

# Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Mecánica

## TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Evaluación y Caracterización de Recubrimientos Reflectivos para Techos  
y su Comportamiento Térmico en Climas Cálidos, Templados y Fríos**

presentada por

**Ing. María de Lourdes Chávez Manzo**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestra en Ciencias en Ingeniería Mecánica**

Directora de tesis  
**Dra. Gabriela del Socorro Álvarez García**

Codirector de tesis  
**Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor**

Cuernavaca, Morelos, México. Febrero de 2016.

Cuernavaca, Mor., 2 de febrero de 2016  
OFICIO No. SAC/084/2016

**Asunto:** Autorización de impresión de tesis

**ING. MARÍA DE LOURDES CHÁVEZ MANZO**  
**CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS**  
**EN INGENIERÍA MECÁNICA**  
**PRESENTE**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Evaluación y Caracterización de Recubrimientos Reflectivos para Techos y su Comportamiento en Climas Cálidos, Templados y Fríos”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

“CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO”



**DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**



GENTRO NACIONAL DE  
INVESTIGACION Y  
DESARROLLO  
TECNOLÓGICO  
SUBDIRECCIÓN  
ACADEMICA

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Expediente

GVGR/mcr





Cuernavaca, mor., 26/enero/2016

OFICIO No. DIM/046//2016  
Asunto: Aceptación de documento de tesis

**C. DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ**  
**SUBDIRECTOR ACADÉMICO**  
**PRESENTE**

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la C. Ing. María de Lourdes Chávez Manzo, con número de control M13CE041, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "Evaluación y caracterización de recubrimientos reflectivos para techos y su comportamiento en climas Cálidos, templados y fríos". Hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

DRA. GABRIELA DEL SOCORRO ALVAREZ G.  
Doctora en Ingeniería  
2105850

REVISOR 1

DRA. YVONNE CHÁVEZ CHENA  
Doctora en Ciencias en Ingeniería Mecánica  
7492003

REVISOR 2

DR. EFRAÍN SIMÁ MOO  
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica  
6601954

REVISOR 3

M.C. JORGE ANTONIO ROJAS MENÉNDEZ  
Maestría en Ingeniería Mecánica  
0683803

C.p. (Lic. Guadalupe Garrido Rivera).- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.  
Estudiante  
Expediente

Iniciales AAP/mrsr





# Dedicatoria

## ***A mis padres***

*Por haberme brindado apoyo en cada etapa de mi vida, lo que me ha motivado a seguir adelante, por sus consejos, por su ejemplo y sobre todo por su amor incondicional.*

*A mis hermanos porque siempre han estado conmigo compartiendo grandes momentos a lo largo de mi vida, son también mis amigos, confidentes y cómplices, los amo. **José, Javier y Tere***

*A mis sobrinas porque son el futuro de nuestra familia, por brindarnos de dicha y felicidad a todos los miembros de la familia, las adoro pequeñas. **Andre y Sofi***

*A mi compañero de vida **Marlon Hernández**, por su amor, apoyo y comprensión que me brinda día a día para la culminación de mis metas tanto en el ámbito académico como en el personal. Admiró tus ganas de superarte y tú gran corazón. Te amo*

*A mis amigos porque siempre han estado conmigo en las diferentes etapas de mi vida, gracias por las alegrías, por los buenos momentos y sobre todo por mostrarme lo maravillosos que son por fuera y por dentro. Con gran admiración **Kary, Tita, Alma, Jazz, Equihua, Ñupe, Humberto, Ivan-sito, Cheto, Roger, Dani, Ara, Roberto y Mexi.***



*Si quieres cambiar al mundo, cámbiate a ti mismo. La verdad es totalmente interior. No hay que buscarla fuera de nosotros ni querer realizarla luchando con violencia con enemigos exteriores.*

**Gandhi**

*El problema del hombre no está en la bomba atómica, sino en su corazón.*

**Albert Einstein**



# Agradecimientos

*Agradezco a mis padres por ser una fuente inagotable de amor infinito y por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, por su cariño, enseñanzas, pero sobre todo por darme el regalo más grande: la vida. Los amo Lourdes y Javier.*

*A mis hermanos por su apoyo a lo largo de esta etapa de mi vida y en general por estar conmigo en cada momento, son mi adoración Tere, Javier y José.*

*A toda mi familia, a mis abuelos Manuel y Sara; a mis tíos: Manuel, Mario, Ramón, Sergio, Martha, Geno, Mary, Concha, Toño, así como a todos sus hijos, que son para mí una gran alegría y fuentes de inspiración, tengo una familia maravillosa a la que amo con todo mi corazón gracias por todas las vivencias compartidas, risas y sobre todo por esa calidez con la que siempre me reciben, los amo.*

*A la Dra. Gabriela del Socorro Álvarez García mi directora de tesis, por guiarme a lo largo de este proceso y a mi co-asesor el Dr. Jesús P. Xamán Villaseñor por compartir sus conocimientos y experiencia para poder culminar el presente trabajo, he aprendido mucho de él tanto académica como humanamente, es un gran ser humano.*

*Al jurado revisor de este proyecto por sus comentarios y sugerencias a lo largo de este proyecto: Jorge Antonio Rojas Menéndez, Yvonne Chávez Chena y Efraín Sima Moo.*

*A mis amigos y compañeros de laboratorio, por compartir este espacio y apoyarme en todo momento en lo que a mi proyecto se refiere, además agradezco los momentos compartidos, las risas, los chistes, las enseñanzas, Iván Hernández, Ivette Zavala, Roberto Alvarado, Irving Hernández, Miguel Xamán y Martín.*

*A mis amigos y compañeros de generación por estar conmigo durante esta etapa compartiendo grandes momentos y apoyo para lograr concluir esta etapa, pero sobre todo por su amistad Roger Cundapí y Polar. El amigo ama en todo momento; en tiempos de angustia es como un hermano. (Proverbios 17:17), Roger gracias por siempre estar ahí, por tu apoyo incondicional en todas las áreas de mi vida.*

*Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por darme la oportunidad de continuar con mi formación académica.*

*Al Instituto de Energías Renovables de la UNAM, por permitirme utilizar su infraestructura, que me permitió concluir con mi trabajo de Tesis.*

*Al Dr. Jorge A. Rojas Menéndez y a Iris Santos González por brindarme su tiempo dedicado para esclarecer mis dudas y su apoyo en las mediciones de emisividad. Además de mostrarme su gran calidad humana, son unas personas increíbles.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado.*

*Al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) por brindarme los datos meteorológicos necesarios para culminar este proyecto de Tesis.*

# Contenido

<b>Resumen</b>	<b>v</b>
<b>Abstract</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>xii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Estado del Arte . . . . .	8
1.1.1. Estudios Experimentales . . . . .	8
1.1.2. Estudios Teóricos . . . . .	10
1.1.3. Estudios Teórico - Experimentales . . . . .	14
1.1.4. Materiales para Recubrimientos Reflectivos . . . . .	16
1.1.5. Conclusiones del Estado del Arte . . . . .	17
1.2. Justificación . . . . .	18
1.3. Objetivo General . . . . .	18
1.3.1. Objetivos Específicos . . . . .	18
1.4. Alcances . . . . .	19
1.5. Contenido de la Tesis . . . . .	19
<b>2. Fundamentos Teóricos</b>	<b>21</b>
2.1. El Sol como Elemento de la Edificación . . . . .	21
2.2. Transferencia de Calor en Techos . . . . .	22
2.2.1. Radiación . . . . .	23
2.2.2. Conducción . . . . .	26
2.2.3. Convección . . . . .	28
2.3. Techo . . . . .	29
2.3.1. Recubrimiento Reflectivo . . . . .	30
2.4. Clima . . . . .	31

<b>3. Metodología de Medición de la Reflectancia y Emisividad</b>	<b>37</b>
3.1. Estándares de Medición . . . . .	39
3.2. Equipo . . . . .	39
3.3. Experimento . . . . .	42
3.3.1. Elaboración de la Pintura e Impermeabilizante de Nopal	44
3.3.2. Preparación de las Muestras para la Medición de la Reflectancia . . . . .	47
3.3.3. Procedimiento para la medición de la reflectancia . . . . .	49
3.3.4. Cálculo de la RST . . . . .	51
3.3.5. Preparación de las Muestras para la Medición de la Emisividad . . . . .	51
3.3.6. Procedimiento de Medición de la Emitancia . . . . .	52
3.3.7. Medición del Envejecimiento . . . . .	53
3.4. Resultados de las Mediciones RR . . . . .	54
3.4.1. Verificación de las Mediciones . . . . .	54
3.4.2. Recubrimientos Blancos . . . . .	56
3.4.3. Recubrimientos Azules . . . . .	61
3.4.4. Recubrimientos Rojos . . . . .	63
3.5. Emisividad . . . . .	66
3.6. SRI . . . . .	67
3.7. Envejecimiento de los Recubrimientos Reflectivos . . . . .	68
3.7.1. RR Blancos . . . . .	69
3.7.2. RR Azules . . . . .	71
3.7.3. RR Rojos . . . . .	73
<b>4. Modelo Físico y Matemático para el Techo</b>	<b>77</b>
4.1. Modelo Físico del Techo . . . . .	78
4.2. Modelo Matemático . . . . .	80
4.2.1. Condiciones de Frontera . . . . .	80
4.3. Método de Solución: Ecuación de Conducción de Calor . . . . .	82
4.3.1. Generación de Malla Computacional . . . . .	83
4.3.2. Discretización de la Ecuación de Conducción de Calor . . . . .	84
4.3.3. Algoritmo LGS ADI . . . . .	86
4.3.4. Discretización de las Condiciones de Frontera . . . . .	87
4.3.5. Verificación del Código . . . . .	91
4.3.6. Independencia de Malla Espacial . . . . .	92

<b>5. Resultados</b>	<b>95</b>
5.1. Estudio Paramétrico de los Recubrimientos Reflectivos . . . .	95
<b>6. Conclusiones</b>	<b>163</b>
6.1. Sugerencias a trabajos futuros . . . . .	164



# Resumen

Un techo reflectivo se refiere un techo ordinario con un recubrimiento reflectivo (RR) en su superficie exterior asimismo se caracterizan por su alta reflectancia solar y emitancia térmica. A pesar de sus beneficios, la tecnología de techos reflectivos es poco conocida en México, existe poca información sobre sus propiedades superficiales (reflectancia y emitancia) de los recubrimientos reflectivos disponibles en el país, tampoco se cuenta con métodos de prueba validados. En este trabajo se reporta la metodología y la medición de la reflectancia espectral y la emitancia térmica de catorce recubrimientos reflectivos (blanco, azul y rojo), nueve están disponibles en el mercado mexicano, dos están en proceso de fabricación y tres son ecológicos de elaboración propia con baba de nopal. Además de eso se reporta su envejecimiento que se midió durante seis meses para observar el efecto de las condiciones climáticas. Para la medición de la reflectancia y emisividad se utilizó un espectrofotómetro con esfera de integración y un emisómetro respectivamente. Los resultados indican que los recubrimientos con microesferas de expandel tienen la mayor reflectancia solar con un valor de 0.86, 0.54 y 0.37 para el recubrimiento blanco, azul y rojo, correspondientemente. Por lo que se refiere a los impermeabilizantes elaborados con baba de nopal se concluyó que no son reflectivos porque su reflectancia es menor a 0.70. En cuanto a la emitancia térmica sus valores oscilan entre los valores de 0.82 y 0.91.

También se reporta la metodología y solución del modelo matemático de un techo simple de concreto y uno compuesto de dos capas, concreto y aislante, ambos con y sin recubrimiento reflectivo con el fin de evaluar su comportamiento térmico en seis regiones climáticas características de la República Mexicana seleccionadas con base en el INEGI estas fueron: la Cd. de México, Villahermosa, Hermosillo, Monterrey, Xalapa y Mérida.

En el presente trabajo se reportan los resultados del estudio paramétrico, en el que se concluyó que para climas cálidos como Villahermosa y Mérida es conveniente utilizar recubrimientos reflectivos blancos para disminuir las cargas térmicas de enfriamiento en verano, sin embargo en climas templados no es necesario implementar recubrimientos reflectivos blancos, porque con la implementación de un recubrimiento azul no se incrementan considerablemente sus temperaturas en verano y en invierno las temperaturas se mejoran considerablemente. En cuanto a los climas fríos sería recomendable utilizar un RR rojo.

# Abstract

A reflective roof is an ordinary roof with a cool coating on its outer surface, it is characterized for its high solar reflectance and thermal emittance. In spite of its benefits, this technology is not well known in Mexico and there exist little information about their surface properties (reflectance and emittance) for the cool coatings available in the country, non of them have test methods. In this work it was measured the reflectance and emittance of fourteen cool coatings (white, blue and red), nine are available in the Mexican market, two are not available yet and three are ecological from our own elaboration with nopal slime. Besides that, the agig effect on these coatings is reported, that was measured for six months to observe the effect of weather conditions. The reflectance and emittance were measured with a spectrophotometer (with an integration sphere) and an emisometer respectively. The results showed that the coatings with hollow plastic microspheres have the highest solar total reflectance for the white, blue and red coating of 0.86, 0.54 and 0.37 respectively. The nopal slime waterproof coating reflectance was found to be less than 0.7, then it can not be considered as a reflective coating.

Methodology and solution of the mathematical model for simple roof and compound with and without cool coating are also reported in order to evaluate their thermal behavior in six characteristic climatic regions from Mexican Republic selected based on the INEGI these were: Mexico city, Villahermosa, Hermosillo, Monterrey, Xalapa and Merida.

In this work it was reported the results of parametric study, in which was concluded that for hot climates like Villahermosa and Merida is desirable to use white cool coatings to decrease the thermal cooling loads in summer, however in temperate climates it isn't necessary to use white cool roofs, be-

cause with a blue reflective coating the summer temperatures do not rise and in winter the temperatures are considerably improved. As for cold climates it is advisable to use a red RR .

