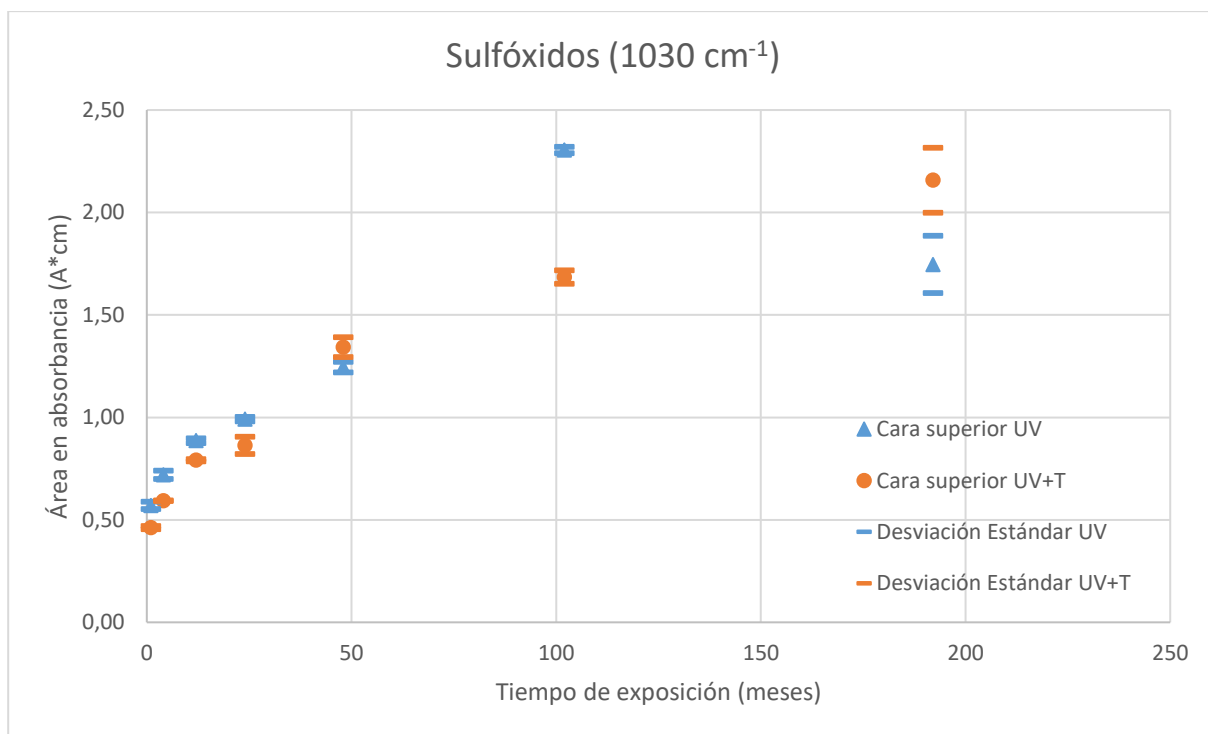


Figura 43. Comparación de ambos tratamientos implementados para los sulfóxidos en la cara superior de las muestras

En el Cuadro 13 y Cuadro 14 se muestra una comparación porcentual entre los dos tratamientos empleados, en los cuales se cuantifica lo observado anteriormente. En ambos casos la referencia es el valor del envejecimiento mediante UV y temperatura de 60 °C. Por esto un valor positivo significa que el de temperatura ambiente es mayor que el de 60 °C y uno negativo significa lo opuesto.

Cuadro 13. Comparación porcentual de la concentración de grupos químicos del tratamiento de UV a temperatura ambiente con el tratamiento de UV a 60°C en la superficie expuesta

	Comparación de tratamientos (%)						
	1 mes	4 meses	1 año	2 años	4 años	8.5 años	16 años
Hidroxilo	37.9	34.9	2.6	59.6	146.0	402.3	612.9
Aromatización	4.6	-1.9	-5.0	-1.5	8.1	61.4	401.0
Carbonilos	61.4	109.3	66.2	100.4	307.6	631.7	863.9
Doble carbono	-0.8	-2.7	-4.9	-5.0	-3.7	20.9	21.5
Sulfóxidos	23.6	21.3	12.0	14.9	-7.3	36.8	-19.1

A pesar de que las tendencias ya se estudiaron anteriormente a través de las figuras, es importante cuantificar las diferencias para obtener datos comparables. Iniciando con el Cuadro 13, se estudian las diferencias entre los dos tratamientos en la superficie expuesta. En términos generales se puede observar que los valores del tratamiento de UV a temperatura ambiente generan valores mayores. Se puede observar que en grupos como el hidroxilo y los carbonilos hay diferencias que se van ampliando conforme aumenta el tiempo de exposición, llegando a diferencias porcentuales de aproximadamente 600 % y 850 % respectivamente. Por su parte los compuestos aromáticos siguen una tendencia similar al inicio y se separan a partir de los 4 años. Los otros dos grupos tanto los dobles enlaces de carbono y los sulfóxidos poseen porcentajes de error bajos por lo que mantienen tendencias similares como se observó anteriormente.

Cuadro 14. Comparación porcentual de la concentración de grupos químicos del tratamiento de UV a temperatura ambiente con el tratamiento de UV a 60°C en la superficie no expuesta

	Comparación de tratamientos (%)						
	1 mes	4 meses	1 año	2 años	4 años	8.5 años	16 años
Hidroxilo	57.0	44.0	15.2	-3.5	-5.2	-1.9	117.3
Aromatización	18.8	11.1	-8.3	11.8	17.2	24.6	110.3
Carbonilos	2.5	-9.9	-24.5	-8.7	18.1	-1.7	16.1
Doble carbono	21.7	8.4	-7.2	6.9	13.0	18.9	75.5
Sulfóxidos	13.5	26.7	10.6	6.5	3.8	-2.8	32.2

Por otro lado se tiene en el Cuadro 14 la comparación para la superficie no expuesta. Donde se observan variaciones porcentuales bajas en la mayoría de los casos y no se pueden reconocer tendencias claras. Existen casos de porcentajes de error altos que se pueden deber a la variabilidad inherente de las mediciones y al posible grado de interacción entre la muestra y el molde. Es por esta razón que los datos obtenidos en la parte inferior de las muestras no son confiables.

5.2.6 Propuesta de índices

Como se observó e indicó anteriormente, uno de los problemas asociados al uso del área en absorbancia es el traslape de picos que impide en algunos casos observar las tendencias reales. A pesar de que la mejor solución para este problema es el uso de herramientas de cómputo especializadas que separen y calculen el área de las curvas, no siempre se cuenta con este

recurso. Por esta razón, se incluye a continuación dos propuestas de índice que además de considerar el área, consideran el cambio en la altura del pico.

$$\text{Índice 1} = \text{Área}(t) * \frac{\text{Pico}(t)}{\text{Pico orig}}$$

$$\text{Índice 2} = \text{Área}(t) * (\text{Pico}(t) - \text{Pico orig})$$

Las variables utilizadas son el área en absorbancia, el valor del pico (absorbancia) en un tiempo de exposición t y el valor del pico en la condición original. En la Figura 44 se observa el uso del índice de área que fue el que se usó en todas las mediciones y su comparación con el uso de los índices propuestos. En el caso del área se obtiene una tendencia decreciente y después creciente, lo cual discrepa con lo observado en los cambios de los espectros. Por su parte en los dos índices propuestos se puede observar cómo se obtienen tendencias crecientes más apegadas a las mediciones. Es por esto que se recomienda en caso de no tener programas especializados, el uso de estos índices o similares.

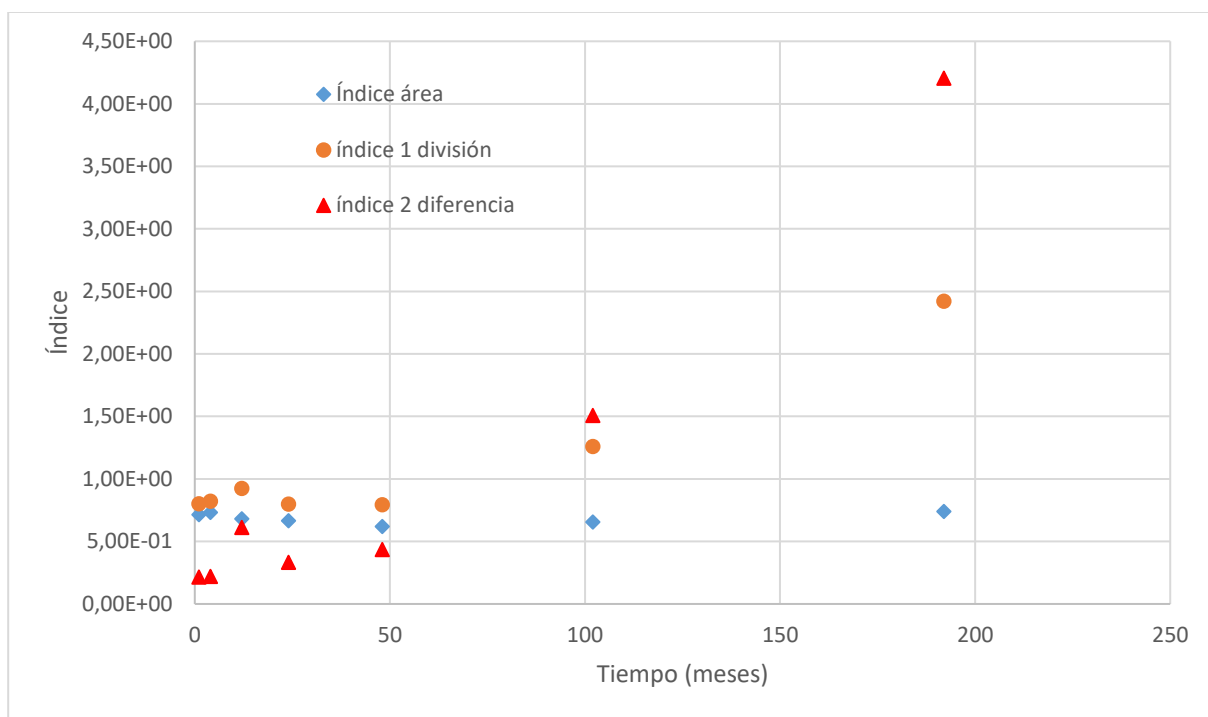


Figura 44. Comparación de tendencias de índices según los valores obtenidos para el grupo de dobles enlaces de carbono en la muestra envejecida a radiación UV a temperatura ambiente

5.3 Propiedades Mecánicas

5.3.1 Barrido de frecuencia y temperatura

El ensayo de barrido de frecuencia y temperatura se llevó a cabo como se indicó anteriormente a temperaturas de 5°C, 15°C y 25°C y a frecuencias en el rango de 0.1 rad/s a 100 rad/s. Los barridos se realizaron con muestras homogenizadas y para cada tratamiento se realizó un mínimo de dos repeticiones los cuales se promediaron para su uso. Una vez obtenidos los barridos, los datos se ajustaron según el método CAS de Arrhenius en una curva maestra, con el objetivo de tener una única curva por tratamiento y así facilitar su comparación.

A continuación se presentan dos figuras donde se muestran las curvas maestras de los dos tratamientos propuestos. En la Figura 45 se muestran las curvas del tratamiento de UV a temperatura ambiente. En esta se pueden observar todos los tiempos de exposición y destaca el hecho de que siguen un comportamiento muy similar entre ellos. Como se muestra en la figura, no se puede distinguir alguna tendencia relacionada al tiempo de exposición por lo que no se puede afirmar que haya cambios significativos en la afectación de la frecuencia y temperatura en el módulo dinámico del material.