# Lista de Figuras

1.1. Porcentaje de viviendas con materiales durables en techos, 1970 a 2010 (INEGI, 2011). . . . .	3
1.2. Fenómeno de la Isla de Calor Urbana (ICU) [1]. . . . .	4
1.3. Clasificación de los techos realizada por Sanjai y Chand en el 2014. . . . .	5
1.4. Distribución de la radiación solar espectral normalizada para el intervalo de 250 a 2500 nm. . . . .	6
1.5. Efecto Albedo.[2] . . . . .	7
2.1. Mecanismos de transferencia de calor en un techo. . . . .	22
2.2. a) Radiación espectral de un cuerpo negro, gris y una superficie real. b) Radiación direccional de un cuerpo negro, gris y una superficie real. . . . .	24
2.3. Radiación incidente, reflejada y absorbida en términos de las propiedades de radiación totales. a) Cuerpo Transparente, b) Cuerpo opaco. . . . .	24
2.4. Efecto albedo para un edificio con un recubrimiento negro y blanco. . . . .	30
2.5. Distribución y clasificación de los climas en México reportados por el INEGI. . . . .	32
2.6. Climas . . . . .	34
2.7. Climas (2da. Parte) . . . . .	35
3.1. Espectrofotómetro Shimadzu Modelo UV-3101PC. . . . .	40
3.2. Esfera de Integración. . . . .	40
3.3. Sistema Óptico. . . . .	41
3.4. Equipo de Medición. . . . .	42
3.5. Vista inferior del detector. . . . .	42

3.6. Reflexión Especular y Difusa. . . . .	44
3.7. Materiales para la elaboración de la pintura de nopal. . . . .	45
3.8. Materiales para la elaboración del recubrimiento IMPERPAL. . . . .	46
3.9. Recubrimientos comerciales. . . . .	48
3.10. Muestras de los recubrimientos para la medición de la reflectancia. . . . .	49
3.11. UVPROBE. . . . .	50
3.12. UVPROBE procedimiento. . . . .	51
3.13. Muestras utilizadas para la medición de la emitancia. . . . .	52
3.14. Ubicación de los patrones de alta y baja emitancia sobre el disipador. . . . .	52
3.15. Reflectancia espectral para el RR Thermotek Doble Acción. . . . .	55
3.16. Reflectancia espectral para los RR blancos comerciales. . . . .	57
3.17. Reflectancia espectral para los recubrimientos elaborados con de baba de nopal. . . . .	58
3.18. Reflectancias espectrales para los recubrimientos blancos. . . . .	60
3.19. RST de los recubrimientos blancos. . . . .	61
3.20. Reflectancia espectral para los RR azules. . . . .	63
3.21. Reflectancia espectral para los recubrimientos rojos. . . . .	65
3.22. Envejecimiento de los RR blancos del 10 de diciembre al 10 junio del 2015. . . . .	70
3.23. Envejecimiento de los RR blancos. . . . .	71
3.24. Envejecimiento de los RR azules DEL 10 de diciembre al 10 de junio del 2015. a) con microesferas de expancel y b) Normal . . . . .	72
3.25. Envejecimiento de los RR rojos. . . . .	74
3.26. RST para los RR rojos en el periodo del 10 de diciembre al 10 de junio del 2015. . . . .	74
4.1. Modelos físico, a) techo simple y b) techo compuesto. . . . .	78
4.2. Condición de frontera del caso de estudio. . . . .	83
4.3. Malla bidimensional para el caso de estudio. . . . .	84
4.4. Modelo físico. . . . .	91
4.5. Comparación de las isotermas para un sistema compuesto. . . . .	92
5.1. Temperatura y flujo de calor del sistema simple del techo de concreto sin RR. a) 3 de junio del 2014 y b) 27 de diciembre del 2014. . . . .	99

---

5.2. Temperatura y flujo de calor de los RR Blancos para el clima de Hermosillo. a) para el el 3 de junio del 2014 y b) el 27 de diciembre del 2014. . . . .	101
5.3. Temperatura y Flujo de calor de los RR de color (rojos y azules). a) para el día más cálido de junio y b) el día más frío de diciembre del 2014 . . . . .	105
5.4. Temperatura y flujo de calor de los del techo de concreto con y sin RR para el 27 de abril del 2014. . . . .	109
5.5. Temperatura y flujo de calor del techo de concreto con y sin RR para el día 29 de enero del 2014. . . . .	111
5.6. Temperatura y flujo de calor para el techo de concreto con y sin RR para el día 28 de abril del 2014. . . . .	113
5.7. Temperatura y flujo de calor para el techo con y sin RR para el día 16 de enero del 2014. . . . .	115
5.8. Temperatura y flujo de calor del techo con RR (blanco, azul y rojo)y del techo de concreto sin RR para el día 14 de abril del 2014. . . . .	116
5.9. Temperatura y flujo de calor del techo con un RR blanco, azul y rojo y de concreto sin RR para el día 18 de enero del 2014. .	119
5.10. Temperatura y flujo de calor para el techo con un RR blanco, azul y rojo y sin RR para el día 28 de abril del 2014. . . . .	122
5.11. Temperatura y flujo de calor de los RR (Blanco, Azul y Rojo)y del techo de concreto sin RR para el día 30 de enero del 2014. .	124
5.12. Temperatura y flujo de calor de los RR (Blanco, Azul y Rojo)y del techo de concreto sin RR para el día 7 de abril del 2014. .	127
5.13. Temperatura y flujo de calor de los RR (Blanco, Azul y Rojo)y del techo de concreto sin RR para el día 17 de enero del 2014. .	129
5.14. Temperatura y flujo de calor del techo compuesto de concreto sin RR para el día más cálido y frío. a) 3 de junio del 2014 y b) 27 de diciembre del 2014. . . . .	133
5.15. Temperatura y flujo de calor del techo con los RR blancos para el día más cálido y más frío en el 2014 para Hermosillo . a) 3 de junio y b) 27 de diciembre. . . . .	135
5.16. Temperatura y flujo de calor del techo con los RR de color (rojos y azules) para el día más cálido y más frío del año 2014 a) 3 de junio y b) 27 de diciembre. . . . .	139
5.17. Temperatura y flujo de calor del techo compuesto con y sin RR para el 27 de abril del 2014. . . . .	142

---

5.18. Temperatura y flujo de calor para el techo compuesto con y sin RR para el día el 29 de enero del 2014. . . . .	144
5.19. Temperatura y flujo de calor de los RR seleccionados para el techo compuesto con y sin RR para el día 28 de abril del 2014.	146
5.20. Temperatura y flujo de calor de los RR (Blanco, Azul y Rojo)y del techo de concreto sin RR para el día 16 de enero del 2014.	149
5.21. Temperatura y flujo de calor del techo con y sin RR el día 14 de abril del 2014. . . . .	151
5.22. Temperatura y flujo de calor del techo con y sin RR para el día 18 de enero del 2014. . . . .	153
5.23. Temperatura y flujo de calor de los RR (Blanco, Azul y Rojo)y del techo de concreto sin RR para el día 28 de abril del 2014. .	155
5.24. Temperatura y flujo de calor para el techo de concreto con y sin RR para el día 30 de enero del 2014. . . . .	157
5.25. Temperatura y flujo de calor para el techo con y sin RR para el día 7 de abril del 2014. . . . .	159
5.26. Temperatura y flujo de calor para el techo con y sin RR para el día 17 de enero del 2014. . . . .	161

# Nomenclatura

$\epsilon$	Emisividad
$\rho_s$	Reflectancia solar
$\rho_{nir}$	Reflectancia solar del espectro infrarrojo
$\rho_{uv}$	Reflectancia solar del espectro ultravioleta
$\rho_{vis}$	Reflectancia solar del espectro visible
$a_P, a_E, a_W, a_N, a_S$	Coefficiente de la ecuación discretizada
$C_p$	Calor específico, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$G$	Radiación Solar
$h_{int}$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo interior, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
$h_{out}$	Coefficiente de transferencia de calor convectivo exterior, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
$H_x$	Espesor del techo, m
$H_y$	Ancho del techo, m
$k$	Conductividad térmica, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$Q_{conv,int}$	Flujo convectivo interior, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
$Q_{prom,ext}$	Flujo de calor promedio exterior, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$

$Q_{prom,int}$	Flujo de calor promedio interior, $W m^{-1} K^{-1}$
$Q_{Total,ext}$	Flujo de calor total de la superficie exterior, $W m^{-2}$
$T$	Temperatura, $^{\circ}C$
$T_{amb}$	Temperatura ambiente, $^{\circ}C$
$T_{amb,max}$	Temperatura ambiente máxima, $^{\circ}C$
$T_{prom,ext}$	Temperatura superficial exterior promedio, $^{\circ}C$
$T_{prom,int}$	Temperatura superficial interior promedio, $^{\circ}C$
$T_{sext}$	Temperatura de la superficie exterior, $^{\circ}C$
$T_{sext,max}$	Temperatura de la superficie exterior máxima, $^{\circ}C$
$T_{sint}$	Temperatura de la superficie interior, $^{\circ}C$
$T_{sint,max}$	Temperatura de la superficie interior máxima, $^{\circ}C$
$T_{sky}$	Temperatura del cielo, $^{\circ}C$
$V$	Velocidad del viento, $m s^{-1}$
$x, y$	Coordenadas dimensionales, m

# Capítulo 1

## Introducción

La eficiencia energética ha sido una preocupación en los recientes años. Los países industrializados han adoptado un estilo de vida basado en el excesivo uso de los combustibles fósiles y fuentes de energía no renovables de modo que han causado una crisis económica y social.

La Agencia Internacional de Energía (*IEA*, por sus siglas en inglés) en el 2014 señaló, que más del 41 % de la electricidad global proviene del carbón, petróleo y gas natural. Así pues del 40 % de esta energía es destinado al sector residencial y comercial.

En un país desarrollado como Estados Unidos, la energía consumida en los edificios es de alrededor de 64.66 GW anuales por espacios acondicionados [3]. Este es uno de los factores por los que se considera importante desarrollar tecnología para efficientar los sistemas de acondicionamiento, mejorar las estrategias para la eficiencia energética en los edificios que a su vez mejoren las condiciones de confort sobre todo en verano, así como la reducción del consumo energético. Estas estrategias por si solas no resuelven los problemas en materia de eficiencia energética, pero son una parte importante y esencial.

No obstante el consumo energético en el sector residencial representa el 25.19 % del consumo energético en México [4]. Según la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) se estima que el consumo de energía eléctrica en casas-habitación para climas templados y cálidos se destina principalmente a los sistemas de iluminación (40 %) y sistemas de aire acondicionado respectivamente (44 %)[5].

También en México la Administración Pública Federal analizó 880 edificios de todo el país (más de 1000 m<sup>2</sup> de superficie) y encontró que alrededor del 80 % de estos, cuentan con sistemas de aire acondicionado. En la frontera norte más del 96 % de los edificios tienen sistemas de climatización, por lo que respecta al Distrito Federal cuyo clima no es extremo, el 62 % de los edificios cuentan con aire acondicionado. Se considera que los sistemas de aire acondicionado son muy recurrentes en México por lo tanto invertir en mejorar la envolvente de los edificios y reducir sus temperatura al interior sobre todo en verano es importante, esto se puede lograr con la aplicación de sistemas pasivos [5].

Al tener un pobre diseño de las edificaciones surgen problemas ambientales, como es el caso del incremento de las temperaturas al interior del edificio, por lo tanto se requiere mayor cantidad de inversión en equipos de enfriamiento sobretodo en climas cálidos, se deterioran los elementos de la envolvente más rápidamente e incrementa el efecto de la Isla de Calor Urbana (ICU) que se presenta sobre todo en las zonas urbanas, de manera se incrementan las temperaturas en la ciudad y al interior de los edificios. Con el fin de reducir el uso de energía y la emisión de CO<sub>2</sub>, es necesario reducir tanto como sea posible los requerimientos de energía en edificaciones. Por lo tanto, modificar los elementos de la envolvente (muros, techos y ventanas principalmente) puede contribuir a reducir este efecto.

Los materiales y la estructura de la envolvente de los edificios desempeñan un papel importante, ya que ellos absorben la radiación solar e infrarroja y disipan parte de este calor a través de los procesos de convección y radiación hacia la atmosfera, y a su vez contribuyen en el incremento de la temperatura ambiente. El comportamiento térmico de los materiales se determina principalmente por sus características superficiales, dónde la reflectancia solar y emisividad térmica juegan un papel importante.

Los materiales más utilizados para techos en México son los materiales sólidos <sup>1</sup>, que representaban el 71 % en el 2010 (Figura 1.1), sin embargo existen también techos de palapa, teja, asfalto, grava, ladrillo y cemento. Para

---

<sup>1</sup>Se consideraron materiales sólidos (durables) en los techos: losa de concreto, tabique o ladrillo; viguetas con bovedilla; y terrado con vigería. [6]

mejorar las características térmicas y físicas de los techos se han desarrollado nuevas tecnologías como los techos verdes y los RR, para la presente tesis se analizaran los segundos [6].

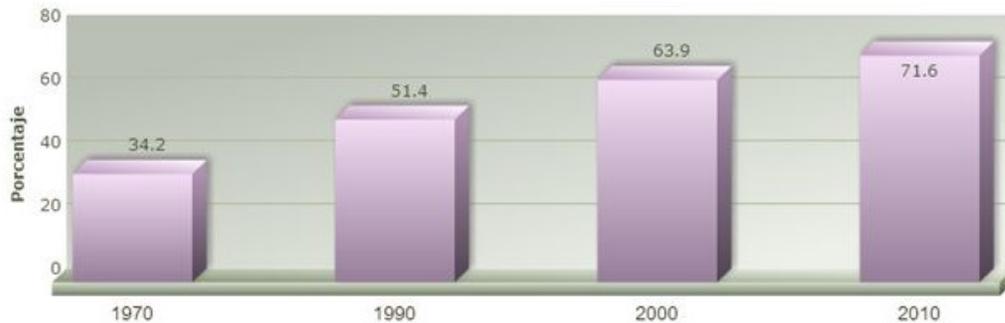


Figura 1.1: Porcentaje de viviendas con materiales durables en techos, 1970 a 2010 (INEGI, 2011).

El techo es un elemento fundamental en un edificio y el papel que juega es muy importante puesto que, puede llegar a representar hasta el 50 % o más de las ganancias de calor en su interior [7]. Al utilizar materiales tradicionales en techos las temperaturas superficiales están en un intervalo que va de los 50 a 90 °C en edificaciones [1], lo que trae consecuencias en las comunidades como: incrementos en la demanda energética, mayor potencial para caídas de tensión, incremento de las emisiones de las plantas energéticas, mayores temperaturas en las ciudades por el efecto de la Isla de Calor Urbana (ICU). Por estos motivos surge la necesidad de reemplazar estos materiales tradicionales (materiales calientes) con otros materiales que ayuden a la mitigación de estos problemas como son los RR.

El fenómeno conocido como la ICU durante el verano, causa incrementos en la temperatura promedio anual de entornos densamente construidos con respecto a las zonas suburbanas y rurales aledañas, con diferencia de la temperatura promedio anual del aire de hasta 3 °C con respecto a la de los alrededores y estas diferencias pueden llegar a ser de hasta 12 °C. Esto se originó por que se han modificado las zonas urbanas, lo que ha ocasionado una sustitución de la vegetación por superficies ampliamente construidas (generalmente carreteras y edificios con superficies pavimentadas) caracterizadas por una elevada absorción solar, alta impermeabilidad y propiedades

térmicas favorables para el almacenamiento de energía y la emisión de calor (Figura 1.2))[8],[9].

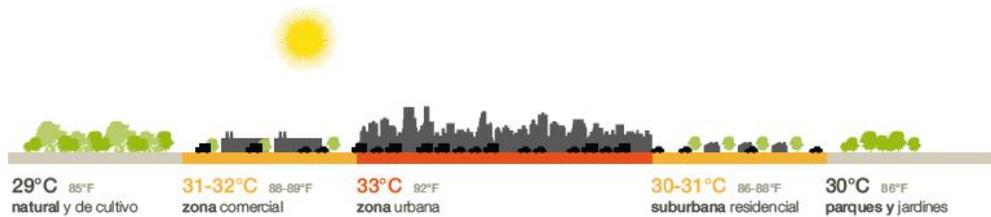


Figura 1.2: Fenómeno de la Isla de Calor Urbana (ICU) [1].

Un estudio del Laboratorio Nacional de Lawrence Berkeley (*LBNL*, por sus siglas en inglés) reveló que incrementar la reflectancia de los techos y otras superficies en las áreas metropolitanas podría reducir dramáticamente los costos de energía a nivel nacional [10].

Una forma de reducir las ganancias de calor en techos y reducir el efecto de la ICU es mediante la implementación de sistemas pasivos. En el 2014, Sanjai y Chand [11] realizaron una clasificación de las técnicas pasivas que se pueden implementar en techos. Clasificaron a los techos como arquitectónicos y no arquitectónicos. Los primeros hacen referencia a la geometría y la configuración del techo que contribuyen a la reducción de las ganancias de calor; los segundos se pueden utilizar independientemente de la geometría del techo, estas técnicas han recobrado importancia desde que se pueden aplicar en techos existente, en la Figura 1.3 se presenta más a detalle esta clasificación.

Los RR reflectivos se clasifican en blancos y de color, en el segundo de los casos existen en color, rojo, azul, verde, entre otros. Actualmente se está desarrollando tecnología para mejorar la reflectancia de los RR oscuros. Los investigadores han desarrollado complejos pigmentos inorgánicos que tienen color oscuro que tienen un valor alto de reflectancia en el espectro infrarrojo cercano (*NIR*). Como el óxido de cromo verde, azul cobalto, azul de ftalocianina, amarillo hansa que pueden ser explotados por los fabricantes de RR para techos porque reflejan más energía solar que los pigmentos utilizados

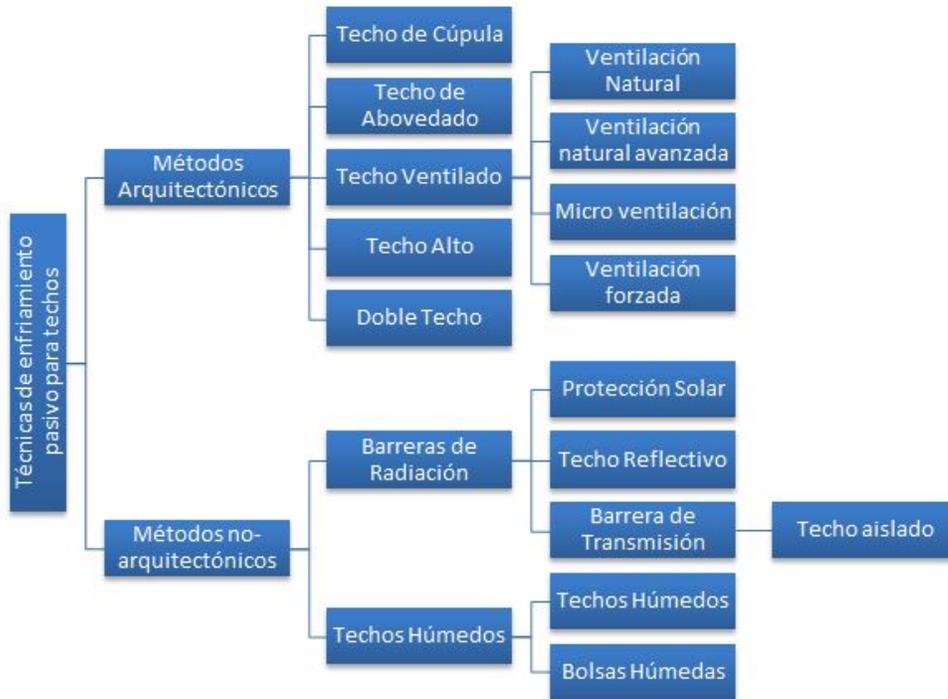


Figura 1.3: Clasificación de los techos realizada por Sanjai y Chand en el 2014.

convencionalmente [10].

Los recubrimientos de colores con pigmentos convencionales tienden a absorber en el *NIR* la radiación invisible que lleva más de la mitad de la potencia de la luz del sol (Figura 1.4)[12]. Por lo tanto se considera que reemplazar los pigmentos convencionales con pigmentos frescos que absorben menor radiación *NIR* puede mejorar el rendimiento de los recubrimientos de color.

El aislamiento térmico es indispensable para reducir las pérdidas de calor. En las regiones con climas frío es necesario el uso un aislamiento térmico conductivo, sin embargo en climas cálidos además de que es una opción más costosa impide el enfriamiento pasivo nocturno; en casas sin sistemas de aire acondicionado se reduce el confort térmico. Por lo tanto se considera que el uso de recubrimientos reflectivos son una solución simple y económica para

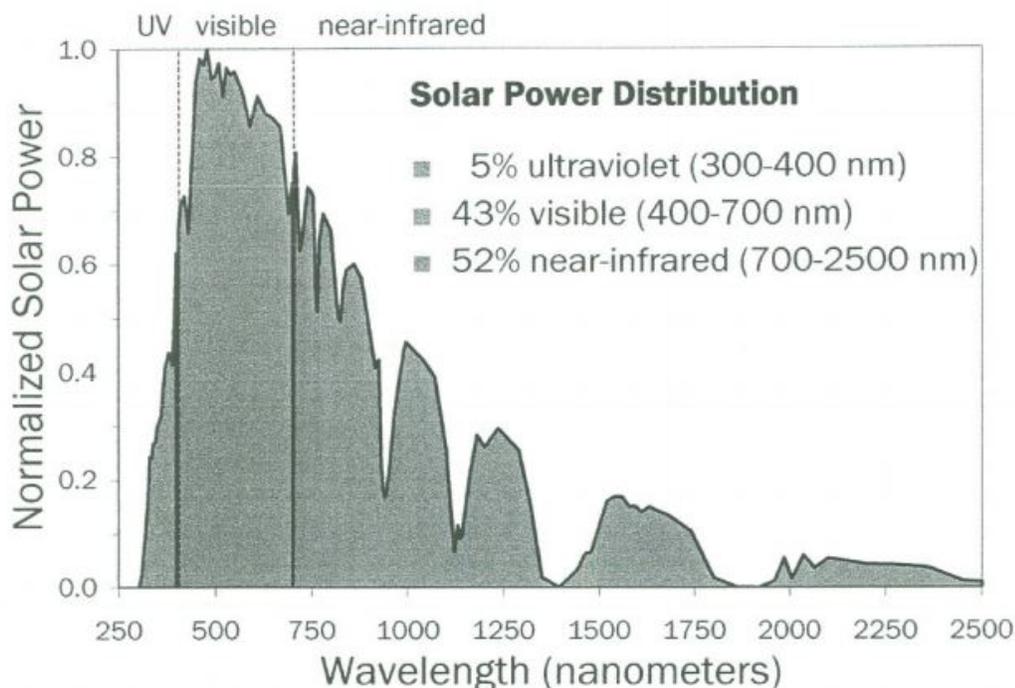


Figura 1.4: Distribución de la radiación solar espectral normalizada para el intervalo de 250 a 2500 nm.

reducir el consumo de energía en edificaciones.

En cumplimiento de ahorro de energía del edificio se ha prestado una mayor atención a las propiedades de los materiales de recubrimientos de construcción, como es el caso del aislamiento de los recubrimientos [10].

El presente trabajo comprende la caracterización de 14 RR de los cuales unos son ecológicos, otros comerciales y en proceso de fabricación. Se eligieron seis climas representativos de la República Mexicana con base en el INEGI con la finalidad de evaluar su comportamiento térmico en un techo simple y compuesto. Realizar las mediciones de estos recubrimientos se considera importante porque actualmente no se cuenta con mucha información sobre las propiedades superficiales de estos materiales en México.

Para el presente trabajo se seleccionaron los Recubrimientos Reflectivos

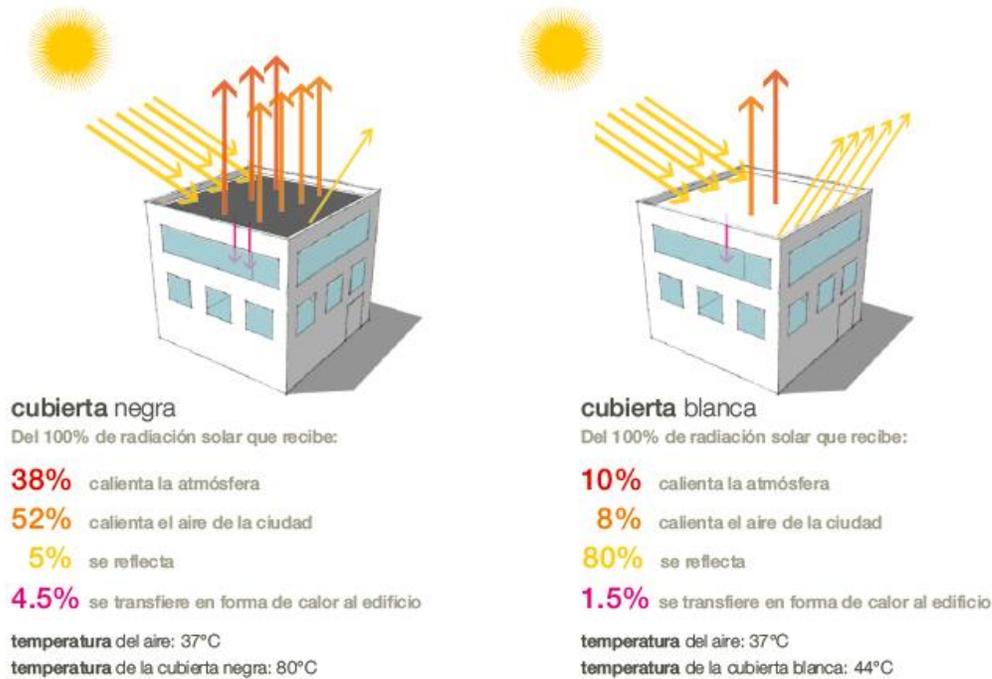


Figura 1.5: Efecto Albedo.[2]

(RR), también conocidos como cool roof, techos frescos, entre otros. Estos techos tienen la capacidad de permanecer más frescos bajo el Sol, su temperatura varía con base en las condiciones climáticas y el tipo de RR utilizado, pero usualmente los techos se calientan solo de 40 a 60 °C (Figura 1.5). Con esta técnica pasiva se puede contribuir significativamente en la reducción de los requerimientos energéticos para enfriamiento en edificaciones con sistemas de aire acondicionado, mejorar las condiciones de confort en edificios no climatizados y a su vez reducir el efecto de la ICU al mejorar el microclima de las zonas urbanas mediante la reducción de temperaturas superficiales y la del aire ambiente. Los RR se caracterizan por su valor alto de reflectancia y emitancia térmica [13].

La emisividad térmica y la reflectancia solar son los parámetros que nos permitirán realizar el estudio de los RR seleccionados, para su posterior implementación en un techo de concreto, al cual se le realizó un estudio de

conducción de calor bidimensional. Los RR se evaluaron en seis diferentes climas representativos de la República Mexicana con base en el INEGI. Esto con la finalidad de incrementar los criterios para la selección de un RR con base en las condiciones climáticas.

## 1.1. Estado del Arte

En este apartado se enuncia la relevancia del presente trabajo de investigación, la revisión bibliográfica, los objetivos, justificación y alcances del tema. En la primera parte del presente capítulo se muestran los antecedentes y la importancia de los recubrimientos reflectivos para techos y su aplicación que dio origen a este trabajo. Se dividieron los estudios del estado del arte en experimentales, teóricos y teóricos experimentales.

### 1.1.1. Estudios Experimentales

En este apartado se muestran los documentos revisados para estudios experimentales, en términos de su comportamiento térmico del techo.

En el 2015 Bin-Feng Yan *et al.* midieron la reflectancia de adoquines de concreto comprimido, las muestras fueron de 20 x 20 x 6 cm. Porque consideraron estos elementos afectan a la degradación gradual del medio ambiente porque la mayoría de estos materiales que se utilizan en las envolventes de los edificios están fabricados con materiales de baja reflectancia. Las mediciones se realizaron con un albedómetro y con dos actinógrafos. El actinógrafo se instaló sobre las muestras de ensayo, un conjunto señalando hacia el cielo y el otro hacia la muestra, Los datos de ambos actinógrafos se realizaron al mismo tiempo en conjunto con el albedómetro, el cual media la cantidad de radiación solar y reflectancia de la muestra de manera simultánea, lo que incrementó la precisión de las mediciones. Los resultados experimentales mostraron que la rugosidad y el pavimento de concreto comprimido son proporcionales a la reflectancia. Cuando la superficie de un material es lisa la reflectancia del material es mayor mientras que si la superficie es rugosa (por ejemplo, arenado, impermeabilización) la reflectancia del material es menor. Se concluyó que es mejor emplear materiales con superficie lisa en

la planificación de materiales de pavimentación urbanas con la finalidad de incrementar la reflectancia del material para reducir las temperaturas del ambiente urbano [14].

Pisello A.L. y Cotana F. (2014) realizaron un prototipo de una baldosa reflectiva (“cool tile”), para el que midieron su reflectancia y emitancia para determinar su Índice de Reflectancia Solar (*SRI*). Luego se implementó la baldosa reflectiva a un edificio residencial de tres pisos en el centro de Italia con el objeto de mejorar las condiciones ambientales al interior. El edificio se monitoreo por dos años durante los que se midió el rendimiento térmico del techo y ático. En el primer año se monitoreo el edificio con su configuración original, en la que tenía una baldosa color marrón oscura y en el segundo se implementó un recubrimiento reflectivo blanco con el objetivo de cuantificar los beneficios en verano y los perjuicios en invierno. Para las mediciones se consideró la temperatura exterior, radiación solar global y velocidad del viento. En los resultados se concluyó que con la baldosa reflectiva se mejora el comportamiento térmico en verano y las repercusiones en invierno son relativamente bajas, se redujeron las temperaturas en verano por arriba de 4.7 °C y se enfrió la edificación tan solo 1.2 °C en diciembre. Por lo tanto, implementar baldosas frescas es una alternativa que puede traer mayores beneficios en verano y sus perjuicios en invierno son menores.

En el 2011 Álvarez *et al.* construyeron una caseta experimental para el clima de Chihuahua para la evaluación del rendimiento térmico de 12 lozas de concreto que fueron aisladas una de la otra. Cada loza era cubierta con recubrimientos para su medición. Las losas fueron expuestas a las mismas condiciones ambientales, con una temperatura interior constante. Las mediciones se realizaron con termopares que se colocaron al interior y exterior de las lozas, cada dos minutos por una semana continua en Octubre y Noviembre del 2010. En este experimento se comparó el rendimiento de dos muestras sin recubrimientos para diferentes tipos de concreto, dos fueron las muestras de referencia de concreto una de concreto celular con micro esferas poliméricas, seis fueron cubiertas con recubrimientos de acrílico y cuatro con aislamiento térmico y recubrimiento de acrílico. Se concluyó que se tienen mayores reducciones de temperatura al combinar el aislamiento térmico del material con un recubrimiento blanco celular.