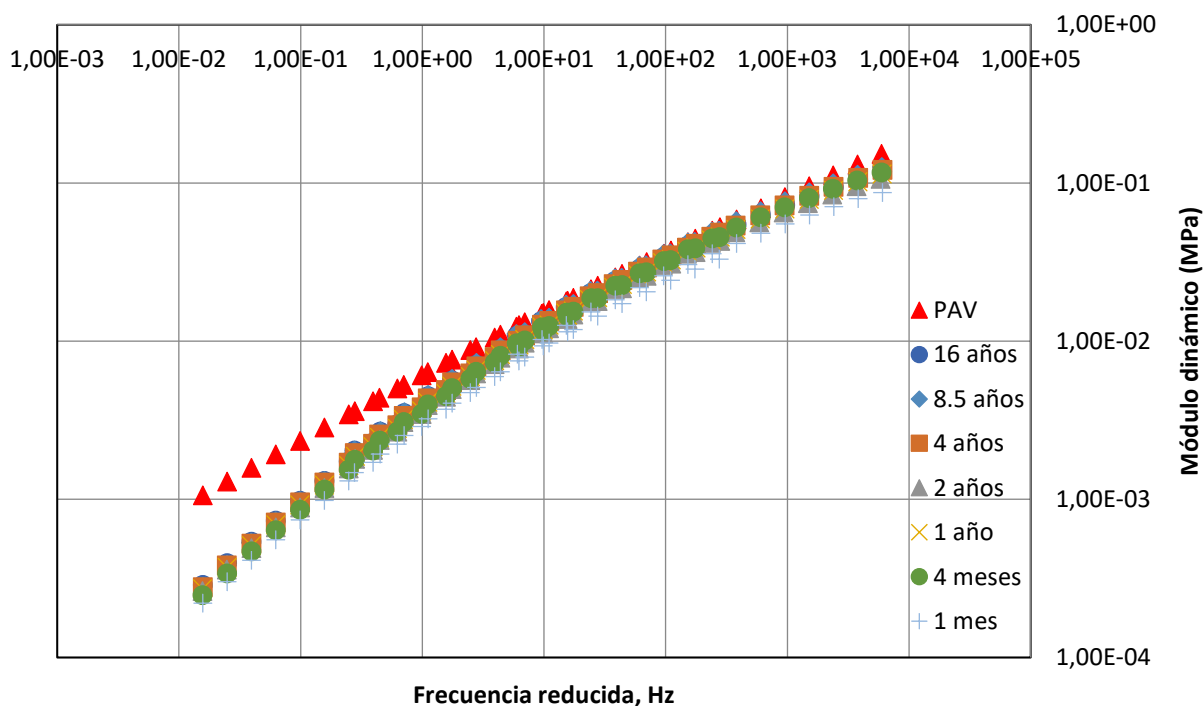


Figura 45. Curvas maestras para los tiempos de exposición del tratamiento de radiación UV a temperatura ambiente

Por su parte, en la Figura 46 **Figura 48** se muestran las curvas del tratamiento de radiación a 60°C. En este se muestran de igual manera todos los tiempos de exposición y se observa comparativamente con la figura anterior, que las curvas tienen una leve diferencia. Como se observa, la curva de los 16 años sobresale en la parte superior lo que indica un aumento en la rigidez. Observando detenidamente, las curvas suben conforme se incrementa el tiempo de exposición con la excepción de la curva de 2 años. A pesar de que en el caso de mayor temperatura se observa una tendencia, se puede ver que los cambios en ambas opciones son leves.

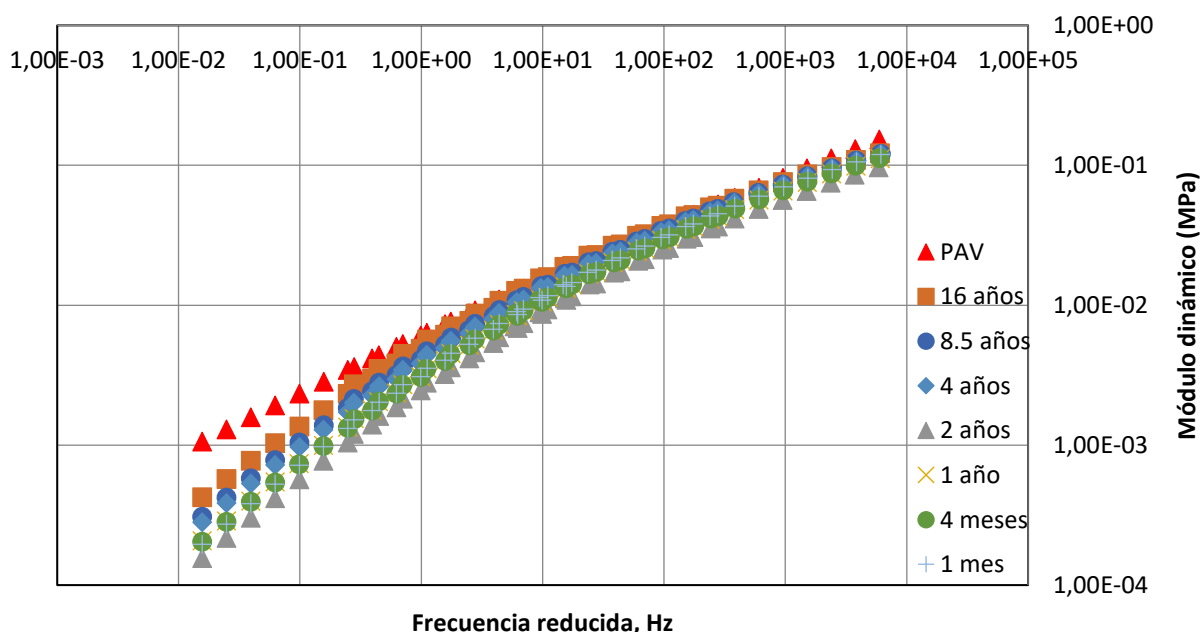


Figura 46. Curvas maestras para los tiempos de exposición del tratamiento de radiación UV a 60°C

5.3.2 Ensayo LAS

Para el ensayo LAS se hicieron pruebas con variantes en la confección y colocación de la muestra en la geometría del reómetro. Es importante recordar que la geometría usada es circular de 8 mm de diámetro con un espaciado entre placas de 2 mm. Se inició con las pruebas uniendo dos muestras de 1 mm de espesor para obtener el total antes mencionado. Esto generó la duda de dónde ubicar las diferentes superficies de la muestra. Tras intentar diferentes combinaciones se registraron resultados recurrentes donde se generaba una superficie de falla en el contacto entre las muestra o bien entre la muestra y la geometría. Esta

situación hizo que los resultados fueran impredecibles y que por lo tanto no sirvieran para su uso comparativo. A pesar de esto se puede mencionar que el hecho que se generen superficies de falla puede indicar que la muestra perdió en cierta medida su capacidad de adherencia.

Posteriormente se determinó que una posible solución es la confección de las muestras mediante la homogenización de los especímenes para así contar con un material continuo y apto para el ensayo. Se procedió de esa manera y se obtuvieron resultados más consistentes que se mostrarán en este capítulo. Por último se usaron las muestras de 2 mm que se confeccionaron previamente, las cuales se hicieron para cumplir con el espesor de muestra de este ensayo. Al igual que con las muestras homogenizadas, los resultados son consistentes por lo que se mostrarán posteriormente.

Ensayo con muestra homogenizada

Al homogenizar las muestras, se obtiene una cantidad de material que se puede remoldear para cumplir con las características del reómetro. Esto a su vez hace que la muestra no tenga superficies de falla tal y como ocurrió al juntar dos muestras de 1 mm de espesor. Se consideró la homogenización como una opción válida por lo que se obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

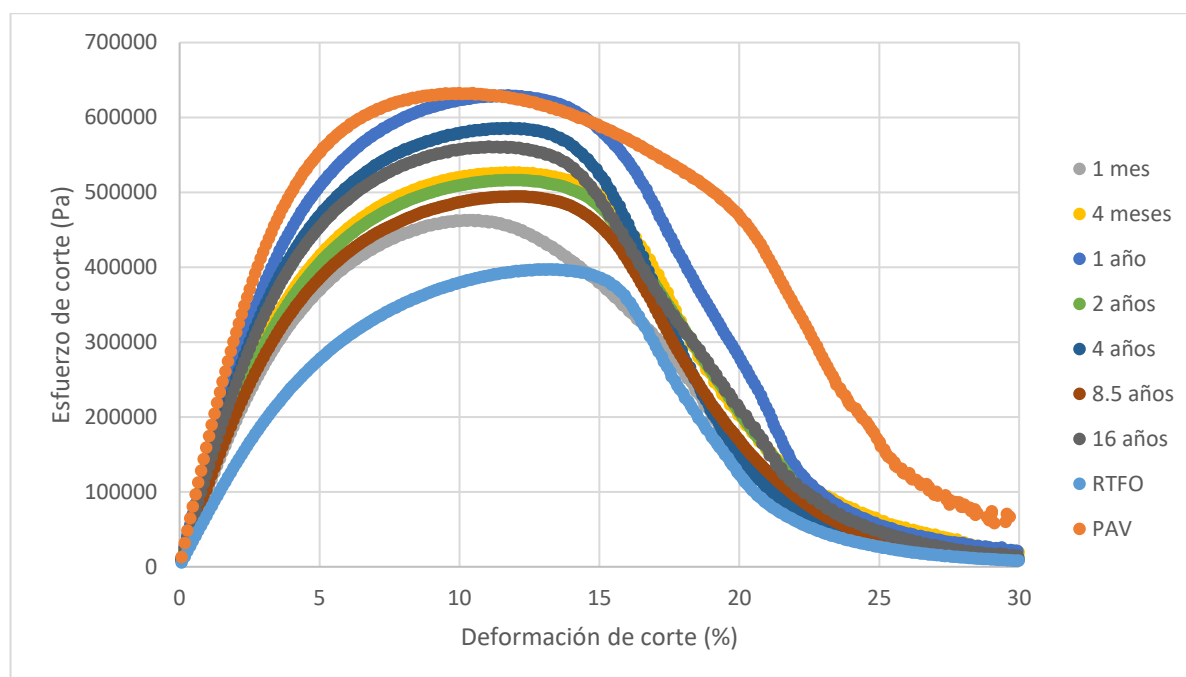


Figura 47. Curvas de esfuerzo contra deformación obtenidas mediante el ensayo LAS, de las muestras homogenizadas y sometidas a radiación UV y temperatura ambiente

En la Figura 47 y Figura 48 se observan las curvas de esfuerzo contra deformación obtenidas del ensayo LAS. En la primera se puede ver como varían las curvas sin seguir una tendencia mientras que en la segunda si se observa un crecimiento general en las curvas, donde las mayores corresponden a los mayores tiempos de exposición.