### 1.1.2. Estudios Teóricos

En este apartado sólo se muestran los documentos revisados de estudios teóricos, en términos de su comportamiento térmico del techo.

Hernández *et al.* en el 2014 realizaron un estudio del arte de la aplicación de los materiales reflectivos para edificios (para paredes y techos). Se encontró que la aplicación de estos materiales en los componentes de los edificios es probablemente la técnica más fácil de implementar, ya que la mayoría de esos materiales pueden ser utilizados como cualquier pintura convencional. Se concluyó que los materiales reflectivos reflejan la energía solar todo el año, lo cuál puede ser una desventaja en invierno. Sin embargo con base en la literatura se muestra que este incremento es muy pequeño en comparación con reducción de las ganancias de enfriamiento proporcionados por los materiales reflectivos sobre todo en verano.

El mismo autor *et al.* en el 2013 analizaron numéricamente con el método de volumen finito un techo de concreto simple y compuesto con dos recubrimientos reflectivos. Para las condiciones de frontera de la superficie externa del techo se consideraron en los datos climáticos horarios promediados para cuatro ciudades: Hermosillo, Mérida, Cd. de México y Guadalajara. En la superficie interna se consideró una temperatura constante, es decir cuenta con climatización. La temperatura de la superficie exterior y las velocidades de flujo de calor en los techos se obtuvieron durante dos días consecutivos con el fin de evaluar sus beneficios en climas diferentes. En los resultados se encontró que con la aplicación de recubrimientos reflectivos blancos se puede reducir la temperatura superficial hasta 30 °C al medio día, en comparación con un techo tradicional de concreto. Por otro lado, los recubrimientos pueden disminuir la temperatura al interior entre 2 y 6 °C durante las horas con radiación solar. Se concluyó que la mejor configuración de techos para climas cálidos como Hermosillo y Mérida es el techo con un recubrimiento reflectivo. No obstante para climas templados como la Ciudad de México y Guadalajara no es necesaria la aplicación de un recubrimiento reflectivo, con un aislante térmico es suficiente para evitar las pérdidas de calor.

Akbari y Touchei en el 2014 desarrollaron un modelo capaz de calcular las horas de reflectancia de los materiales reflectivos direccionales (*DRMs*, por sus siglas en inglés) como función del ángulo cenit y azimut. Para represen-

tar la reflectancia solar de los *DRMs*, evaluaron el rendimiento de los techos localizados a  $37^\circ$  de latitud Norte. Para esta evaluación desarrollaron una herramienta computacional con el software Matlab R2012a capaz de calcular la reflectancia y absorptancia de los *DRMs* para modelar la irradiancia, reflectancia parcial y anual en el techo para todos los ángulos del cenit y azimut,  $0, 90^\circ$  y  $-180, 180^\circ$  respectivamente, esto se realizó para el verano e invierno. Se introdujeron al programa los valores de las propiedades de las superficies, especificaciones del techo, y su localización. Para la caracterización de las *DRMs* se consideró la reflectancia solar esférica ( $R_g$ ). Como resultados obtuvieron la posición del Sol, las irradiancias solares directas, globales y difusas, así como la reflectancia de *DRMs*. También se asignó un promedio para la reflectancia de *DRMs* para invierno y otra de acuerdo al cenit a  $20^\circ$  hacia el lado reflectivo en verano. Concluyeron que en invierno el potencial de las ganancias de energía de edificios se sobre estima con un error menor al 20%, en otras palabras, la absorción cada hora y el pico de calor son estimadas con un error de  $22 \text{ kJ/m}^2$  y  $9 \text{ W/m}^2$  respectivamente.

Synnefa *et al.* (2012) analizaron un edificio de una escuela en Atenas con y sin la aplicación de una pintura blanca mediante una simulación para el piso que tenía una reflectancia de 0.89. Los resultados se compararon con un estudio en Trapani, registraron una reducción de la temperatura pico externa de alrededor de  $25^\circ\text{C}$ , una reducción de la temperatura promedio interior de entre  $1.5$  y  $2^\circ\text{C}$  y un decremento del 40% en las cargas de enfriamiento anuales para el caso de un edificio condicionado. También observaron reducciones en las fluctuaciones de la temperatura diaria, por lo tanto se espera que el tiempo de vida del techo sea mayor.

En el mismo año Zinsi y Agnoli realizaron un análisis comparativo entre techos verdes y reflectivos. Evaluaron su influencia en la mitigación del efecto de la isla de calor y el confort térmico en edificios no climatizados de la zona mediterránea. Esta zona se dividió en tres regiones, el norte de Barcelona, Sur del Cairo y Palermo, que tenían diferentes condiciones climáticas tales como las temperaturas del clima local, niveles de lluvia y los perfiles de temperatura del aire. Los datos climáticos fueron obtenidos de la base de datos Meteonorm. Este análisis se efectuó con el software Design Builder y con el programa para la simulación energética Energy Plus con los que se calculó la conductancia, reflectancia y emisividad de los materiales. Los resultados muestran que al aplicar la tecnología de techos frescos en el Cairo

mejora el comportamiento térmico en todo el año, sobre todo en el mes de junio, se redujo la demanda de energía entre el 30 y 40 %. Con base en estos resultados se concluyó que los techos reflectivos son muy eficaces para reducir las cargas de enfriamiento y las ganancias de energía sobretodo en las áreas del centro y del Sur de la Cuenca del Mediterráneo, sus resultados fueron mejores resultados en comparación con los techos verdes.

En el año 2012 Liliana Campos introdujo el concepto de cubiertas y superficies reflectivas, así como las ventajas ambientales-económicas de su aplicación en México. Mostró los resultados de trabajos experimentales y simulaciones realizadas alrededor del mundo, donde países como Europa y Estados Unidos, tienen un mayor crecimiento en cuanto esta tecnología, cuentan con estándares para la medición y evaluación de las propiedades de las superficies reflectivas que han mostrado buenos resultados en cuestiones de disminuir las temperaturas al interior de los edificios sobre todo en climas cálidos y por lo tanto se reducen las cargas de enfriamiento. No obstante en México, actualmente no se cuentan con normas para la evaluación y caracterización de estos recubrimientos, la tecnología es poco conocida. Por estos motivos se consideró importante invertir en el desarrollo de los RR, porque en México existe potencial para el desarrollo de la tecnología de las cubiertas reflectivas, tiene una gran área de oportunidad de mercado, innovación y transferencia y además es una tecnología de fácil implementación y bajo costo que puede traer beneficios ambientales significativos.

En el mismo año Alchapar *et al.* analizaron 80 revestimientos para fachadas disponibles comercialmente mediante el cálculo del Índice de Reflectancia Solar (SRI), con el fin de mitigar el efecto de la Isla de Calor Urbana,. Las muestras fueron de 30 x 30 cm, tenían tres capas (soporte, aditivo y mortero texturable). Seleccionaron ocho colores con base en la demanda local y frecuencia de uso, estos fueron en color: blanco, marfil, piedra parís, ocre, terracota, gris perla, gris cemento y gris plomo. Se calculó el albedo y la emisividad con un albedómetro tipo Kipp & Zonen CMA11 (285 a 2800 nm) y con un sensor de temperatura de termocopl tipo T asociado a un data logger hobbo U12 respectivamente, por último el SRI se calculó con la norma ASTM E1980. Se concluyó que el material más eficiente fue el acrílico rulato travertino fino marfil (  $SRI = 100\%$  ,  $T_{sup} = 35^\circ C$  ) y el más ineficiente fue el acrílico llaneado fino gris plomo ( $SRI = 29\%$  ,  $T_{sup} = 74^\circ C$  ). Por otro lado se determinó la importancia del color y su importancia con respecto en la

temperatura superficial de los recubrimientos y en su SRI.

En el 2007 Synnefa *et al.* realizaron un análisis para techos con y sin recubrimiento reflectivo para estimar la ganancia de energía en las residencias. Se simularon 27 ciudades alrededor del mundo entre ellas la Cd. de México. La simulación se realizó con el software de simulación térmica TRNSYS, los datos meteorológicos se obtuvieron de la base de datos de METEONORM. Se consideró una reflectancia de 0.2 para el caso base y de 0.6 y 0.85 para el techo reflectivo; una emitancia de 0.9. Con este estudio se concluyó que a mayor reflectancia solar mayor reducción de las cargas de enfriamiento, ahorro de energía y reducción de costos. Se obtuvieron reducciones de enfriamiento que van de 8 a los 48kWh/m<sup>2</sup>, las horas de discomfort de 9 a 100% y la temperatura máxima de 1.2 a 3.7 °C dependiendo de las condiciones climáticas. Se demostró que es más significativa la reducción de la carga de enfriamiento que la de calentamiento para los climas estudiados. En cuanto a las cargas de enfriamiento pico se demostró que con incrementar la reflectancia a 0.65 se puede lograr un ahorro que varía entre 10.7y27% dependiendo de las condiciones climáticas.

Granja y Labaki (2003) analizaron la dinámica del flujo de calor del efecto del color en la superficie exterior a través de un techo sólido plano, el estudio se realizó con un análisis de conducción de calor Fourier mediante la implementación de soluciones periódicas. La simulación se realizó para un periodo de 24 horas de un día típico de verano en el estado de Sao Pablo, Brasil. El espesor del techo fue variable en un rango de 5 a 14 cm para una superficie gris ( $\alpha = 0.61$ ) y blanca ( $\alpha = 0.26$ ). Se consideró una temperatura interior constante de 26 °C. En los resultados se obtuvo que en climas cálidos es necesario utilizar colores blancos con una baja absorptividad y alta emisividad en las superficies exteriores, porque los resultados muestran que el color tiene un efecto significativo en la disminución de la densidad de flujo de calor y un incremento de la inercia térmica del techo de hormigón. Con el uso adecuado de la inercia térmica se puede asegurar la eficiencia energética de los componentes opacos de construcción en climas cálidos. La aplicación de recubrimiento de color en el exterior reducen las cargas de enfriamiento, sin embargo este efecto se disminuye a medida que incrementa el espesor del techo de concreto (de 15 cm y más).

### 1.1.3. Estudios Teórico - Experimentales

Costanzo *et al.* (2014) evaluaron algoritmos para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor y el error derivado de una selección incorrecta del coeficiente en los recubrimientos reflectivos mediante el software de simulación EnergyPlus. Para este estudio se consideró una oficina de la universidad de Catania al sur de Italia, para su análisis se dividió al techo del edificio, por un lado las tejas eran de barro tradicional y del otro fueron pintadas con el recubrimiento fresco orgánico, que consistía básicamente en una mezcla de leche y vinagre. En la primera parte del trabajo midieron con dos pares de sensores de temperatura por dos semanas en verano. Posteriormente los resultados de las mediciones se utilizaron para la calibración del modelo en relación con el cálculo del coeficiente de transferencia de calor de la superficie. Los resultados de las simulaciones numéricas indicaron que existen beneficios al pintar con un recubrimiento fresco el techo de un edificio existente con una cubierta tradicional. Para una reflectancia solar menor a 0.45 se recomienda usar el modelo adaptativo, aunque el modelo que EnergyPlus maneja por default el DOE-2. Se concluyó que las herramientas de simulación energética para edificios son eficientes como estrategia para medir el potencial de los recubrimientos reflectivos como estrategia para la mejora del rendimiento térmico en edificios existentes.

Kolokotroni *et al.* en el 2013 analizaron el impacto de la aplicación de recubrimientos reflectivos en el techo de una oficina ubicada en la Brunel University (London). Las propiedades superficiales del techo consideradas para este caso de estudio fueron la reflectancia solar ( $\rho_s$ ) y la emitancia solar ( $\epsilon$ ), con un valor de 0.70 y 0.88 respectivamente. En este estudio se monitoreó la oficina antes y después de la aplicación de los recubrimientos reflectivos durante el verano. El modelo y la simulación de la oficina se realizó con el software TRNSYS, al que se le introdujeron los datos de las mediciones. Para el análisis paramétrico se varió la reflectividad, ventilación y aislamiento del techo. Los autores llegaron a la conclusión con la aplicación de recubrimientos frescos la demanda de enfriamiento se reduce significativamente y las ganancias de energía totales varían entre 1 y 8.5% con respecto a un albedo de 0.1. El confort térmico se mejoró un promedio de 2.5 °C, las temperaturas superficiales y del aire se reducen en el medio día un promedio de 2 °C y de 2 a 3 °C respectivamente. Finalmente se concluyó que para este caso de estudio, la aplicación de un techo reflectivo con un valor entre 0.6 y 0.7 es

óptimo para reducir las cargas térmicas de refrigeración.

Kolokotroni y Warren (2011) realizaron un estudio teórico-experimental en cinco edificios de diferentes usos, ubicados en Italia, Francia, Reino Unido y dos en Grecia, a los que se les implementó la tecnología de los recubrimientos reflectivos con el fin de medir y evaluar su potencial de uso. También se desarrolló una metodología para el análisis numérico con simulaciones. En los resultados se obtuvieron ahorros de energía y en la temperatura interior entre 10 a 40 % y entre 1.5 a 2 °C respectivamente. Esta variación de temperaturas depende de las condiciones climáticas, uso y características del edificio para cada ciudad. Asimismo se observaron disminuciones en las demandas de refrigeración con una combinación de un techo reflectivo y un aislamiento térmico.

Bozonnet et al. en el 2011 realizaron un estudio de un edificio llamado “ Le Parvis” ubicado en Poitiers (Francia), compuesto por 87 viviendas. Se analizó el edificio con y sin la implementación de la tecnología de techos frescos. El recubrimiento del techo de estudio tenía una reflectancia solar de 0.88 y emitancia térmica de 0.90. Se monitoreó la temperatura del aire y la humedad. El modelado de la simulación del edificio se efectuó con la herramienta TRNSYS. Las mediciones del clima se verificaron con los datos del clima del aeropuerto Poitiers Briard y se normalizaron con la base de datos meteorológica Meteonorm. Se observó una diferencia de temperaturas de 2.5 °C debido al efecto local de la isla de calor. Los resultados fueron validados con observaciones experimentales y con simulaciones de las temperaturas en el techo (Superficie externa) y las temperaturas del aire interiores.

Antes de aplicar el recubrimiento reflectivo se monitoreó una diferencia de la temperatura interior y exterior promedio de 0.60 °C respectivamente. Posterior a la aplicación del recubrimiento la temperatura interior y exterior se redujeron 0.47 y 19.8 °C correspondientemente. Con este estudio se mostró que en climas moderados como el de Poitiers, un techo frío disminuye la temperatura media de la superficie exterior del orden de 10 °C.

#### 1.1.4. Materiales para Recubrimientos Reflectivos

En el 2014 Gao *et al.* describieron la metodología seguida para el desarrollo de nuevos productos frescos con el fin de incrementar el desarrollo de los recubrimientos reflectivos, estos incluyen materiales con color y su uso se extiende a componentes verticales. Los materiales fueron desarrollados a escala en el laboratorio, para su caracterización se consideraron tres propiedades: la capacidad de enfriamiento, coincidencias de color con referencias a estándares y durabilidad. Para cuantificar el enfriamiento se midió la reflectancia y emitancia con base en la ASTM C1371 y ASTM E1980 respectivamente. Las mediciones de la reflectancia espectral mostraron una incremento en el infrarrojo cercano (*NIR*, por sus siglas en inglés) en colores oscuros y una alta absorbancia en el visible. Se encontraron nuevos materiales con alta reflectancia *NIR* que tienen potencial para satisfacer los requerimientos del mercado y la industria. Se concluyó que los materiales frescos son una alternativa costo-efectiva para la reducción del consumo de energía por enfriamiento y la mitigación del fenómeno de la Isla de Calor.

En el 2014 Dornelles y Sichieri analizaron el efecto de las condiciones ambientales de nueve recubrimientos reflectivos blancos durante un año, con el fin de evaluar el efecto en la reflectancia. Se midió la reflectancia antes y después de su exposición durante tres cada tres meses. El aparato de medición empleado fue un espectrofotómetro con un rango de 300 a 2500 nm. Para los resultados obtenidos de las mediciones se calculó su reflectancia total y para para el espectro ultravioleta, visible e infrarrojo cercano (*UV*, *VIS*, *NIR*) esto fue para propósitos comparativos. Los resultados mostraron que la reflectancia se redujo al someterse a las condiciones ambientales, lo que indicó una ineficiencia en comparación a las características iniciales de los materiales reflectivos.

En el 2015 Cozza *et al.* crearon recubrimientos inteligentes para fachadas caracterizados por una alta reflectancia en el infrarrojo cercano (800-2500 nm), con el fin de disminuir el uso de la energía en edificaciones y a su vez incrementar la gama de colores de los recubrimientos de color frescos (*cool color*), se partió del caso más crítico, los pigmentos negros que se caracterizan por su alto valor de absorbancia. Se realizaron elaboraron recubrimientos blancos y grises para los que se calculó su Reflectancia Solar Total (*TSR*, por sus siglas en inglés). En el estudio experimental se analizaron cinco co-

lorantes negros de modo que se mezclaron con pinturas comerciales para su posterior comparación con pinturas negras comerciales, así como con los colorantes estándar utilizados en pinturas para edificaciones. En los resultados se mostró la TSR de los recubrimientos negros estándar y de los reflectivos, que fue de 5 % y por encima del 30 % respectivamente. En cuanto a los grises tuvo un incremento del 35 % en comparación de los convencionales. Se concluyó con base en las mediciones y en imágenes termográficas que a mayor TSR, se incrementa la temperatura en el lado posterior de las muestras.

### 1.1.5. Conclusiones del Estado del Arte

En los años recientes se han hecho importantes estudios numéricos y experimentales de la aplicación de los RR para demostrar su eficacia en diferentes contextos climatológicos, diferentes construcciones y tipologías. Además se han evaluado techos con o sin aislamiento. También se han realizado estudios para mejorar su valores de reflectancia, sobre todo en el infrarrojo cercano, a través de la mejora de los pigmentos, para los recubrimientos blancos y de color. Por otro lado, actualmente se están midiendo el efecto de las condiciones climáticas en los recubrimientos reflectivos a lo largo del tiempo.

La aplicación de los RR es una alternativa de bajo costo y fácil implementación que puede traer beneficios en el interior de los edificios y ambientales, como es la mejora de las condiciones de confort al interior de los edificios, disminución en las cargas de enfriamiento y del flujo de calor, sobretodo en climas cálidos. Por otro lado la relación entre las propiedades de reflexión de los RR en el infrarrojo así como su reducción del consumo de energía de enfriamiento para edificaciones es bien conocida. Su implementación ayuda a reducir las instalaciones de sistemas de enfriamiento por su baja demanda de energía de enfriamiento.

Se pueden tener reducciones de hasta 30 °C en la temperatura superficial para climas cálidos.

## 1.2. Justificación

En México la tecnología de los recubrimientos reflectivos (RR) no es muy conocida, existe poca información sobre los productos para cubiertas y superficies reflectivas disponibles en el país y sus beneficios, actualmente no se cuentan con métodos de prueba validados para verificar las propiedades superficiales de los productos en el mercado. Con base en los estudios que se han realizado en Estados Unidos y en parte de Europa, se considera que en México se deben hacer una serie de acciones que diseminen la tecnología de las cubiertas y superficies reflectivas y que garanticen su aplicación [2].

La aplicación de RR es una técnica efectiva, de bajo costo además de simple que contribuye a la eficiencia energética y al confort térmico en edificios. También interviene en la mitigación del efecto de la isla de calor urbana (ICU) y mejora la calidad del aire [15].

La normatividad mexicana vigente en materia de eficiencia energética en envolventes (NOM-008-ENER-2001, NMX-C-460 y NOM-020-ENER-2011) no contemplan actualmente el efecto de las cubiertas y superficies reflectivas. Solo establecen los niveles mínimos de conductancia térmica según el elemento de la envolvente, su orientación y su zona climática.

## 1.3. Objetivo General

Evaluación y caracterización de recubrimientos reflectivos más comercializados en México para techos y su comportamiento térmico en climas cálidos, templados y fríos.

### 1.3.1. Objetivos Específicos

- Elaborar una base de datos de los recubrimientos reflectivos comerciales existentes en México.
- Medir la reflectancia y emisividad de los materiales.
- Medir el envejecimiento de la reflectancia de los recubrimientos reflectivos.

- Elaborar un un recubrimiento y pintura ecológicos con baba de nopal.
- Elaborar un programa de cómputo que calcule la conducción de calor en una loza de techo con materiales reflectivos en 6 climas de México según el INEGI.

## 1.4. Alcances

- Caracterización y evaluación de los recubrimientos reflectivos más comercializados en México.
- Contar con un modelo teórico y una herramienta de cómputo para la medición de la transferencia de calor por conducción, para el análisis del comportamiento térmico de los recubrimientos reflectivos en un sistema compuesto de una loza de concreto y un recubrimiento reflectivo.
- Determinar los recubrimientos reflectivos más adecuados para seis climas distintos de México, con base en las seis regiones climáticas.

## 1.5. Contenido de la Tesis

Este trabajo consta de cinco capítulos, el primero es de carácter introductorio y se presenta el estado del arte referente a los RR el cual se divide en estudios teóricos, experimentales, teóricos-experimentales y materiales para RR. Los siguientes cinco capítulos abordan el tema de interés de la siguiente manera:

En el **Capítulo 2**, se definen los conceptos básicos del Sol, los mecanismos de transferencia de calor en la envolvente, así como los principios básicos de los techos y se definen los RR y sus principales factores que afectan a los techos. Por último se describen los climas que se utilizan.

En el **Capítulo 3** se describen los materiales y utilizados para la preparación de las muestras, así como para la elaboración de la pintura e impermeabilizantes de baba de nopal. También se describe el equipo de medición, los métodos de medición de la reflectancia y emisividad y por último el cálculo del SRI.

En el **Capítulo 4**, se presenta el modelo físico de conducción de calor de la loza de concreto, así como su método de solución. También, se muestra el modelo matemático que describe el comportamiento del sistema, así como sus condiciones de frontera y consideraciones. Por último se presenta la verificación de los resultados, el análisis de independencia de malla espacial y temporal.

El **Capítulo 5**, se muestran los resultados de las mediciones de la emisividad y reflectancia de los recubrimientos reflectivos, así como su envejecimiento en un periodo de seis meses. Posteriormente se presentan los resultados del estudio paramétrico que sirvió para la evaluación del comportamiento térmico del techo con los 14 recubrimientos seleccionados, la solución del modelo matemático mediante el compilador Fortran para las seis regiones climáticas representativas de la República Mexicana.

Por último en el **Capítulo 6**, se presentan las conclusiones de obtenidas con base en las mediciones, el análisis de los resultados, así como las recomendaciones para trabajos futuros.

# Capítulo 2

## Fundamentos Teóricos

### 2.1. El Sol como Elemento de la Edificación

Desde la antigüedad, el hombre se ha preocupado por comprender el movimiento del Sol, no solo para mejorar las condiciones de su vivienda sino también para medir el tiempo (solsticios y equinoccios, tiempo horario, entre otros) y orientarse en sus viajes. Los rayos provenientes del sol tienen gran influencia en los edificios, porque llegan directamente a la superficie de la envolvente, por lo tanto, fluyen directamente y se acumulan en la masa térmica de los muros, techos y pisos; además penetran directamente a través de las aperturas (ventanas y domos) [5].

Considerando de manera adecuada los elementos y factores climáticos, así como el comportamiento de los materiales con base en sus características termofísicas que afectan a una edificación, se pueden mejorar las condiciones de confort térmico y reducir el consumo energético en los sistemas de climatización.

En el presente trabajo se consideró al techo como elemento de estudio, con base en estudios realizados se ha llegado a la conclusión de que con cambiar el color de los recubrimientos de la envolvente de la edificación se mejorará el comportamiento térmico [11]. Por lo tanto se consideró que al implementar los RR en el exterior del techo con base en las condiciones climáticas se mejorará el comportamiento térmico de la edificación sobre todo en verano.

## 2.2. Transferencia de Calor en Techos

La transferencia de calor es un mecanismo de gran importancia para entender el comportamiento térmico en las edificaciones y en sus elementos como son los muros, ventanas, techo y suelo. En el presente trabajo se seleccionó al techo como caso de estudio, los mecanismos físicos de transferencia de energía que nos ayudan a explicar estos fenómenos son la conducción, convección y radiación.

En la Figura 2.1 se muestra de manera esquemática la transferencia de calor por convección, conducción y radiación en un techo. Como se observa el mecanismo de radiación se presenta en la parte exterior del techo, parte de la irradiación que llega proveniente del Sol es absorbida y otra es reflejada al medio ambiente  $T_{\infty}$ , parte de la radiación absorbida es emitida al interior del techo y al exterior,  $T_{\infty}$  y  $T_{out}$  respectivamente, la velocidad en la que emiten depende de la masa térmica de los materiales; la convección se presenta en la parte interior y exterior del techo debido a una diferencia de temperaturas y al movimiento del aire, mientras que la conducción es causada por una diferencia de temperaturas entre la superficie exterior ( $T_1$ ) e interior del techo ( $T_2$ ), más adelante se explican detalladamente estos procesos.

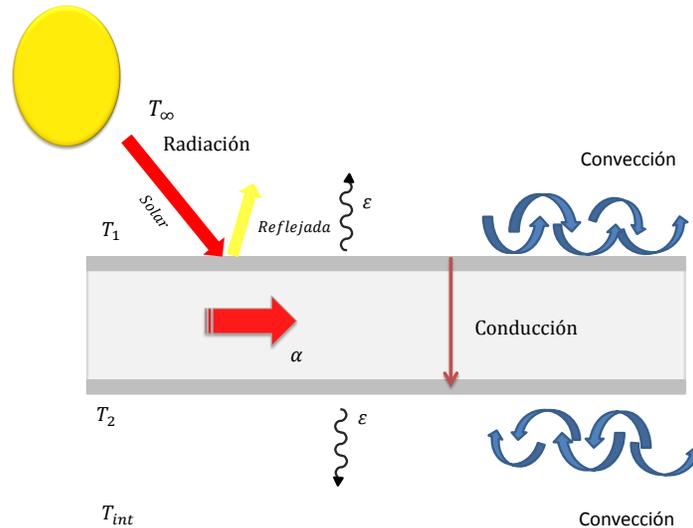


Figura 2.1: Mecanismos de transferencia de calor en un techo.

### 2.2.1. Radiación

Para comprender el efecto de la radiación solar en el techo de una edificación es necesario conocer lo que es un cuerpo negro. Este se define como un emisor perfecto, emite la radiación máxima en todas las direcciones y longitudes de onda. La cantidad de radiación que se absorbe en un cuerpo negro es igual a la que emite  $\alpha = \epsilon$  [16].

La radiación dentro del recinto de un cuerpo negro es independiente de la posición y orientación, además es función de la temperatura (radiación isotrópica). Un cuerpo negro es casi imposible de encontrar, los cuerpos reales no son, ni perfectos absorbedores ni emisores. Por lo tanto, para su caracterización, se utilizan cantidades adimensionales como la transmisividad, absorptividad, reflectancia de superficies reales para compararlas con las de un cuerpo negro. Las propiedades de superficies reales son funciones de la longitud de onda, temperatura y dirección. Las propiedades pueden ser direccionales o espectrales, las primeras se refieren al comportamiento de una superficie como una función de la longitud de onda, y las segundas describen la distribución de la radiación en dirección angular. En el presente trabajo se miden las primeras, sin embargo aún conociendo estas propiedades, resulta complejo su análisis aún con una computadora, pero en ingeniería se considera una aproximación aceptable al realizar los cálculos mediante una aproximación simplificada utilizando un sólo valor de las propiedades de radiación promediado sobre la dirección y el intervalo de longitud de onda de interés, las cuales se denominan totales.

En el presente trabajo primero se miden la emisividad y reflectancia de los recubrimientos de manera espectral para posteriormente calcular sus valores promedio y tomar sus valores totales para introducirlos al código numérico. En la Figura 2.2 se presenta la radiación espectral direccional de un cuerpo negro, gris y una superficie real, donde el cuerpo gris se refiere a cualquier superficie que se aproxime a un cuerpo real y satisfaga la Ecuación 2.1[16].

$$\frac{I_{\lambda}(\lambda, T)}{I_{b,\lambda}(\lambda, T)} \neq f(\lambda) \quad (2.1)$$

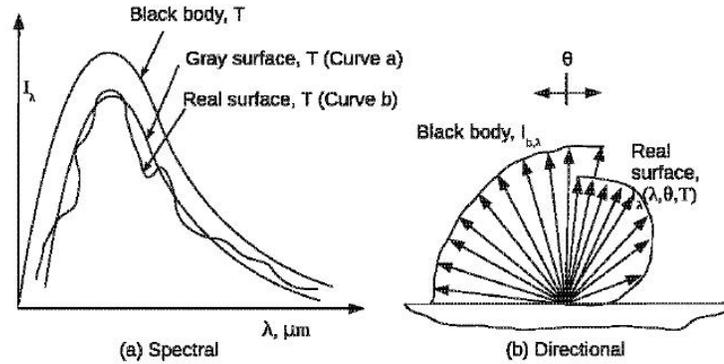


Figura 2.2: a) Radiación espectral de un cuerpo negro, gris y una superficie real. b) Radiación direccional de un cuerpo negro, gris y una superficie real.