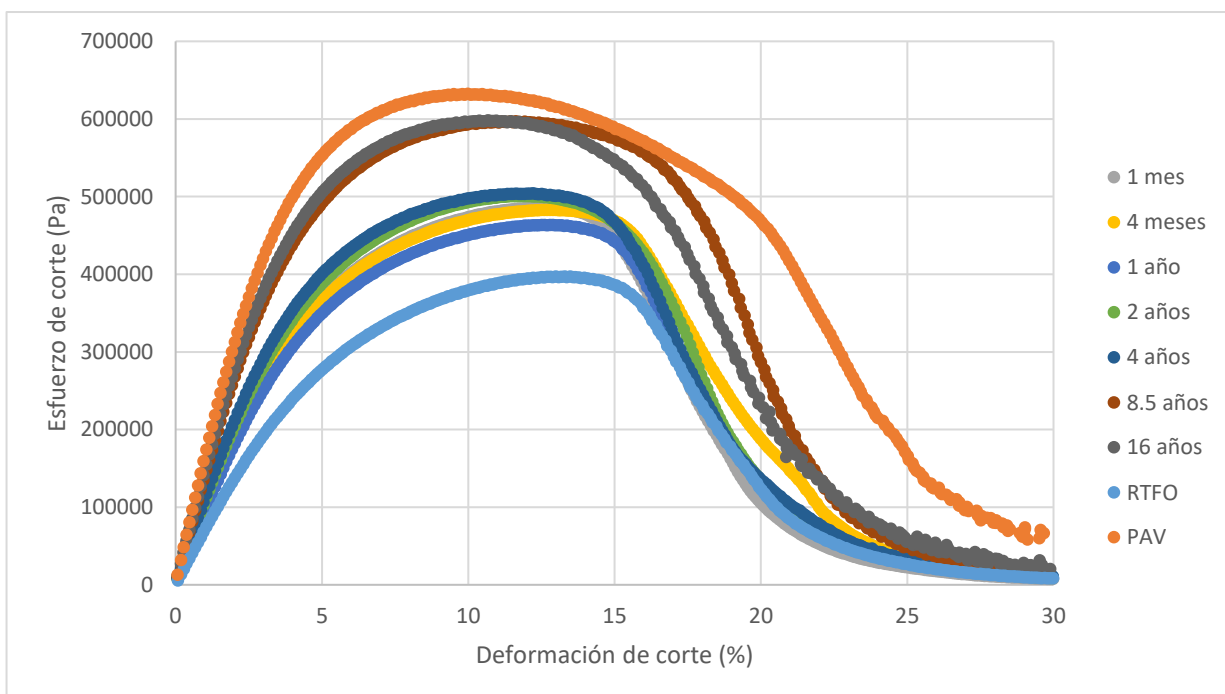


Figura 48. Curvas de esfuerzo contra deformación obtenidas mediante el ensayo LAS, de las muestras homogenizadas y sometidas a radiación UV y temperatura de 60°C

Como se explicó en el marco teórico, de este ensayo se obtiene un modelo que predice la cantidad de cargas a determinado porcentaje de deformación unitaria. El modelo se resuelve según los resultados obtenidos de la prueba, para las variables A y B las cuales determinan el modelo. El valor de A se interpreta como el máximo número de cargas, cuando la deformación unitaria es mínima, mientras que el valor de B determina la tasa a la que el material acumula daño. Por esta razón se presentan los valores de estas dos variables obtenidas para cada condición.

Los valores de A y B obtenidos con la muestra homogenizada se muestran en la Figura 49 y Figura 50 respectivamente. Se puede observar que en ambos casos en el tratamiento de UV a temperatura ambiente, no se presentan cambios notables, mientras que en el tratamiento de

UV con temperatura de 60 °C si se ven cambios de aumento en magnitud. Un aumento en el valor de A implica que el material resiste más repeticiones de carga o en otras palabras que mejora su comportamiento a la fatiga. Por otra parte un aumento en la magnitud del valor de B implica un aumento en la tasa de daño que acumula el material.

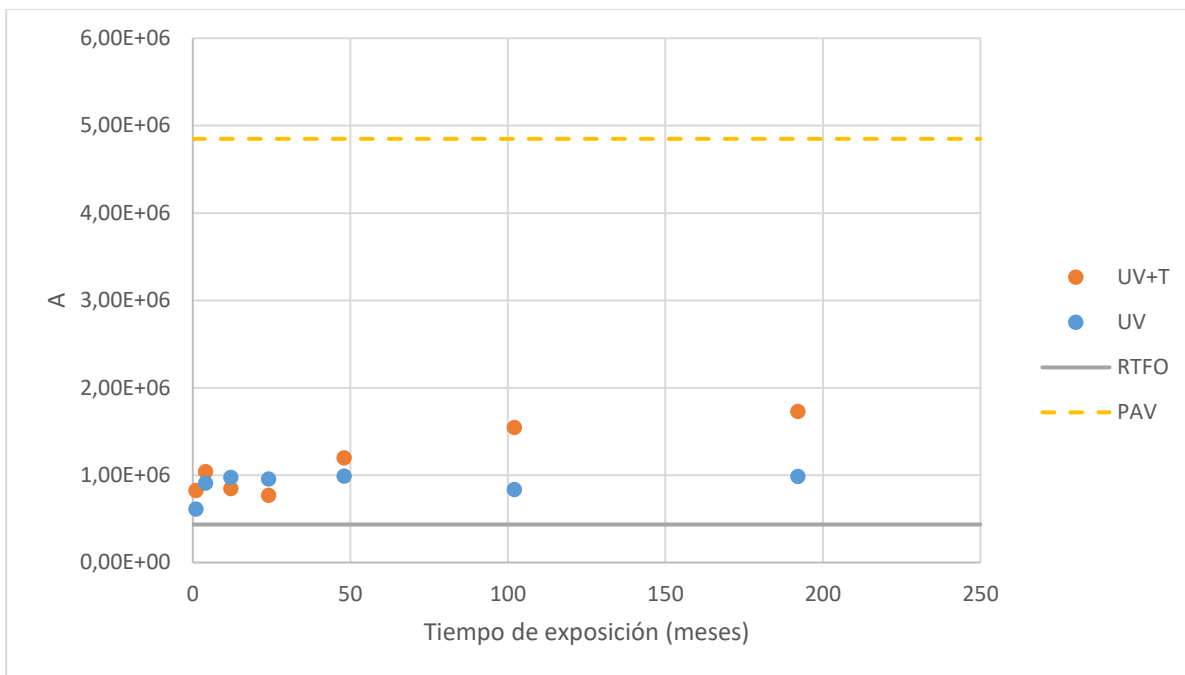


Figura 49. Valor de A en el modelo del ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras homogenizadas

Al tomar en consideración las dos constantes del modelo se puede calcular la cantidad de repeticiones a determinada deformación unitaria. En la Figura 51 se presentan los valores para un porcentaje de deformación unitaria de 2.5%. Al observar el comportamiento se identifica que no hay cambios considerables entre los dos tratamientos a pesar de que si se obtienen valores ligeramente mayores en el caso de UV a 60 °C.

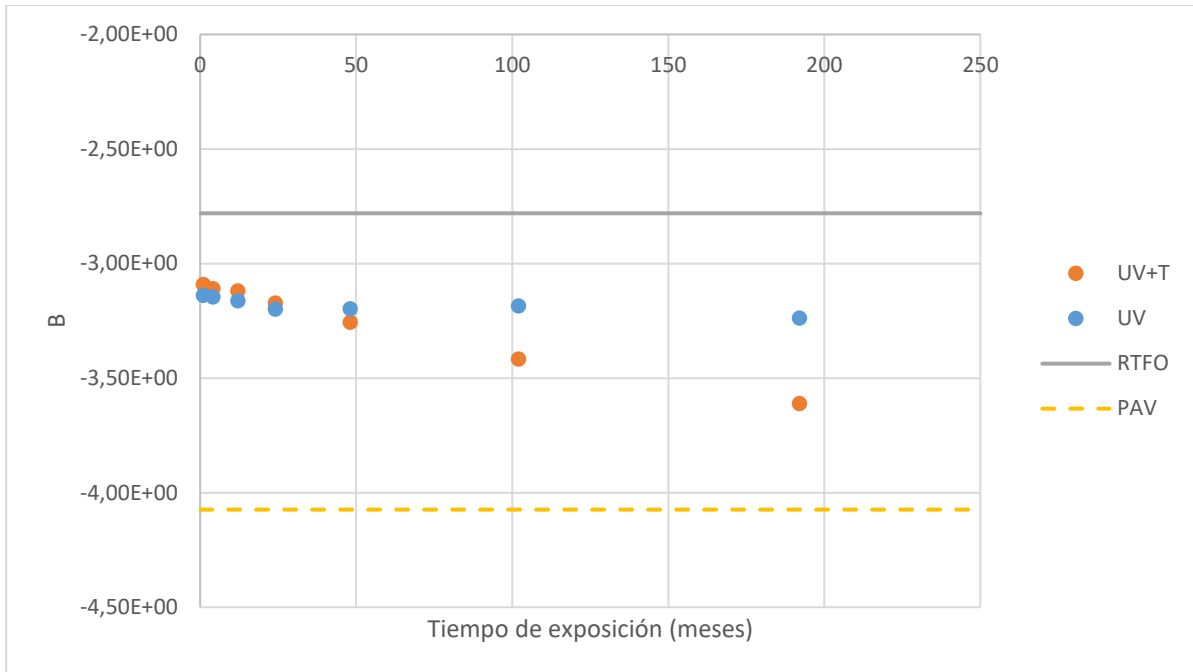


Figura 50. Valor de B en el modelo del ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras homogenizadas

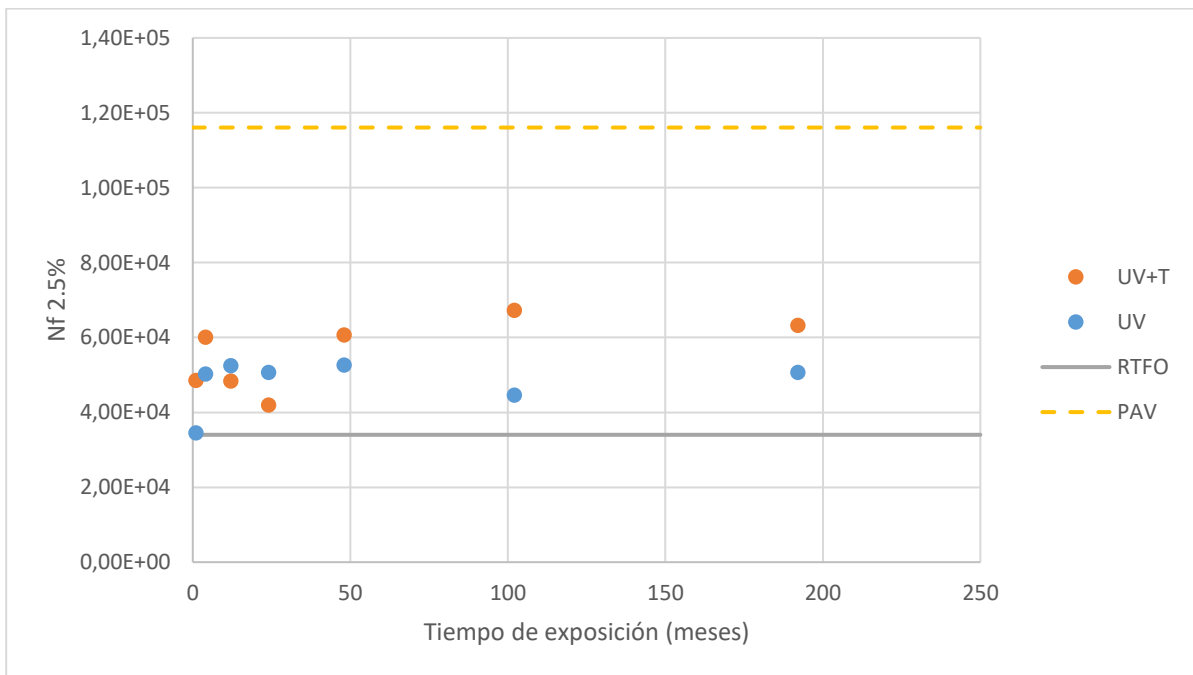


Figura 51. Valor de Nf 2.5% en el modelo del ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras homogenizadas

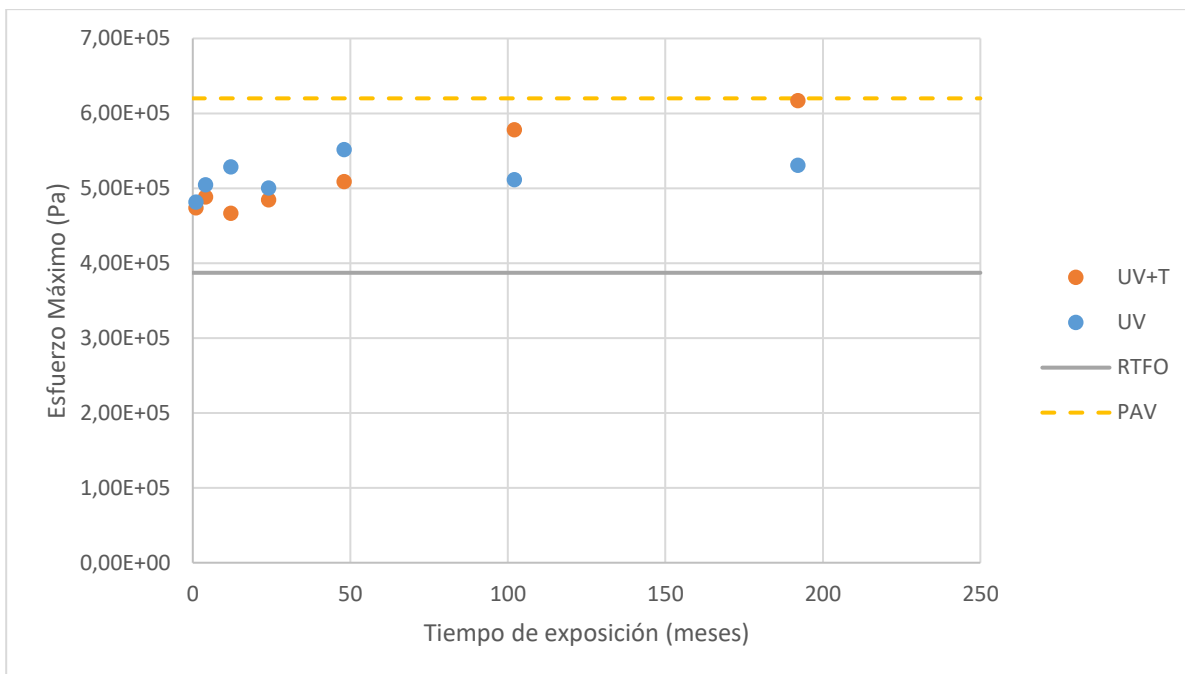


Figura 52. Esfuerzo máximo obtenido en el ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras homogenizadas

Finalmente se estudia el esfuerzo máximo que desarrolla la muestra en el proceso de la prueba. Esto para observar aumentos en la capacidad de carga y rigidez. Se observa que hay una tendencia creciente en el tratamiento con temperatura de 60 °C lo que indica un aumento en la rigidez del material. Por su parte en el tratamiento efectuado a temperatura ambiente no se observan cambios considerables.

Ensayo con muestra de 2 mm

Considerando la geometría del reómetro para la prueba, se confeccionaron muestras de 2 mm de espesor. Se presentan a continuación de igual manera los resultados obtenidos con estas muestras. Iniciando por la Figura 53 y Figura 54, se muestran las curvas de esfuerzo contra deformación unitaria y se puede observar que se tienen diferencias bajas entre los diferentes tiempos de exposición exceptuando las curvas de las últimas dos mediciones (8,5 y 16 años) en el caso de UV y la última en el caso de UV con temperatura. Con estos dos casos se tuvo el problema de que las muestras por poco no llegaban a los 2 mm de espesor por lo cual los datos registrados presentaron problemas. A pesar de esto se puede observar con los demás datos que no hay una tendencia clara.

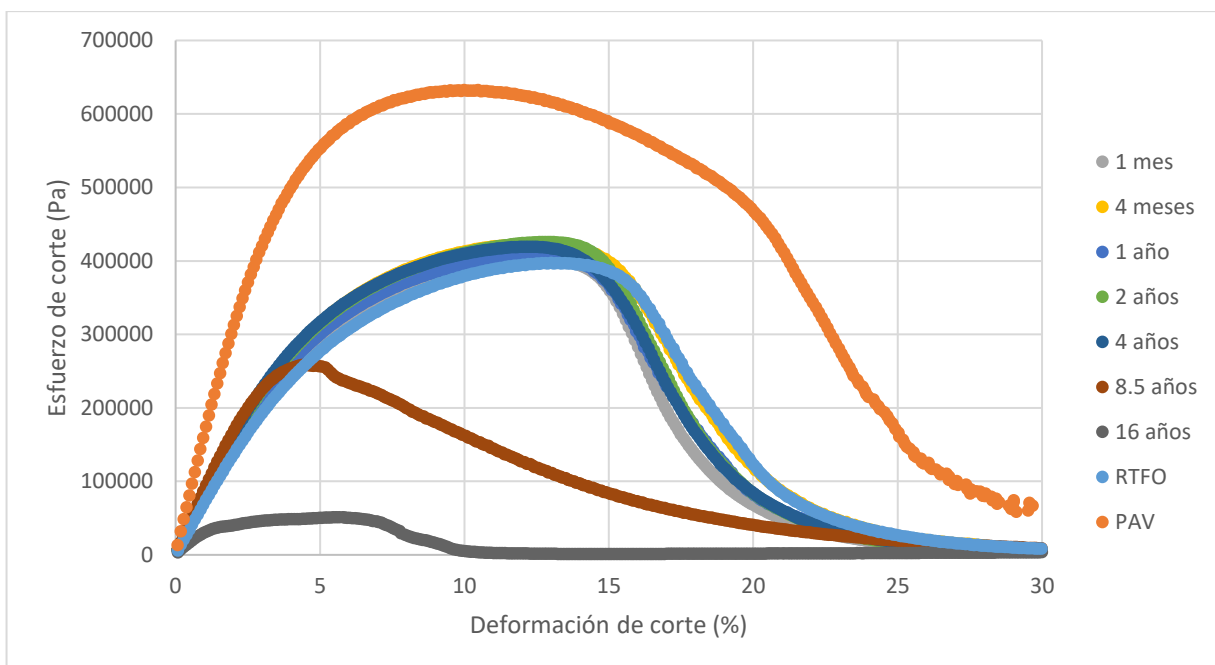


Figura 53. Curvas de esfuerzo contra deformación obtenidas mediante el ensayo LAS, de las muestras de 2mm y sometidas a radiación UV y temperatura ambiente

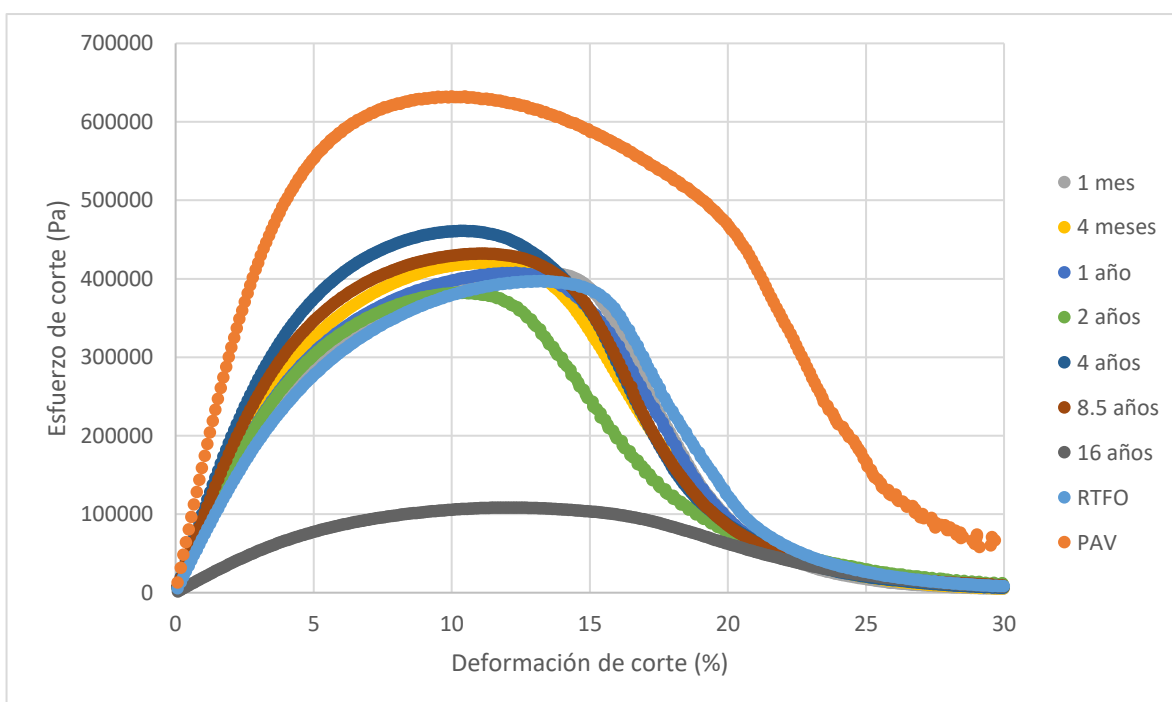


Figura 54. Curvas de esfuerzo contra deformación obtenidas mediante el ensayo LAS, de las muestras de 2mm y sometidas a radiación UV y temperatura de 60°C

Seguidamente se presentan los valores de A y B obtenidos de las muestras de 2 mm. En cuanto al valor de A (Figura 55) se puede ver que en el caso de radiación con temperatura se presenta un aumento por lo que el material se vuelve más resistente a la fatiga. Esta misma tendencia no se puede observar en el otro tratamiento debido a los datos erróneos obtenidos en los últimos puntos. Por su parte en el valor de B (Figura 56) se visualiza un incremento en su magnitud en ambos tratamientos, lo que indica que hay un aumento en la tasa de daño en estas muestras. Uniendo las dos constantes del modelo se obtiene el Nf a 2,5% de deformación unitaria que se presenta en la Figura 57. En este caso el tratamiento de radiación más temperatura presenta un incremento en la cantidad de repeticiones de carga, mientras que el otro tratamiento no presenta cambios considerables fuera de los últimos datos que presentan problemas.