Donde  $I_\lambda$  representanta la intensidad de la radiación, el símbolo  $\lambda$  representa una cantidad espectral que corresponde a la intensidad de la radiación en pequeños intervalos de longitud de onda sobre el espectro, el subíndice  $b$  se refiere al cuerpo negro.

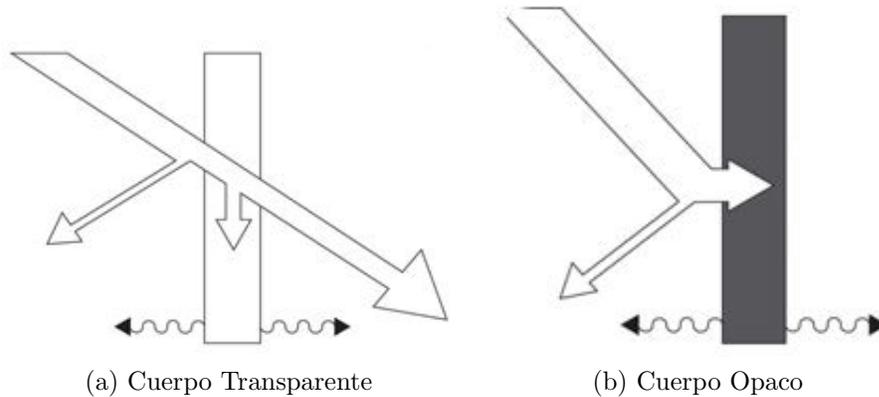


Figura 2.3: Radiación incidente, reflejada y absorbida en términos de las propiedades de radiación totales. a) Cuerpo Transparente, b) Cuerpo opaco.

En la Figura 2.3 se muestra la definición de las propiedades de radiación totales. Cuando la radiación incide sobre una superficie a una tasa  $G$ , una parte de la irradiación total se absorbe en el material, otra se refleja y el resto se transmite a través del cuerpo [16].

La absorptividad  $\alpha$  de una superficie se refiere a la cantidad de irradiación total absorbida por el cuerpo. La reflectividad  $\rho$  se refiere a la cantidad de irradiación que se refleja de la superficie y la transmisividad  $\tau$  se refiere a la cantidad de irradiación que se transmite [16]. La suma de estas tres componentes debe ser igual a la unidad.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.2)$$

Sin embargo para el caso de materiales opacos, como son los RR, estos no transmiten la radiación incidente, como se muestra en la Ecuación 2.3.

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2.3)$$

Otra propiedad de radiación importante para las superficies reales es la emisividad  $\epsilon$ , se define como la radiación total dividida entre la radiación total que se emitirá por un cuerpo negro a la misma temperatura, como se muestra en la Ecuación 2.4 [16].

$$\epsilon = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{E(T)}{\sigma T^4} \quad (2.4)$$

La emisividad de una superficie siempre se encuentra entre cero y la unidad, mientras que una superficie negra es,  $E(T) = E_b(T)$  y  $\epsilon_b = \alpha_b = 1.0$ .

En la Tabla 2.1 se muestran algunos valores de reflectividad y emisividad de algunos materiales comunes. En la Tabla 2.2 se presentan la reflectividad del yeso con la aplicación de diferentes pinturas en la parte superior, lo cual muestra el efecto e importancia del color al exterior de las superficies.

Tabla 2.1: Emisividad y absorptividad de algunos materiales comunes, con una radiación solar de 20 °C.

Material	Emisividad ( $\epsilon$ )	Reflectancia ( $\rho$ )
Ladrillo sólido rojo	0.93	0.44
Techo de ladrillo (café oscuro)	0.94	0.24
Piedra de arena	0.96	0.40
Concreto (Superficie plana)	0.96	0.45
Yeso (Blanco)	0.97	0.64
Yeso (Gris)	0.97	0.35
Aluminio	0.90	0.20-0.40

Tabla 2.2: Reflectividad del yeso para diferentes colores en su superficie.

Color en superficie	Reflectancia
Pintura blanca mate	0.85
Amarillo claro	0.75
Amarillo ocre	0.50
Café	0.30
Azul cobalto	0.15
Verde cromo	0.15
Verde pasto	0.05

### 2.2.2. Conducción

La conducción se define como la transferencia de energía que va de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas . En otras palabras se refiere a la transferencia de energía térmica por difusión en un material “denso ” como es el caso de un sólido o un fluido en reposo [17].

Para determinar el campo de temperaturas en un medio se requiere aplicar el principio de conservación de energía, este puede ser aplicado a un volumen de control finito o diferencial (infinitesimal). En el primer caso, la expresión resultante determina el comportamiento general del sistema. En el segundo caso, se obtiene una ecuación diferencial que se resuelve para condiciones en cada punto del sistema. La rapidez de transferencia de calor expresada por la ley de Fourier se señala en la Ecuación 2.5, dónde el signo negativo indica la dirección de transferencia de calor.

$$q'' = -k\nabla T = -k \left( i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2.5)$$

Otras propiedades de la materia utilizadas para la transferencia de calor son las propiedades termofísicas que se dividen a su vez en las propiedades de transporte (conductividad térmica viscosidad cinemática) y las termodinámicas (densidad, calor específico). La conductividad térmica (k) es una propiedad importante del material, proporciona un indicador de la velocidad a la que se transfiere energía mediante el proceso de difusión y depende de

la estructura física de la materia, atómica y molecular; se relaciona con el estado de la materia (Ecuación 2.6).

$$k \equiv \frac{q_x}{(\partial T / \partial x)} \quad [W/mK] \quad (2.6)$$

En la Tabla 2.3 se muestran las propiedades termofísicas de algunos materiales comunes para techos. Estas tablas fueron obtenidas de la Norma Oficial Mexicana NOM– 020 – ENER – 2011 y de Athienitis & Santamouris, 1995.

Tabla 2.3: Propiedades termofísicas comunes para techos.

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad Térmica (W/m K)	Calor específico (J/kg K)
Aire	1000	0.30	1000
Acabado de pavimento (ligero)	1200	0.41	840
Agua	1000	0.58	4200
Placas de yeso	840	0.16	950
Poliestireno Expandido	25	0.035	1400
Aluminio	2800	160	880
Aplanado	1600	0.87	1000
Block hueco	1200	0.50	1000
Bovedilla	1200	0.50	1000
Concreto	2400	2	1000
de gas arrastrado	400	0.14	1000
pesado	2243	1.73	840
Ladrillo común	1922	0.727	840
Madera			
Blanda	630	0.13	1360
Madera dura	630	0.15	1250
Contrachapada	530	0.14	1214

Continúa en la siguiente página

Propiedades termofísicas comunes para techos.

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad Térmica (W/m K)	Calor específico (J/kg K)
Aglomerado	800	0.15	1286
Piedra			
Granito	2600	2.5	900
Caliza	2180	1.59	720
Arenisca	2000	1.3	712
Marmol	2500	2	802
Plafón	2800	0.25	896
Poliestireno Exp	24	0.04	1400
Revoque	1800	1	1000
Teja de Barro	1121	0.57	840
Vigueta	2120	0.601	785
Yeso	1602	0.73	840

Un ejemplo de conducción es la transferencia de calor de la superficie exterior de un techo hacia el interior debido al incremento de la temperatura interior en verano.

### 2.2.3. Convección

La convección es otro de los mecanismos de transferencia de calor que se manifiestan en la envolvente de un edificio, este se produce de la energía cinética asociada al movimiento de líquidos y gases. La Ecuación 2.7 que está expresada por la ley del enfriamiento de Newton.

$$q_{conv} = hA(T_{\infty} - T_{sup}) \quad (2.7)$$

En este estudio se enfoca en la transferencia de calor a través de un techo, un ejemplo de convección en un techo, es la pérdida de calor en la parte exterior de los techos de los edificios en invierno causado por el movimiento del aire. La convección se observa en un techo en la superficie interior y exterior, dónde el movimiento del aire ayuda a disminuir o a incrementar la temperatura de esta superficie debido a la diferencia de densidades.

Los coeficientes convectivos para una placa horizontal larga y pequeña siendo calentadas hacia arriba se muestran en la Ecuación 2.8 y 2.9 respectivamente.

$$h = 0.22(\Delta T^{0.33}) \quad (2.8)$$

$$h = 0.27 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{0.33} \quad (2.9)$$

## 2.3. Techo

Antes de introducir al concepto de un RR o Cool Roof se define lo que es un techo. Un techo es una cubierta colocada sobre las viviendas con el objetivo de proteger a los habitantes de las condiciones climáticas tales como las altas y bajas temperaturas exteriores, precipitación, entre otros. Los techos más comunes son los de tipo plano e inclinado. Los factores principales que influyen en la construcción de un techo son los factores tecnológicos (materiales, técnicas o procedimientos constructivos), los subjetivos (culturales – simbólicos) y climáticos.

Es importante considerar para un techo los materiales y elementos de construcción, para que este sea lo más resistente posible, se mejoren las condiciones de confort al interior y a su vez se reduzca el consumo energético por concepto de sistemas de climatización, con el fin de reducir las cargas de enfriamiento o calentamiento. Los materiales más comunes utilizados para construir un techo son: tejarril, palapa, tablas, piedras, ladrillo, madera, plástico, el concreto, poliuretano, entre otros. Sin embargo en México como ya se había mencionado anteriormente el concreto es el más utilizado, por lo tanto es el que implementaremos en el presente trabajo.

Al introducir las pinturas reflectivas en el exterior del techo se pueden incrementar los beneficios ambientales sobre todo en verano para climas cálidos, pero para obtener mayor beneficio de la aplicación de los RR es necesario considerar los factores climáticos (longitud, latitud y altitud), los elementos climáticos (temperatura, humedad, presión, entre otros) y el comportamiento de los materiales con base en sus características termofísicas, con el fin de

seleccionar el RR más adecuado.

### 2.3.1. Recubrimiento Reflectivo

Un RR es un sistema para techos que refleja radiación solar y emite calor, dejando las superficies del techo frescas bajo el sol. Estos tienen dos características importantes: la primera es que tienen un valor alto de reflectancia solar (también llamada albedo), que es el porcentaje de la energía solar reflejada por una superficie. Se recomiendan valores de reflectancia mayores al 70 %; la segunda es que tienen un valor alto de emitancia térmica, en otras palabras es el porcentaje que un material puede radiar (no reflejar), se recomiendan valores de emitancia mayores al 80 %.

El incremento de la reflectancia solar disminuye la temperatura de la superficie debido a que la radiación solar es reflejada por lo tanto se absorbe menos. En el verano resulta una reducción de las cargas por enfriamiento si es un edificio con aire acondicionado o si tiene condiciones térmicas mejores y el edificio no tiene aire acondicionado.

El albedo es la cantidad de radiación solar que es devuelta a la atmósfera tras chocar con la superficie terrestre, es causado por la reflectividad de los materiales principalmente, en la Figura 2.4 se presenta el efecto albedo en una edificación al aplicar una superficie negra y blanca.



Figura 2.4: Efecto albedo para un edificio con un recubrimiento negro y blanco.

Como se puede apreciar al cambiar el RR en el techo de una edificación se puede incrementar el porcentaje de la intensidad de radiación solar que llega al edificio, de un 5 hasta un 80 %. La cantidad de calor que se envía a la ciudad se puede reducir de un 52 a un 8 % al utilizar un RR blanco. Su temperatura superficial se puede reducir de 80 a 44 °C. Solo con la implementación de un RR.

## 2.4. Clima

El clima es un factor importante para el diseño de una edificación, con base en las condiciones climáticas de un lugar se debería seleccionar el tipo de arquitectura a utilizar, ya sea de muros ligeros o pesados, de cubiertas inclinadas o planas, de color oscuro o claro, con grandes vanos o pequeñas ventana, etc; la edificación funge como un elemento protector mediante el cual puedes lograr las condiciones de confort al interior del edificio.

En el INEGI se representa la temperatura media anual y la precipitación total anual, así como los tipos de clima según la clasificación de Köppen, modificada por Enriqueta García para adaptarla a las condiciones del territorio mexicano [6]. En la presente tesis se analizaran seis climas con base en esta clasificación climática la cual se divide en: clima cálido, templado y seco. Estos a su vez se dividen en subgrupos clima cálido húmedo y cálido subhúmedo; templado húmedo y templado subhúmedo; seco y muy seco respectivamente. Los subgrupos se clasifican con base en el régimen de lluvia y el porcentaje de lluvia invernal, con respecto al total anual.(Figura 2.5).



Figura 2.5: Distribución y clasificación de los climas en México reportados por el INEGI.

El clima cálido se refiere al área donde la manifestación de los elementos meteorológicos (temperatura, precipitación, humedad, presión, entre otros), a través de un número dado de años. Su característica principal es su temperatura media del mes frío es mayor de  $18^{\circ}\text{C}$  y su temperatura media anual esta entre  $18$  y  $22^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo si el clima es semicálido su temperatura media anual es entre  $18$  y  $22^{\circ}\text{C}$  [6]

El clima templado se refiere al área donde la manifestación de los elementos meteorológicos a través de un número dado de años. Su característica principal es que su temperatura media anual es mayor de  $18^{\circ}\text{C}$  y la temperatura del mes más frío entre  $-3$  y  $18^{\circ}\text{C}$  [6].

El subgrupo para los climas cálido y templado se definen como: húmedo y subhúmedo; el primero se refiere a aquellos climas cuyo régimen de lluvias corresponde a todo el año o abundantes lluvias en verano. El segundo se refiere a aquellos cuyo régimen de lluvias es de verano y presentan sequía en invierno [6].

El clima seco es el área donde la manifestación de los elementos meteo-

rológicos a través de un número dado de años, cuya característica principal es que la evaporación excede a la precipitación.

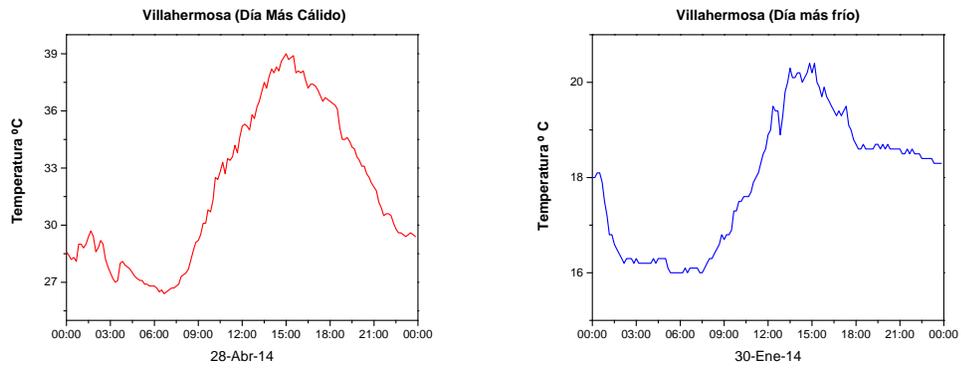
El subgrupo para clima seco se determina con base en los valores de precipitación total anual, obtenidos al relacionar la temperatura con una constante específica para régimen de lluvias considerado. El clima seco corresponde a los que tienen un cociente menor de 22.9 y el semisecho corresponde a los que tienen un cociente mayor de 22.9. El clima desértico es el más seco de los climas secos [6]. Los climas que se mencionan anteriormente son los que se presentan con mayor frecuencia en la República mexicana, sin embargo existen otros grupos de como son los climas fríos, Boreal y Frio Polar.