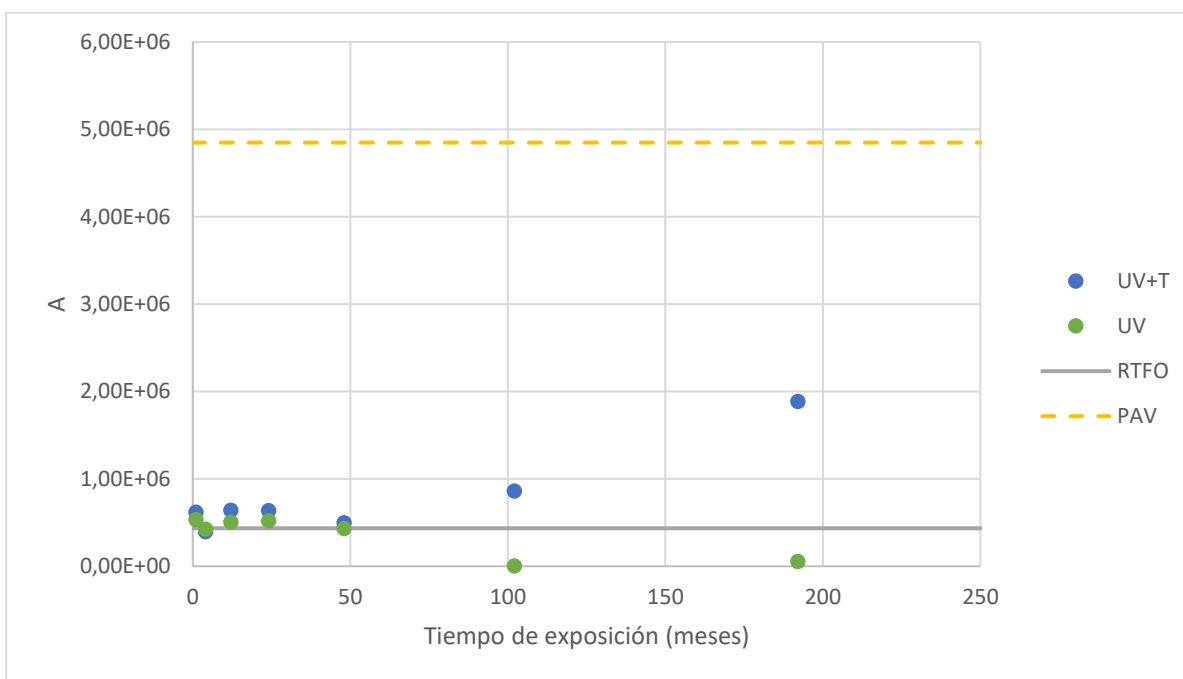


Figura 55. Valor de A en el modelo del ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras de 2mm

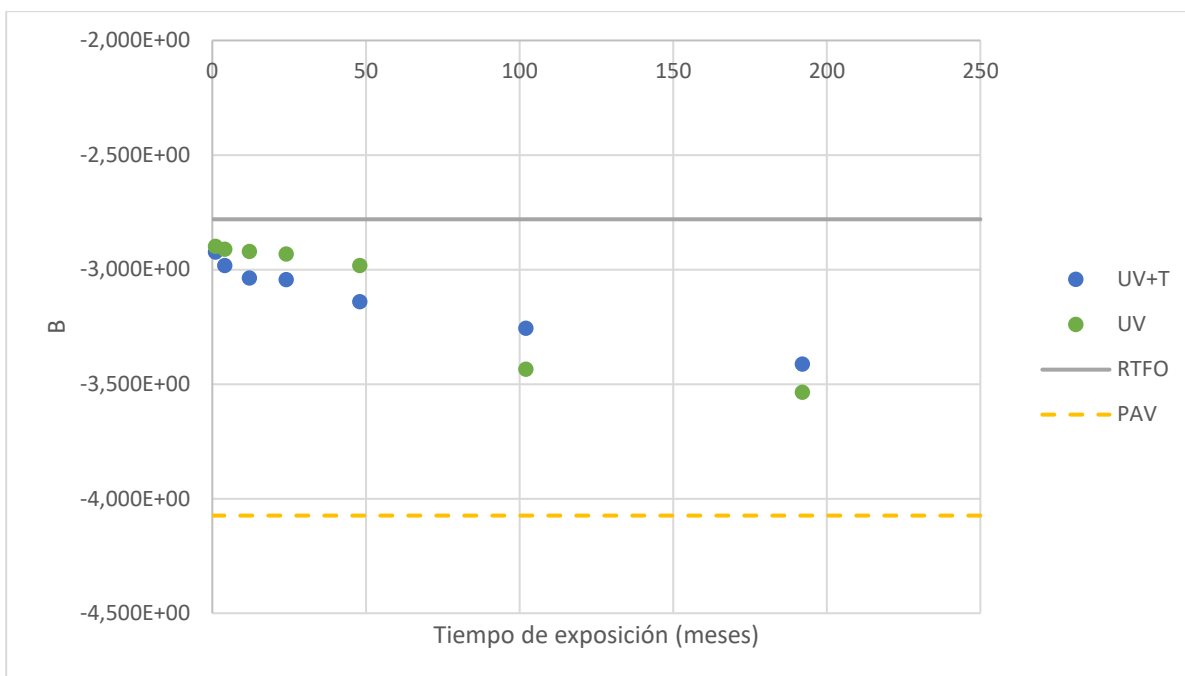


Figura 56. Valor de B en el modelo del ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras de 2mm

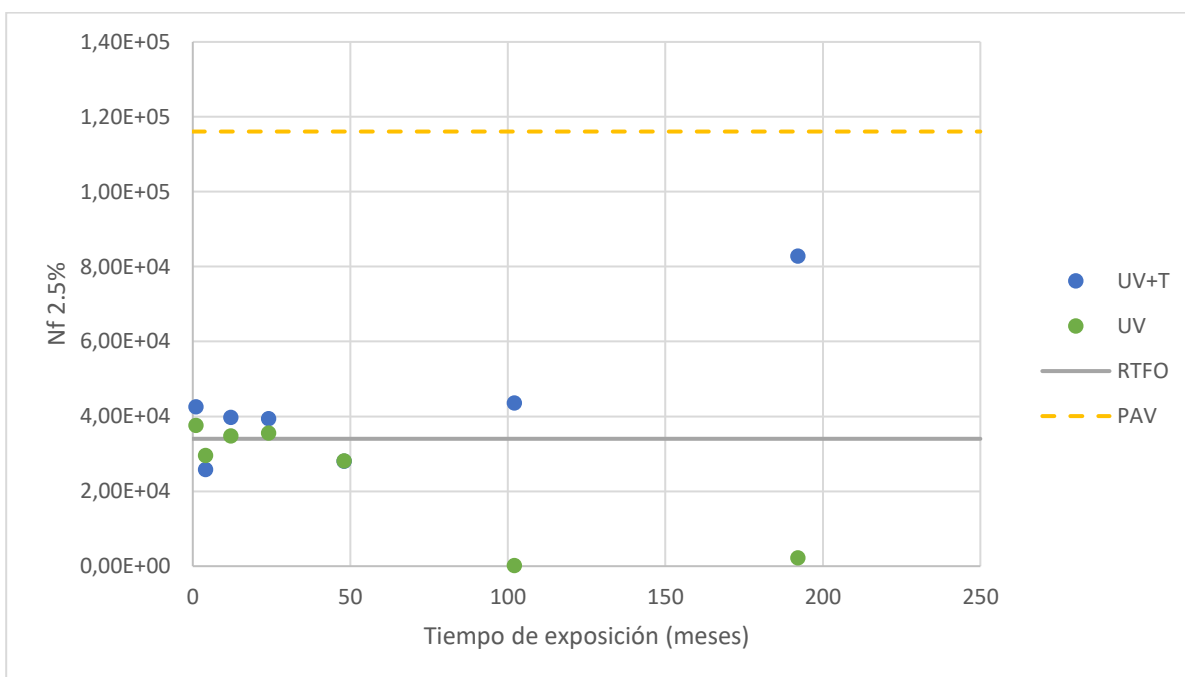


Figura 57. Valor de Nf 2.5% en el modelo del ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras de 2mm

Por último se tiene en la Figura 58 el registro de los esfuerzos máximos desarrollados en las curvas de esfuerzo contra deformación. Como se comentó este valor puede indicar un aumento en la rigidez del material, sin embargo en los datos obtenidos se muestran valores en las últimas mediciones que bajan drásticamente su valor. Por el inconveniente de las muestras, estos últimos datos de la serie no deben considerarse.

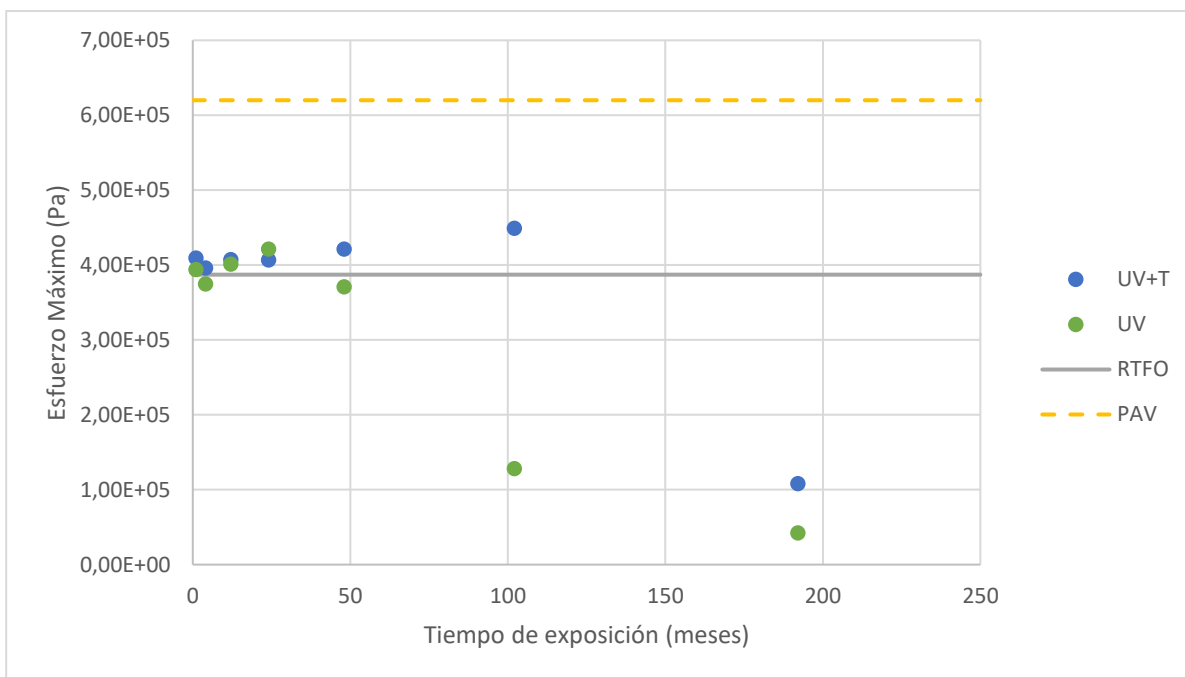


Figura 58. Esfuerzo máximo obtenido en el ensayo LAS según el tiempo de exposición para las muestras de 2mm

6. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA CON LOS ENSAYOS NORMADOS

6.1 Propiedades Químicas

A continuación se presenta la comparación entre el acondicionamiento que se propuso en el presente proyecto y los ensayos normados que se usan actualmente. Específicamente se comparan las áreas en absorbancia de los distintos compuestos indicadores de oxidación, medido en los espectros de infrarrojo. Anteriormente en las secciones 5.2.2 y 5.2.3 se mostraron las cuantificaciones realizadas y se incluye en líneas horizontales de trazo continuo, los valores asociados al ensayo RTFO y el ensayo PAV. Se recomienda revisar estas figuras ya que son muy ilustrativas y se pueden seguir fácilmente. A pesar de que se obtuvieron datos de las dos normativas antes mencionadas, este caso se comprara directamente el acondicionamiento propuesto con el ensayo PAV debido a que ambos buscan simular el envejecimiento a largo plazo.

En los siguientes cuadros se puede observar la comparación antes mencionada donde se relaciona cada uno de los tiempos de exposición con el valor de PAV. En los cuadros se muestra la comparación porcentual para todos los grupos considerados y se aclara que los valores positivos resaltados con rojo señalan que el acondicionamiento propuesto generó una mayor concentración de ese grupo que la norma.

Cuadro 15. Comparación porcentual de la concentración de grupos químicos del tratamiento de UV a temperatura ambiente en la superficie expuesta, con el procedimiento normado PAV

	PAV (abs/cm)	UV ARRIBA % DIFERENCIA						
		1 mes	4 meses	1 año	2 años	4 años	8.5 años	16 años
Hidroxilo	0.388	-18.1	20.8	50.8	114.9	251.2	732.9	1550.8
Aromatización	0.030	0.9	-4.4	-6.4	-7.8	-5.3	42.7	278.1
Carbonilos	0.143	-47.5	3.3	85.9	209.6	678.8	2429.4	6072.4
Doble carbono	0.756	-5.7	-3.2	-10.3	-12.0	-18.2	-13.4	-2.4
Sulfóxidos	1.002	-43.1	-28.2	-11.6	-1.0	24.2	130.0	74.3

Iniciando por el Cuadro 15, se observa que se presenta el valor de PAV junto con las variaciones porcentuales para el tratamiento de UV a temperatura ambiente. Se puede observar que es claro cómo se supera el valor en el caso del hidroxilo y los carbonilos donde a los 4 meses

simulados ya se sobrepasan y poseen una tendencia creciente. Por su parte la aromatización y los sulfóxidos también lo superan pero a mayor tiempo de exposición UV. Por último los dobles enlaces de carbono se mantienen siempre por debajo del valor obtenido de la norma. Por su parte en el Cuadro 16 se observa la misma comparación pero para la cara no expuesta a la radiación. En este caso se observa que para los grupos hidroxilo, aromáticos y doble carbono en todo momento se supera lo cual está ligado a la posible interacción entre la muestra y el molde utilizado. Otro indicador de esto es que los porcentajes de diferencia en estos casos no presentan tendencias claras ni cambios significativos. Por su parte los carbonilos y sulfóxidos permanecen por debajo del ensayo PAV a todos los tiempos de exposición.

Cuadro 16. Comparación porcentual de la concentración de grupos químicos del tratamiento de UV a temperatura ambiente en la superficie no expuesta, con el procedimiento normado PAV

	PAV (abs/cm)	UV ABAJO % DIFERENCIA						
		1 mes	4 meses	1 año	2 años	4 años	8.5 años	16 años
Hidroxilo	0.388	86.1	46.8	41.7	32.5	21.2	57.8	31.1
Aromatización	0.030	46.8	57.3	33.2	51.2	50.2	61.3	85.8
Carbonilos	0.143	-56.8	-55.7	-62.3	-53.9	-52.0	-45.5	-47.2
Doble carbono	0.756	54.9	59.4	34.9	54.2	47.2	61.3	63.7
Sulfóxidos	1.002	-40.4	-40.3	-43.5	-43.8	-41.9	-38.4	-40.0

Por otro lado se presenta la comparación para el tratamiento de radiación UV a 60 °C iniciando con la superficie expuesta en el

Cuadro 17. En este caso se observan tendencias similares al otro tratamiento con la diferencia de que el tiempo para superar el límite es mayor. En el caso del hidroxilo y carbonilos se supera hasta alcanzar un año de simulación, mientras que en los sulfóxidos hasta los 4 años. Los compuestos aromáticos y dobles enlaces se mantienen constantemente por debajo del PAV. Por último en el Cuadro 18 se observa el caso se la superficie no expuesta y de nuevo se observan tendencias similares al anterior tratamiento. Los grupos hidroxilo, aromáticos y dobles enlaces de carbono se encuentran por encima del valor de PAV mientras que los carbonilos y sulfóxidos se encuentran por debajo.

Cuadro 17. Comparación porcentual de la concentración de grupos químicos del tratamiento de UV a temperatura de 60 °C en la superficie expuesta, con el procedimiento normado PAV

	PAV (abs/cm)	UV+T ARRIBA % DIFERENCIA						
		1 mes	4 meses	1 año	2 años	4 años	8.5 años	16 años
Hidroxilo	0.388	-40.6	-10.5	47.0	34.6	42.8	65.8	131.6
Aromatización	0.030	-3.6	-2.6	-1.6	-6.3	-12.4	-11.5	-24.5
Carbonilos	0.143	-67.5	-50.7	11.9	54.5	91.1	245.7	540.4
Doble carbono	0.756	-4.9	-0.6	-5.7	-7.4	-15.1	-28.4	-19.7
Sulfóxidos	1.002	-54.0	-40.8	-21.1	-13.8	34.0	68.1	115.3

Cuadro 18. Comparación porcentual de la concentración de grupos químicos del tratamiento de UV a temperatura de 60 °C en la superficie no expuesta, con el procedimiento normado PAV

	PAV (abs/cm)	UV+T ABAJO % DIFERENCIA						
		1 mes	4 meses	1 año	2 años	4 años	8.5 años	16 años
Hidroxilo	0.388	18.5	2.0	23.1	37.3	27.9	60.9	-39.7
Aromatización	0.030	23.6	41.5	45.3	35.2	28.1	29.4	-11.7
Carbonilos	0.143	-57.9	-50.8	-50.0	-49.5	-59.4	-44.5	-54.5
Doble carbono	0.756	27.3	47.0	45.3	44.3	30.2	35.7	-6.7
Sulfóxidos	1.002	-47.5	-52.9	-48.9	-47.3	-44.0	-36.6	-54.6

6.2 Propiedades Mecánicas

6.2.1 Ensayo LAS

Para realizar esta comparación se usarán las figuras de la sección 5.3.2 donde se presentan además de todos los tratamientos y tiempos de exposición, los ensayos normados. Si se observa la Figura 47 y Figura 48 , que corresponde a la muestra homogenizada, se puede notar que las curvas de las normas se encuentran como límite inferior y superior. Las curvas de los diferentes tiempos de exposición en estos casos varían desde la cota inferior definida por el RTFO hasta la superior definida por el PAV. Por su parte si se estudia la Figura 53 y Figura 54

correspondientes a las muestras de 2 mm se puede ver que las curvas a diferentes tiempos de exposición no varían tanto y se mantienen similares a la del ensayo RTFO.

Siguiendo con las comparaciones se estudian los valores de A y B del modelo. Al ver la Figura 49, Figura 50, Figura 55 y Figura 56 se puede ver que pasa algo similar en cada una de ellas. Lo que se identifica es que en todos los casos, los valores registrados para cada tratamiento se encuentran dentro del rango comprendido por los valores de RTFO y PAV. A continuación en el Cuadro 19 se presenta una comparación entre el valor de Nf 2,5 % de los tratamientos y el valor de PAV. Se muestra en valor obtenido del ensayo PAV y el porcentaje correspondiente a los tratamientos. Como se puede identificar, en la mayoría de los casos el valor obtenido de las muestras siguiendo la metodología planteada, no llegan a sobrepasar un 50 % de la norma.

Cuadro 19. Comparación porcentual del valor de Nf 2,5 % entre las muestras homogenizadas y de 2 mm, así como ambos tratamientos UV a temperatura ambiente y 60 C°

	Nf 2,5 % (Comparación porcentual)			
	Homogenizado (%)		Muestra de 2 mm (%)	
	UV	UV+T	UV	UV+T
1 mes	29,7	41,8	32,4	36,6
4 meses	43,2	51,7	25,4	22,2
1 año	45,2	41,7	29,9	34,2
2 años	43,6	36,1	30,6	33,9
4 años	45,3	52,3	24,2	24,1
8.5 años	38,4	57,9	0,1	37,5
16 años	43,6	54,5	1,9	71,3
PAV	116067,4			

A pesar de que no se llega a superar los valores obtenidos del ensayo PAV, se puede observar que en general se obtienen mayores valores en el caso de las muestras homogenizadas. Esto se puede deber al hecho de que la metodología genera muestras heterogéneas en cuanto a oxidación y no penetra la radiación ni tan solo un milímetro, por lo tanto se tiene la superficie expuesta oxidada y el resto de la muestra con condiciones cercanas al asfalto únicamente envejecido por RTFO.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- Se realizó una búsqueda de la información disponible referente a la radiación en Costa Rica. La información encontrada corresponde a radiación global y es emitida por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Se solicitó información para zonas costeras y zonas del valle central con el objetivo de estudiar la variación de la radiación con la altura. Se encontró que la diferencia en promedio en la radiación según la división realizada llega a un 10 %, lo que generó que se usara únicamente para el proyecto los datos de estaciones costeras que son los más críticos.
- Se implementó una metodología de envejecimiento acelerado que incorpora el efecto de la radiación ultravioleta y la temperatura. Para esto se utilizó el horno de UV y temperatura elaborado en el LanammeUCR con este fin. Las características de este horno se establecieron para su uso.
- Se realizó la conversión de la radiación global a la radiación UV mediante porcentajes obtenidos de la literatura y que corresponden a mediciones realizadas en otras partes del mundo. Esto debido a que no se encontraron registros propiamente de radiación UV.
- Mediante la definición de Julio (unidad de trabajo) y Watt (unidad de potencia), se realizó la conversión de radiación promedio mensual a su equivalente en tiempo de exposición en la cámara de envejecimiento.
- Se confeccionaron las muestras de 1 mm y 2 mm tomando en consideración la geometría de los moldes y el peso del asfalto. Se obtuvo en la mayoría de los casos muestras con espesores muy cercanos a los valores objetivo, sin embargo algunas de las muestras de 2 mm midieron menos, afectando las mediciones correspondientes.
- Se hizo uso del horno UV desarrollado en el LanammeUCR, y se verificó que sus lámparas de radiación UV funcionan apropiadamente bajo las condiciones de temperatura ambiente y a 60 °C. Además se verificó la capacidad de ajustar la temperatura.
- Se realizaron mediciones mediante el ensayo FTIR de las muestras tanto en su superficie expuesta como en la no expuesta. Y se obtuvo un cambio en la apariencia física de la superficie expuesta, únicamente en la condición de UV a temperatura

ambiente a partir de las muestras expuestas 218 horas en el horno (8.5 años de servicio)

- Se cuantificó el área de los picos correspondientes a compuestos o grupos químicos que indican oxidación en el asfalto. Esta cuantificación se llevó a cabo mediante el Software de Thermo Scientific llamado Omnic. Los resultados se registraron y se graficaron según cada condición en función del tiempo para observar tendencias.
- En los dos tratamientos planteados se pudo observar en la superficie expuesta un aumento en los grupos hidroxilo (3500 cm^{-1}), carbonilo ($1680\text{-}1750\text{ cm}^{-1}$) y sulfóxidos (1030 cm^{-1}). Por su parte los dobles enlaces de carbono y los aromáticos no presentan cambios significativos.
- En la superficie no expuesta no se encontraron tendencias crecientes o decrecientes en ninguno de los tratamientos o grupos químicos estudiados. En los casos que se presentan valores superiores al asfalto se considera según los datos obtenidos que se debe a una interacción entre el asfalto y el molde de silicón.
- Se realizó la comparación entre los tratamientos propuestos y los valores obtenidos del ensayo normado PAV. En el caso particular de los carbonilos, en ambos casos, con UV a temperatura ambiente y UV a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, se supera el valor de PAV a un tiempo de 26 horas en el horno o 1 año de servicio. Se observa además que los valores obtenidos en el tratamiento a temperatura ambiente son mayores que en el otro caso.
- Por su parte los sulfóxidos se comportan de manera similar en ambas condiciones empleadas y superan el valor de PAV a las 103 horas en el horno o 4 años de servicio.
- El compuesto hidroxilo bajo las dos condiciones propuestas supera el valor del ensayo PAV a las 26 horas reales de horno o 1 año de servicio. Además se vuelve a presentar la tendencia de que los valores obtenidos para este grupo resultaron mayores en el condicionamiento a temperatura ambiente que a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Se midieron las propiedades mecánicas a través de un reómetro de corte dinámico, Se obtuvieron barridos de frecuencia y temperatura así como los datos referentes al ensayo LAS. El barrido se realizó únicamente con la muestra homogenizada y el ensayo LAS se hizo además con muestras de 2 mm de espesor.
- Los barridos de frecuencia evidencian que no hay cambios considerables en las curvas en el caso de UV a temperatura ambiente, mientras que un cambio leve en el caso de UV a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. En este caso el cambio es un incremento o traslación vertical de la curva

conforme aumenta el tiempo de exposición y que a su vez indica una rigidización del material.