El clima frío se refiere al área donde la manifestación de los elementos meteorológicos a través de un número dado de años. Su característica principal es que la temperatura media anual oscila entre un valor menor a  $-2$  y  $5$  °C [6].

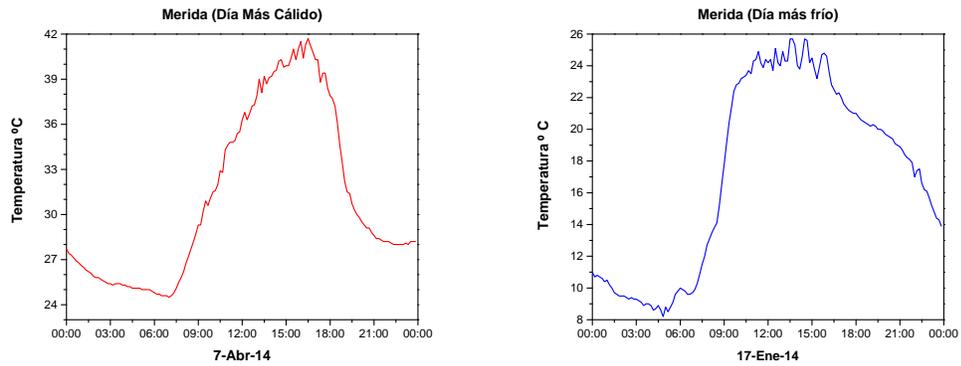
La clasificación que se presenta en este trabajo está establecida en el INEGI, sin embargo existen otras clasificaciones presentadas por García y Köppen que han sido modificadas, no existe una clasificación general para los climas.

Para el presente trabajo se seleccionaron seis climas representativos de los diversos tipos de climas, estas ciudades son: Villahermosa (clima cálido), Merida (cálido subhúmedo), Hermosillo (muy seco), Monterrey (seco), Jalapa (templado húmedo) y la Cd. de México (Templado subhúmedo). Los datos del clima fueron obtenidos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ubicado en México, D.F.

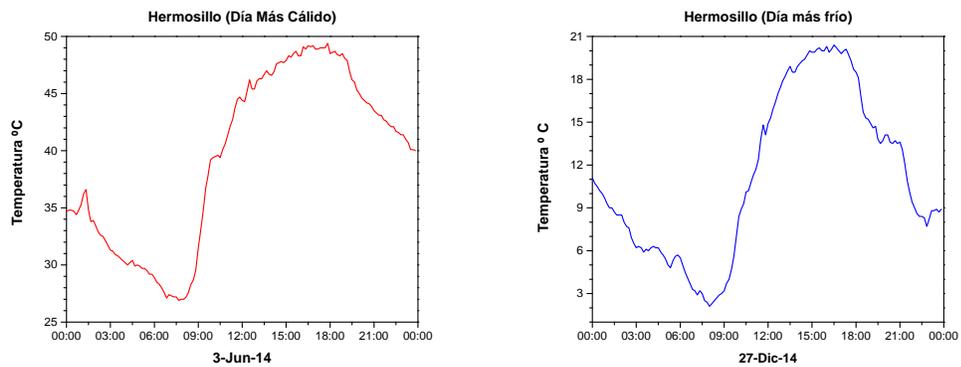
En la Figuras 2.6 y 2.7 se muestran las gráficas de los climas seleccionados anteriormente. Para cada uno de los climas se selecciono el día más cálido (color rojo) y más frío (color azul) del año 2014.



(a) Cálido Húmedo

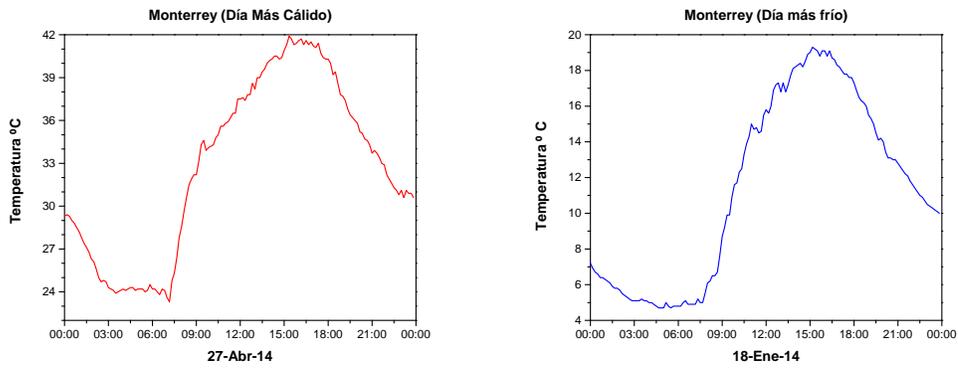


(b) Cálido Subhúmedo

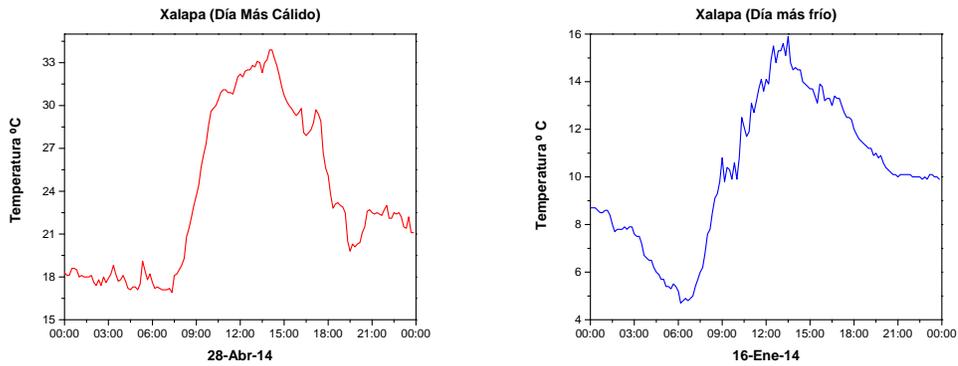


(c) Seco

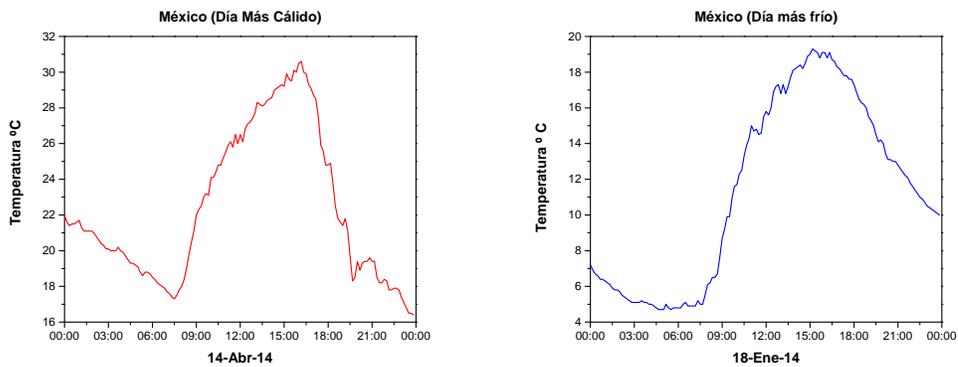
Figura 2.6: Climas



(a) Muy Seco



(b) Templado Húmedo



(c) Templado Subhúmedo

Figura 2.7: Climas (2da. Parte)



## Capítulo 3

# Metodología de Medición de la Reflectancia y Emisividad

En este capítulo se explicará el método de medición empleado para la obtención de la reflectancia y emisividad, así como el procedimiento realizado para el cálculo de la Reflectancia Solar Total (RST) y el Índice de Reflectancia Solar (*SRI*), los resultados obtenidos se implementaron al modelo del techo descrito en Capítulo 4. También se presenta los materiales y el procedimiento realizado para la elaboración de la pintura e impermeabilizantes de nopal.

Posteriormente se presentan los equipos de medición utilizados para medir las propiedades superficiales mencionadas anteriormente. Luego el procedimiento para la medición de estas propiedades para después presentar los resultados de las mediciones realizadas. Y finalmente se presentan los resultados del envejecimiento de los RR.

Se seleccionaron catorce RR de los cuales nueve son blancos, tres son rojos y dos azules. De manera que nueve de los recubrimientos se seleccionaron por ser de los más comerciales, son de la marca Thermotek, Comex, Sherwin William, Fester e Impac; los fabricantes de pinturas PROINSA elaboraron dos recubrimientos seleccionados y los últimos tres recubrimientos fueron ecológicos de elaboración propia con baba de nopal.

Tabla 3.1: Métodos de prueba para la medición de la reflectancia, emisividad y el cálculo del SRI [1].

Propiedad a medir	Método de Evaluación	Equipo	Lugar de la Prueba
<b>Reflectancia Solar</b>	<b>E 903</b> Método de Evaluación Estandar para la Absortancia, Reflectancia y Transmiancia de Materiales utilizando una Esfera de Integración	Espectrofotómetro con esfera de integración	Laboratorio
	E 1918 Método de Evaluación Estandar para la medición de la Reflectancia solar de superficies horizontales y de baja pendiente en el campo	Piranómetro	Campo
	<b>C 1549</b> Método de Evaluación para la determinación de la Reflectancia solar cercana a la Temperatura Ambiente utilizando un Reflectómetro Solar Portable	Piranómetro	Campo
<b>Emitancia Térmica</b>	C 1371 Método de Prueba Estandar para la Determinación de la Emitancia de Materiales a la temperatura ambiente de la habitación	Emisometro	Campo
	E 408 Método de Prueba Estándar para la Emitancia Total Normal de superficies utilizando técnicas de inspección	Reflectometro o Emisometro	Campo
<b>Índice de Reflectancia Solar</b>	<b>E 1980</b> Práctica Estándar para Calcular el Índice de Reflectancia Solar (SRI) para Superficies Opacas Horizontales y con baja pendiente	Método de Cálculo	

### 3.1. Estándares de Medición

La tecnología de los RR es bastante conocida y aplicada en Estados Unidos de America (EUA), así pues cuentan con estándares de medición incluidos en los códigos de energía y en diversos programas de eficiencia energética de varios estados. Además cuentan con una infraestructura de organizaciones que proveen información sobre esta tecnología e incentivan su uso [2].

En EUA existen dos programas para la evaluación de los RR, el programa Energy Star (*ES*) y el Cool Roof Rating Council (*CRRC*). El primero evalúa la reflectancia solar de los recubrimientos con base en la ASTM E 903 y/o ASTM 1918, sus criterios de evaluación se muestran en la Tabla 3.2. El ES requiere pruebas de los materiales reflectivos después de tres años y además de los productos con altas garantías en comparación con los ofrecidos por los recubrimientos no reflectivos para techos. Sin embargo ES no requiere la evaluación de la emitancia térmica[1].

Tabla 3.2: Criterio de evaluación del programa ES [1].

<b>Tipo de Techo</b>	<b>Reflectancia Solar Nueva</b>	<b>Reflectancia Solar en tres años</b>
Pendiente Baja	65 % o más	50 % o más
Pendiente Empinada	25 % o más	15 % o más

### 3.2. Equipo

Para la medición de la reflectancia se utilizó un espectrofotómetro Shimadzu Modelo UV-3101PC con una esfera de integración y el software UV-PROBE Versión 2.3.3 (Figura 3.1). Este instrumento es capaz de medir las características espectrales de las muestras o materiales sobre la región espectral de 300 a 2500 nm aproximadamente. Sirve para la medición de la reflectancia, emitancia y absortancia.



Figura 3.1: Espectrofotómetro Shimadzu Modelo UV-3101PC.

La esfera de integración es un dispositivo óptico que se utiliza para calcular el flujo reflejado o transmitido de una muestra dentro del hemisferio o que provee de irradiación isotrópica de una muestra de un hemisferio completo (Figura 3.2). Esto consiste en una cavidad que tiene aproximadamente una forma esférica con aperturas para agregar o detectar el flujo de calor y normalmente tienen aperturas adicionales sobre las cuales las muestras y las referencias son colocadas [18].

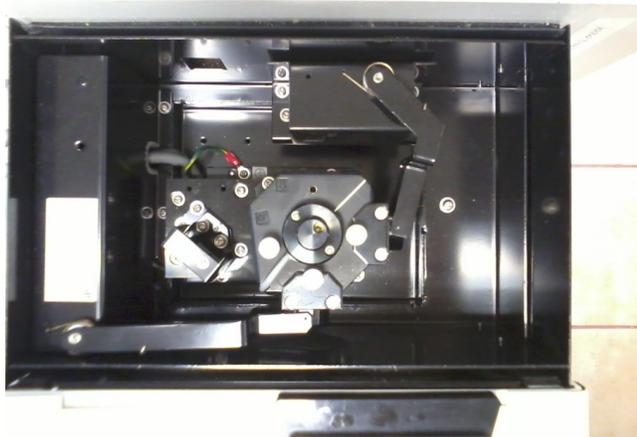


Figura 3.2: Esfera de Integración.

### Sistema Óptico del Espectrofotómetro

En la Figura 3.3 se muestra el funcionamiento óptico de la esfera de integración. El haz de luz de la muestra entra en la esfera de integración con un ángulo de  $0^\circ$ , pero el haz de luz de la referencia entra con un ángulo de  $8^\circ$ . Con el uso de la función de cambio de haz del programa principal del espectrofotómetro. La reflectancia difusa se puede obtener utilizando la posición de la muestra, la reflectancia total con un ángulo de  $8^\circ$  y para la reflectancia especular utilizando la posición de la referencia [19].

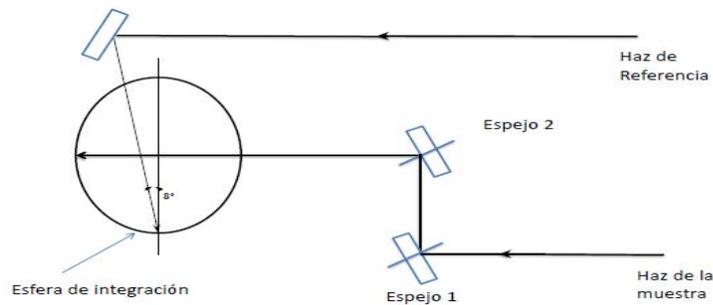


Figura 3.3: Sistema Óptico.

La medición de la emitancia se realizó con un emisómetro (Figura 3.4). Este instrumento está compuesto por un detector de radiación construido por una termopila diferencial con dos áreas bien definidas, una de baja (0.06) y otra de alta emitancia (0.88). Esta diseñado para tener una salida en voltios que es lineal con el valor de emitancia. La combinación de esta areas asegura una respuesta constante en el intervalo de longitud de onda desde 3 hasta  $30 \mu\text{m}$ .