- En cuanto al ensayo LAS es difícil encontrar tendencias, sin embargo de forma generalizada se observó que los valores registrados, ya sea la curva de esfuerzo deformación o el N_f , se mantienen dentro del rango definido por los ensayos normados RTFO y PAV. Esto indica que los tratamientos empleados si generan un cambio en las respuestas del asfalto, pero además indica que no lo suficiente para superar el efecto producido por el ensayo PAV.
- El valor de B en el modelo del ensayo LAS que indica la tasa de daño del material se incrementa en magnitud en todos los tratamientos, obteniendo un mayor incremento en el caso de la condición de UV a 60 °C. Esto indica un aumento en la tasa de daño que es lógico debido al proceso de envejecimiento.
- Al comparar los resultados de las muestras homogenizadas con los de las muestras de 2 mm se observa que la afectación es más notoria en las muestras homogenizadas.
- Se encuentra que el envejecimiento mediante UV a temperatura ambiente genera mayores cambios a nivel químico, mientras que el de UV a 60 °C genera mayores cambios en las características mecánicas y reológicas.
- El método empleado genera muestras heterogéneas de 1 mm que se oxidan en su superficie expuesta y no se ven considerablemente afectadas en la parte no expuesta. Esto indica que la radiación no llega a penetrar el espesor de 1 mm en el asfalto con las condiciones dadas.
- El tipo de daño que parece generar la radiación UV es de carácter superficial y genera oxidación en el asfalto. El hecho de que no penetre en gran medida, hace que la mayoría del asfalto de la muestra se mantenga en condiciones cercanas a las originales y por lo tanto al homogenizarlo o al usar las muestras de 2 mm, los resultados de las pruebas reológicas no son tan drásticos.

7.2 Recomendaciones

- Se recomienda a las autoridades pertinentes, como el Instituto Meteorológico Nacional, realizar en sus estaciones un registro de mediciones propiamente de radiación UV para tener más certeza en estos datos y no depender de información bibliográfica de otros países.
- Hasta donde sea posible se recomienda agregar factores al proceso de envejecimiento como ciclos y el efecto del agua. Esto con el objetivo de seguir acercando la representación del laboratorio a la realidad.
- Se recomienda para futuras pruebas realizar la mayor cantidad de especímenes por cada tratamiento y tiempo de exposición, debido a que el proceso implica bastante tiempo y no conviene repetirlo.
- Se considera pertinente realizar estudios posteriores referentes a la interacción entre el asfalto y los moldes de silicón utilizados. Esto para determinar si existe una interacción, en qué medida se da y si depende del tiempo de almacenamiento o de la temperatura.
- Se recomienda considerar el efecto de la radiación UV como una afectación superficial y por lo tanto realizar pruebas en la superficie del asfalto obtenido y buscar soluciones que apliquen a esta condición.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, J. P., Salazar, J., Baldi, A., Leiva, F., & Loría, L. (2015). *Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures using the Bitumen Bond Strength and Surface Energy Measurement Tests*. San José: LanammeUCR.
- Aphalo, P., Albert, A., Mcleod, A., Bjorn, L., Robson, M., & Rosenqvist, E. (2012). *Beyond the Visible: A handbook of best practice in plant UV photobiology*. Helsinki: University of Helsinki.
- ASTM International. (2004). *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. West Conshohocken: ASTM.
- ASTM International. (2005). *Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*. West Conshohocken: ASTM.
- ASTM International. (2008). *Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. West Conshohocken: ASTM.
- Beckman, D. (1991). *Solar Engineering of Thermal Process*. John Wiley & Sons.
- Brune, D., Hellborg, R., Persson, B., & Paakkonen, R. (2001). *Radiation at Home, Outdoors and in the Workplace*. Oslo: Scandinavian Science Publisher.
- Cárdenas, J., & Fonseca, E. (2009). *Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura*. Medellín: Revista EIA.
- Corrêa, M. d. (2015). *Solar ultraviolet radiation: properties, characteristics and amounts observed in Brazil and South America*. Itajubá: Universidad Federal de Itajubá.
- Dickinson, E., & Witt, H. (1969). *The Viscoelastic Behavior of Confined Thin Films of Bitumen in Tension Compression*. Society of Rheology.
- Domke, C., Davison, R., & Glover, C. (2000). *Effect of Oxygen Pressure on Asphalt Oxidation Kinetics*. Texas: Texas A&M University.
- Dorrence, S., Barbour, F., & Petersen, J. (1974). *Direct Evidence of Ketones in Oxidized Asphalts*. Wyoming: Laramie Energy Research Center.

- Dow, A. (1903). *Asphalt Experiments at Washington*. Washington: Engineering Record.
- Fernandez, W. D. (2014). *Environmental Aging of Asphalt Mixtures*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Gundlach, M., Paulsen, K., Garry, M., & Lowry, S. (2015). *Yin and Yang in Chemistry Education: The Complementary Nature of FT-IR and NMR Spectroscopies*. Madison: Thermo Fisher Scientific.
- Huang, Y. (2004). *Pavement Analisis and Design*. New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2015). *Qué es la radiación ultravioleta?* Obtenido de Instituto Meteorológico Nacional: <http://www.imn.ac.cr/educacion/UV/UVMAS1.html>
- Inzunza, J. (s.f.). *Meteorología descriptiva*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Johnson, C. (2010). *Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance Using An Accelerated Test Method*. Madison: University of Wisconsin.
- Lewis, R., & Welborn, J. (1940). *Report on the Properties of the Residues of 50-60 and 85-100 Penetration and Ductility at Plant Mix Temperatures*. Association of Asphalt Paving Technologists.
- López, S. (2014). *Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre la 100 y 200 horas*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Petersen, C. (2009). *A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation*. Washington: TRB.
- Petersen, J., Barbour, F., & Dorrence, S. (1975). *Identification of Dicarboxylic Anhydrides in Oxidized Asphalts*. Wyoming: Laramie Energy Research Center.
- Rojas, J., Amado, H., Fernández, W., & Reyes, F. (2012). *Efectos de la radiación ultravioleta en asfaltos colombianos*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Sisko, A., & Brunstrum, L. (1969). *Relation of Asphalt Rheological Properties to Pavement Durability*. Washington D.C: NCHRP.
- Skoog, D., Holler, J., & Crouch, S. (2008). *Principios de análisis instrumental*. México D.F.: CENGAGE Learning.

- Thermo Nicolet Corporation. (2001). *Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry*. Madison: Thermo Nicolet.
- U.S. Department of Transportation. (1999). *Superpave Asphalt Mixture Design Workshop Workbook*. Federal Highway Administration.
- Vargas, X. (2007). *Determinación de la evolución reológica de las fracciones pesadas del petróleo sometidas a envejecimiento in situ en un reo-reactor*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Vargas, X., & Reyes, F. (2010). *El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos*. Bogotá: Ingeniería e investigación.

9. ANEXOS

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INFORMACION
PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS
 (estaciones automáticas)

ESTACION : 85 23 MANZANILLO			Latitud: 09 ° 38 ' N Longitud: 82 ° 39 ' O Altitud. 80 m.s.n.m													
Elementos	Periodos		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total
LLUVIA	2005	2014	195.6	214.1	214.8	161.1	228.4	177.6	325.2	188.8	125.2	129.0	295.7	321.1	214.7	2576.7
TEM.MAX.	2005	2014	29.2	29.6	30.4	31.3	31.8	31.7	30.6	31.1	31.5	31.2	29.2	28.9	30.6	
TEM.MIN.	2005	2014	21.2	21.3	21.7	22.6	23.3	23.5	23.2	23.1	23.1	23.1	22.6	21.7	22.5	
TEM.MED.	2005	2014	25.2	25.6	26.1	27.0	27.5	27.6	26.9	27.1	27.3	27.1	25.8	25.3	26.5	
HUMEDAD	2005	2014	80.7	85.2	84.0	84.6	85.3	85.3	87.0	85.6	84.8	85.4	87.4	87.2	85.7	
VIENTO VEL.	2005	2014	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9	2.0	2.6	2.3	2.0	
RADIACION	2005	2014	8.7	11.9	14.2	12.0	14.2	13.3	12.1	13.1	15.1	11.5	9.9	8.9	12.1	
VIENTO DIR. PREDOMINANTE			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		224 Total
Promedio días con lluvia >= 0.1 mm.			18	19	17	15	18	18	23	19	17	18	22	21		

Figura A.1. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación Manzanillo

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INFORMACION
PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS
 (estaciones automáticas)

ESTACION : 72 149 SAN JOSE, PINILLA, AUT.			Latitud: 10 ° 15 ' N Longitud: 85 ° 50 ' O Altitud. 15 m.s.n.m													
Elementos	Periodos		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total
LLUVIA	2004	2014	5	9	3.8	23.0	176.7	155.6	157.6	245.4	287.1	419.8	100.7	10.0	131.7	1581.0
TEM.MAX.	2004	2014	33.1	34.0	34.3	34.6	32.5	31.3	31.7	31.2	30.7	29.6	30.9	32.1	32.2	
TEM.MIN.	2004	2014	23.5	24.1	24.6	25.0	24.2	23.6	23.4	23.2	23.2	23.1	22.7	22.6	23.6	
TEM.MED.	2004	2014	28.3	29.0	29.5	29.8	28.4	27.6	27.6	27.2	26.9	26.5	26.8	27.3	27.9	
HUMEDAD	2004	2014	61.6	58.5	58.9	64.4	77.1	83.3	80.9	84.6	86.8	87.5	78.7	69.6	74.3	
VIENTO VEL.	2004	2014	19.0	21.0	20.7	16.0	12.1	9.8	10.1	9.9	9.5	9.8	11.6	14.6	13.7	
RADIACION	2004	2014	22.1	22.5	19.8	22.0	17.6	17.3	15.5	17.1	16.3	16.0	13.4	19.3	18.2	
VIENTO DIR. PREDOMINANTE			2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2		135 Total
Promedio días con lluvia >= 0.1 mm.			1	1	2	4	14	18	18	20	22	25	9	2		

Figura A.2. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación San José, Pinilla

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INFORMACION
PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS
(estaciones automáticas)

ESTACION: 72 159 PAQUERA			Latitud: 09 ° 49 ' N Longitud: 84 ° 56 ' O Altitud. 10 m.s.n.m													
Elementos	Periodos		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total
LLUVIA	2002	2014	7.8	2.6	7.4	29.8	300.8	256.3	172.2	251.1	299.4	386.3	108.5	13.6	153.0	1835.6
TEM.MAX.	2002	2014	33.8	34.9	35.5	34.9	32.9	31.9	32.0	32.0	31.7	30.8	31.6	32.7	32.9	
TEM.MIN.	2002	2014	19.2	19.5	21.2	22.5	23.3	23.2	22.9	22.9	22.4	22.2	21.5	20.3	21.8	
TEM.MED.	2002	2014	26.5	27.2	28.3	28.7	28.1	27.6	27.5	27.4	27.0	26.5	26.6	26.5	27.3	
HUMEDAD	2002	2014	74.0	72.4	68.2	73.2	81.7	84.9	84.7	84.6	84.9	85.9	83.3	79.2	79.8	
VIENTO VEL.	2002	2014	2.8	5.2	9.3	3.3	3.9	2.2	2.7	2.8	2.8	2.7	2.4	2.5	3.5	
RADIACION	2002	2014	14.8	14.6	18.6	18.1	14.6	14.3	13.2	15.2	13.8	10.7	11.7	14.0	14.5	
VIENTO DIR. PREDOMINANTE			4	1	1	1	4	4	4	4	4	4	4	4		
Promedio días con lluvia >= 0.1 mm.			4	1	2	6	21	22	20	22	23	24	14	7	166	Total

Figura A.3. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación Paquera

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INFORMACION
PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS
(estaciones automáticas)

ESTACION : 84 139 CIGEFI, AUT.			Latitud: 09 ° 56 ' N Longitud: 84 ° 02 ' O Altitud. 1210 m.s.n.m													
Elementos	Periodos		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total
LLUVIA	1999	2014	11.3	9.5	11.2	56.1	232.2	257.2	198.6	244.2	325.6	302.8	140.7	38.7	152.3	1827.9
TEM.MAX.	1999	2014	23.4	24.2	25.2	26.0	26.3	26.2	25.4	25.9	26.5	25.8	24.3	23.6	25.2	
TEM.MIN.	1999	2014	15.4	15.5	15.8	16.6	17.3	17.3	17.1	16.9	16.7	16.8	16.5	15.8	16.5	
TEM.MED.	1999	2014	19.4	19.9	20.5	21.3	21.8	21.7	21.2	21.4	21.6	21.3	20.4	19.7	20.9	
HUMEDAD	1999	2014	79.1	77.8	77.5	78.2	83.9	84.8	84.1	84.7	85.1	86.0	83.9	81.2	82.2	
VIENTO VEL.	1999	2014	13.4	13.8	13.1	11.6	8.6	7.6	8.0	7.6	6.9	6.8	8.9	10.9	9.7	
RADIACION	1999	2014	13.9	16.8	16.0	16.2	14.6	13.2	13.7	14.7	14.8	13.1	11.8	12.3	14.3	
VIENTO DIR. PREDOMINANTE			2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2		
Promedio días con lluvia >= 0.1 mm.			5	3	4	10	22	23	22	24	25	26	20	9	193	Total

Figura A.4. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación CIGEFI

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INFORMACION
PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS
(estaciones automáticas)

ESTACION: 81 5 AEROP. LIMON			Latitud: 09 ° 57 ' N Longitud: 83 ° 01 ' O Altitud. 5 m.s.n.m													
Elementos	Periodos		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total
LLUVIA	1997	2014	326.9	217.3	224.7	234.8	351.7	227.9	425.8	217.7	102.5	158.3	420.1	438.0	278.8	3345.8
TEM.MAX.	1997	2014	28.6	28.9	29.2	29.7	30.1	30.3	29.6	30.0	30.6	30.4	29.0	28.6	29.6	
TEM.MIN.	1997	2014	21.0	21.0	21.5	22.2	23.0	23.1	22.8	22.8	22.7	22.7	22.2	21.5	22.2	
TEM.MED.	1997	2014	24.8	25.0	25.4	25.9	26.5	26.7	26.2	26.4	26.7	26.5	25.6	25.0	25.9	
HUMEDAD	1997	2014	87.6	86.1	85.2	85.3	87.1	87.4	88.6	87.6	85.8	86.4	88.2	88.3	87.0	
VIENTO VEL.	1997	2014	7.9	7.8	8.3	8.2	7.8	7.7	7.4	7.5	7.8	8.0	8.7	8.2	7.9	
RADIACION	1997	2014	14.2	14.6	17.9	16.2	15.9	13.6	13.2	12.8	17.7	15.7	12.6	12.1	14.7	
VIENTO DIR. PREDOMINANTE			6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6		
Promedio días con lluvia >= 0.1 mm.			21	16	18	17	19	18	23	16	14	18	21	22	222	Total

Figura A.5. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación Aeropuerto, Limón

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INFORMACION
PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS
(estaciones automáticas)

ESTACION: 78 27 PUNTARENAS			Latitud: 09 ° 58 ' N Longitud: 84 ° 49 ' O Altitud. 3 m.s.n.m													
Elementos	Periodos		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total
LLUVIA	2001	2014	3.2	2.5	2.2	31.7	220.9	183.5	116.8	180.2	231.4	293.5	80.2	22.8	114.1	1369.0
TEM.MAX.	2001	2014	30.2	31.1	31.5	30.9	29.9	29.3	29.3	29.3	28.9	28.1	28.6	29.4	29.7	
TEM.MIN.	2001	2014	23.9	24.2	24.9	25.4	24.8	24.0	23.8	23.8	23.5	23.3	23.6	23.6	24.1	
TEM.MED.	2001	2014	27.0	27.8	28.2	28.1	27.3	26.6	26.5	26.5	26.2	25.7	26.1	26.5	26.9	
HUMEDAD	2001	2014	70.0	67.6	67.2	72.4	79.6	82.4	81.7	82.8	83.7	85.2	80.6	75.5	77.4	
VIENTO VEL.	2001	2014	11.2	11.1	11.5	11.3	10.6	9.5	10.5	10.4	9.9	8.9	9.3	9.9	10.3	
RADIACION	2001	2014	19.0	19.5	20.2	20.7	17.1	16.5	16.1	17.0	17.9	16.5	16.7	17.1	17.9	
VIENTO DIR. PREDOMINANTE			5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5		
Promedio días con lluvia >= 0.1 mm.			1	1	1	4	17	19	17	19	21	22	12	5	138	Total

Figura A.6. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación Puntarenas

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INFORMACION
PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS
(estaciones automáticas)

ESTACION: 84 195 AEROP.PAVAS OESTE

Latitud: 09 ° 57 ' N Longitud: 84 ° 08 ' O Altitud. 997 m.s.n.m

Elementos	Periodos		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total
LLUVIA	1995	2014	10.2	12.8	11.7	66.5	223.3	204.3	157.8	205.3	289.1	286.5	127.4	29.7	135.4	1624.6
TEM.MAX.	1995	2014	26.1	26.9	27.8	28.6	27.9	27.5	27.1	27.4	27.3	26.5	26.1	26.1	27.1	
TEM.MIN.	1995	2014	18.1	18.1	18.3	19.0	19.1	18.9	19.1	18.8	18.3	18.4	18.5	18.4	18.6	
TEM.MED.	1995	2014	22.1	22.5	23.1	23.8	23.5	23.2	23.1	23.1	22.8	22.4	22.3	22.2	22.8	
HUMEDAD	1995	2014	68.6	67.0	66.7	68.7	77.8	80.3	77.3	78.7	83.3	84.3	78.4	71.9	75.3	
VIENTO VEL.	1995	2014	22.5	22.1	20.8	17.8	12.6	10.9	13.2	11.8	8.9	9.3	13.9	19.1	15.2	
RADIACION	1995	2014	14.8	15.8	16.5	15.9	12.5	12.3	12.8	12.4	12.2	11.8	10.8	12.6	13.4	
PRESION	1999	2015	902.7	902.6	902.4	902.3	902.2	902.2	902.5	902.4	902.3	902.0	901.7	902.4	902.3	

VIENTO DIR. PREDOMINANTE	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		Total
Promedio días con lluvia >= 0.1 mm.	3	4	4	9	21	22	20	22	25	25	18	8	182		

Figura A.7. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación Aeropuerto, Pavas Oeste

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INFORMACION
PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS
(estaciones automáticas)

ESTACION : 84 169 AEROP. JUAN SANTAMARIA, MEDIA																	Latitud: 09 ° 59 ' N Longitud: 84 ° 10 ' O Altitud. 913 m.s.n.m																
Elementos		Periodos		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total																
LLUVIA	1999	2014	7.4	12.5	16.6	68.7	255.4	218.9	144.8	224.8	316.9	299.7	148.5	29.4	145.3	1743.4																	
TEM.MAX.	1999	2014	28.2	29.0	29.9	30.2	28.9	28.3	28.3	28.3	27.8	27.2	27.3	27.8	28.4																		
TEM.MIN.	1999	2014	18.5	18.5	18.7	19.2	19.0	18.9	19.1	18.7	18.2	18.4	18.4	18.4	18.7																		
TEM.MED.	1999	2014	23.4	23.8	24.3	24.7	23.9	23.6	23.7	23.5	23.0	22.8	22.8	23.1	23.6																		
HUMEDAD	1999	2014	63.6	61.1	61.9	66.4	79.3	82.7	78.9	80.7	85.8	87.0	79.9	70.1	74.8																		
VIENTO VEL.	1999	2014	22.0	22.6	20.5	16.5	11.3	10.2	12.2	10.7	9.1	9.1	12.3	17.2	14.5																		
RADIACION	1999	2014	19.8	21.6	21.9	19.4	16.2	15.0	15.4	15.6	15.8	14.5	15.0	16.7	17.2																		
VIENTO DIR. PREDOMINANTE			3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3																		
Promedio días con lluvia >= 0.1 mm.			2	3	4	10	21	22	20	22	26	25	17	8	179	Total																	

Figura A.8. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación Aeropuerto, Juan Santamaría

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INFORMACION
PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS
(estaciones automáticas)

ESTACION : 84 141 IMN, ARANJUEZ

Latitud: 09 ° 56 ' N Longitud: 84 ° 04 ' O Altitud. 1181 m.s.n.m

Elementos	Periodos		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total
LLUVIA	1995	2014	10.1	13.0	11.7	50.0	236.5	238.9	179.7	218.9	315.2	282.5	134.3	29.7	143.4	1720.6
TEM.MAX.	1995	2014	22.8	23.4	24.5	25.5	26.1	26.2	25.4	25.8	26.4	25.4	24.0	23.2	24.9	
TEM.MIN.	1995	2014	16.3	16.4	16.7	17.5	18.1	18.0	18.0	17.9	17.6	17.5	17.3	16.8	17.3	
TEM.MED.	1995	2014	19.6	19.9	20.6	21.5	22.1	22.1	21.7	21.8	22.0	21.5	20.6	20.0	21.1	
HUMEDAD	1995	2014	74.7	73.5	72.6	73.0	78.4	79.4	77.9	78.4	80.4	82.0	79.8	76.4	77.2	
VIENTO VEL.	1995	2014	13.6	13.2	13.1	11.8	8.5	7.5	8.7	7.9	6.6	6.8	9.5	11.9	9.9	
RADIACION	1995	2014	12.5	14.4	16.8	16.9	13.2	11.3	11.5	12.1	12.3	10.9	9.6	10.7	12.7	
PRESION	1998	2015	882.3	882.3	882.0	882.0	882.0	882.1	882.3	882.1	882.1	881.9	881.7	882.2	882.1	

VIENTO DIR. PREDOMINANTE	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3		Total
Promedio días con lluvia >= 0.1 mm.	4	3	4	9	21	21	21	23	24	25	18	7	178	

Figura A.9. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación IMN, Aranjuez

INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INFORMACION
PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS
(estaciones automáticas)

ESTACION : 100 3 GOLFITO, AUT.			Latitud: 08 ° 38 ' N Longitud: 83 ° 10 ' O Altitud. 6 m.s.n.m													
Elementos	Periodos		Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Prom.	Total
LLUVIA	1998	2014	141.4	126.3	177.3	233.8	459.9	369.6	406.5	419.9	482.7	569.0	500.8	285.4	347.7	4172.6
TEM.MAX.	1998	2014	29.5	29.8	30.1	29.9	29.4	29.2	29.1	29.0	28.8	28.1	28.1	28.8	29.2	
TEM.MIN.	1998	2014	23.2	23.4	23.9	24.1	23.8	23.7	23.5	23.4	23.3	23.2	23.3	23.2	23.5	
TEM.MED.	1998	2014	26.3	26.6	27.0	27.0	26.6	26.4	26.3	26.2	26.1	25.6	25.7	26.0	26.3	
HUMEDAD	1998	2014	85.8	84.1	84.4	86.5	88.8	88.4	88.8	89.3	89.5	90.9	91.0	88.7	88.0	
VIENTO VEL.	1998	2014	6.3	6.7	6.7	6.0	5.5	5.3	5.3	5.7	5.7	5.2	5.0	5.5	5.7	
RADIACION	1998	2014	17.4	19.1	19.8	16.3	13.3	12.2	13.5	13.5	13.4	12.4	13.7	15.0	15.0	
VIENTO DIR. PREDOMINANTE			1	1	1	1	1	1	9	1	9	9	1	1		
Promedio días con lluvia >= 0.1 mm.			15	12	16	17	24	23	26	26	27	28	27	22	263	Total

Figura A.10. Información provista por el instituto meteorológico nacional, estación Golfito