En la Figura 3.5 se muestra la vista inferior del detector, las zonas doradas representan las zonas de baja emitancia. El emisómetro posee un disipador de calor sobre el que se coloca la muestra a medir así, como los patrones de referencia utilizados para la calibración para el que mantiene la misma temperatura para ambos casos. Para la calibración del instrumento se emplean los dos patrones de emitancia, que son provistos con sus correspondiente certificado de calibración. Dichos patrones son de forma circular de 67 mm de diámetro.



Figura 3.4: Equipo de Medición.



Figura 3.5: Vista inferior del detector.

### 3.3. Experimento

Para evaluar el comportamiento térmico de los recubrimientos fue necesario medir las propiedades superficiales de estos. Los RR analizados fueron de las marcas: COMEX, Thermotek, Sherwin Williams, Impac, dos fueron elaborados por la empresa PROINSA y tres de elaboración propia con baba de nopal, los recubrimientos analizados fueron de color blanco, azul y rojo. Existen dos clasificaciones para los RR los convencionales y los de color. Los primeros son blancos y los otros como su nombre lo dice son de color y los hay en azul, rojo, verde, café, entre otros. La reflectancia solar de los RR de color se encuentra en un rango entre el 30 y 60 % dependiendo del pigmento y de la oscuridad del color elegido. Las descripción de los recubrimientos se presentan en la Tabla 3.3. Cabe resaltar que casi todos los recubrimientos son impermeabilizantes excepto uno (la pintura de nopal).

Tabla 3.3: Descripción de los Recubrimientos medidos.

Marca	Modelo	Color	Tipo
<b>Thermotek</b>	DOBLE ACCIÓN	Blanco	Elastomérico
<b>Sherwin Williams</b>	TECHOLASTIC ULTRA 5 años	Blanco	Acrílico (base agua)
<b>Comex</b>	TOP TOTAL 3 años	Blanco	Acrílico
		Terracota	
<b>Impac</b>	Impac 300	Blanco	Normal
		Terracota	
	Impac Sokul	Blanco	Expancel
		Terracota	
<b>Prionsa</b>	Preparada en Laboratorio	Azul	Con Expancel
			Sin Expancel
<b>IMPERPAL Bl</b>	Preparada en Laboratorio	Blanco	con baba de nopal y jabón blanco
<b>IMPERPAL Am</b>	Preparada en Laboratorio	Blanco	con baba de nopal y jabón amarillo
<b>Pintura de Nopal</b>	Preparada en Laboratorio	Blanco	con baba de nopal

Para la verificación de las mediciones se utilizó el recubrimiento Thermotek blanco porque es el único de los mencionados anteriormente que reporta en su ficha técnica los valores de reflectancia y emitancia (Tabla 3.4).

Tabla 3.4: Propiedades superficiales reportados para el RR Thermotek [20].

Reflectancia ( $\rho$ )	Emitancia ( $\varepsilon$ )	SRI	Método de Medición
0.82	0.91	103	ASTM C-1549 ASTM C-1371

Los recubrimientos son materiales opacos, por lo tanto, la luz no penetrar a las muestras (sólidos), sino que esta es reflejada en la superficie de las

muestras, como se muestra en la Figura 3.6. La luz incidente que es reflejada simétricamente con respecto a la normal es llamada *reflexión especular* 3.6b, mientras que la luz incidente que se dispersa en diferentes direcciones es llamada *reflexión difusa* (Figura 3.6a) [21].

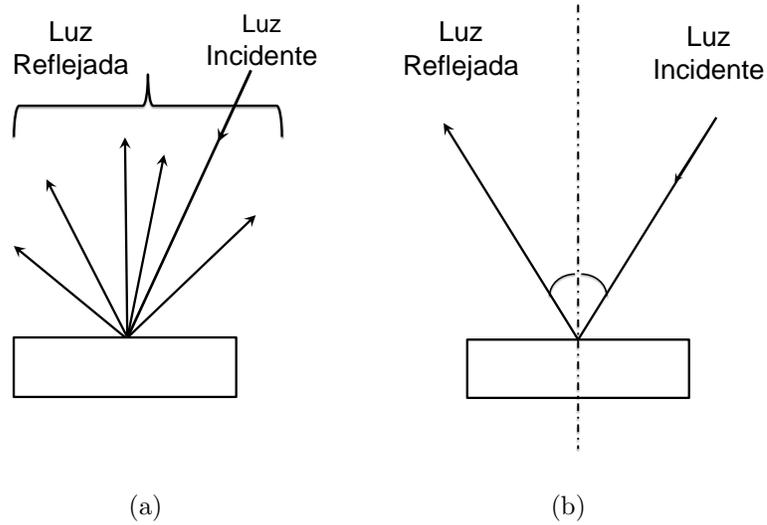


Figura 3.6: Reflexión Especular y Difusa.

### 3.3.1. Elaboración de la Pintura e Impermeabilizante de Nopal

En el presente trabajo se elaboró una pintura y dos impermeabilizantes ecológicos con baba de nopal como componente, a continuación se presentan sus materiales, así como la metodología seguida para su elaboración.

#### Pintura de Nopal

Esta tecnología pertenece a la tradición cultural campesina, la cual se ha empleado en la pinta de porquerizas, establos, gallineros, conejeras y casas. La pintura de nopal tiene ingredientes económicos, durabilidad y no contiene

ningún compuesto químico que dañe la salud. Sus ingredientes permiten que los muros dejen entrar y salir el aire a través de ellos [22].

Los materiales utilizados para la elaboración de la pintura de nopal se presentan a continuación (Figura 3.7):

- 1 recipiente de 1 l
- 50 g de Cal.
- 25 g de Cemento blanco.
- 3 nopales.
- 25 g de Sal.



Figura 3.7: Materiales para la elaboración de la pintura de nopal.

### Procedimiento de Elaboración

Primero se pone en el recipiente, 750 ml de agua y se le agregan los nopales previamente picados y se dejan ahí durante tres días para que suelten la baba.

Posteriormente se retiran los nopales, se le agrega la cal, cemento y sal para posteriormente revolverlos hasta eliminar los grumos. Finalmente se agrega la pintura a la placa de aluminio y se deja secar.

### Impermeabilizante de Nopal (IMPERPAL)

El IMPERPAL es un impermeabilizante natural elaborado con baba de nopal como componente, los materiales empleados para la elaboración del impermeabilizante se enlistan a continuación (Figura 3.8).

- 1 recipiente de 1 l
- 30 g de Cal.
- 30 g de Pega azulejo
- 25 g de Cemento blanco.
- 3 nopales.
- 20 g de jabón amarillo.
- 25 g.de piedra de alumbre.



Figura 3.8: Materiales para la elaboración del recubrimiento IMPERPAL.

### Procedimiento de Elaboración

Como se observa el impermeabilizante tiene en su composición jabón, para el presente estudio se realizaron dos IMPERPAL con un jabón blanco y uno amarillo (IMPERPAL Bl e IMPERPAL Am respectivamente). El primero fue de la marca ZOTE y el segundo CORONA con el fin de analizar el efecto de este componente, sobre todo en el espectro visible.

### Procedimiento de Elaboración

En el bote se coloca 750 ml de agua y los nopales previamente picados y se tapa. Se deja reposar durante tres días para que suelten la baba de nopal o mucílago. Posteriormente se retiran los nopales del bote y se le agrega la cal, cemento blanco y el pega azulejo y se mezcla uniformemente para evitar grumos.

#### Modo de aplicación:

Primero se limpia la superficie de las placas de aluminio, se humedece y luego se le esparce la area gris con una brocha. Después se aplica el impermeabilizante de manera circular y se deja secar completamente durante un día.

Al día siguiente se raya el jabón y se disuelve en 750 ml de agua hirviendo. Posteriormente se aplica sobre el impermeabilizante y se deja secar por un día.

Posteriormente se pica la piedra se alumbre y se divide en 750 ml de agua hirviendo y se aplica en la superficie del recubrimiento para finalmente dejar secar y proseguir con las mediciones.

### 3.3.2. Preparación de las Muestras para la Medición de la Reflectancia

Para la medición de la reflectancia fue necesario preparar los sustratos para los recubrimientos. El tamaño de las muestras se determinó con base en las dimensiones de la esfera integradora. Para este estudio se consideraron de 2 cm de ancho por 4 cm de largo. Los materiales empleados para la preparación de las muestras de reflectancia se enuncian a continuación:

- Placa de Aluminio de 5/64".
- Sustrato de referencia: sulfato de bario BaSO<sub>4</sub>.
- Recubrimientos a medir.

- Microfibra
- Guantes de látex.
- Micrómetro Vernier con un rango 0.1 – 0.0001".
- Brocha

El sustrato que se eligió como es el aluminio, sin embargo, este no es el único que se utiliza actualmente para la medición de recubrimientos, otro muy comúnmente utilizado son las cartulinas de contraste. Las mediciones para reflectancia espectral se midieron en un rango de 300 a 2500 nm. Posterior a la medición de la reflectancia espectral fue necesario realizar el cálculo de la RST.

Cabe resaltar que cinco de los recubrimientos comerciales reportados se obtuvieron y tres fueron elaborados en el laboratorio. Para estos impermeabilizantes se prepararon sus muestras siguiendo todos los pasos que se describen a continuación. Sin embargo los otros seis RR fueron proporcionados por los fabricantes de pinturas PROINSA y sus muestras fueron adaptadas al tamaño requerido tanto para la reflectancia como emisividad. En la Figura 3.9 se presentan estos RR, donde faltó incluir el RR Fester que también fue preparado en el laboratorio.



Figura 3.9: Recubrimientos comerciales.

Para el proceso de preparación y su manipulación de las muestras se utilizaron guantes de látex, con el fin de evitar dañar a los recubrimientos. Para la fabricación de las muestras, primero se recortaron las placas de aluminio

del tamaño establecido. Posteriormente se procedió a la aplicación del RR. Para cada recubrimiento se realizaron tres capas, luego de cada aplicación se espero a que secaran, después de la tercera capa se esperaron 7 días para poder realizar la medición de la reflectancia, esto con la finalidad de que estuvieran en óptimas condiciones para su medición. Para el proceso de secado fue necesario colocar las muestras en una superficie libre de polvo, luz solar directa o corrientes de aire. En la Figura 3.10 se presentan las muestras utilizadas para la medición de la reflectancia.

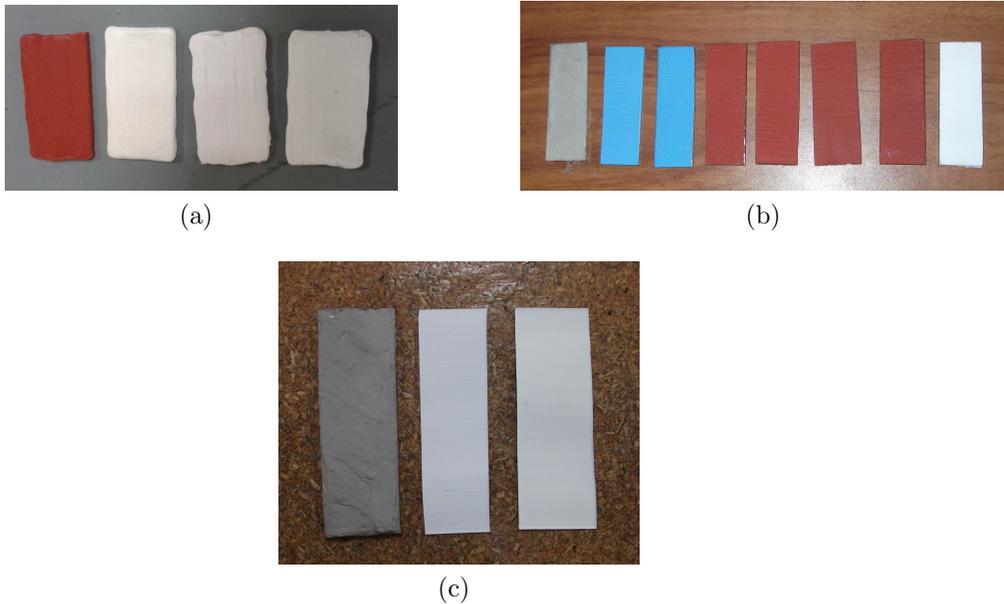


Figura 3.10: Muestras de los recubrimientos para la medición de la reflectancia.

### 3.3.3. Procedimiento para la medición de la reflectancia

En el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) en el departamento de Sistemas Térmicos se cuenta con un Espectrofotómetro Shimadzu Modelo UV-3101PC con una esfera de integración, este dispositivo fue utilizado para la medición de la reflectancia solar espectral,

opera en un rango de 250 a 2500 nm.

Para el manejo del espectrofotómetro primero se retira la cubierta protectora. Después se tiene que asegurar que la esfera de integración esté debidamente instalada. Luego se conecta su cable de alimentación de corriente del espectrofotómetro y de la computadora. Para comenzar con la medición se enciende el espectrofotómetro y la computadora a la cual se encuentra conectado.

Posteriormente se inicia el programa UVPROBE y se realiza la conexión en el botón *connect* que se muestra en la parte inferior de la Figura 3.11. Después se debe seleccionar la opción *Spectrum* para realizar la medición de la reflectancia solar con el espectrofotómetro (3.12).

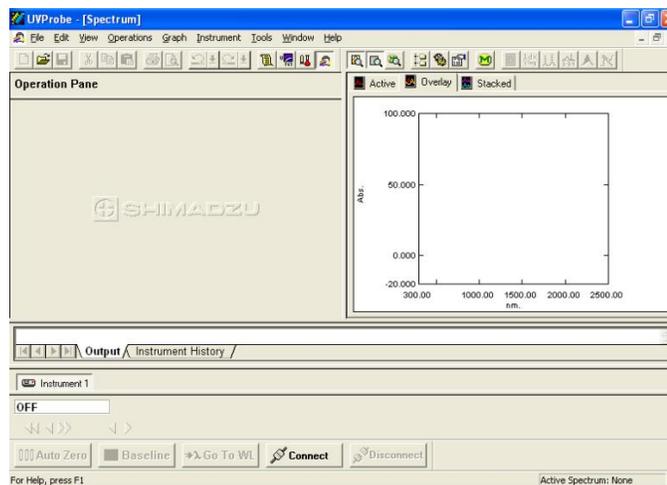


Figura 3.11: UVPROBE.

Posteriormente se debe especificar la propiedad a medir, que en este caso fue Reflectancia, el intervalo de longitud de onda utilizado fue de 300 a 2500 nm con un ancho de la ranura (slit width) de 20 nm. Posteriormente se inicio creando la línea base (baseline) y después se inicia el programa de nuevo con las referencias para corroborar el correcto funcionamiento del equipo, los valores tienen que dar como resultado valores alrededor del 100 % [19].

Antes de realizar la medición de la reflectancia fue necesario, limpiar las muestras con un paño de microfibra, con el fin de que estén de polvo y

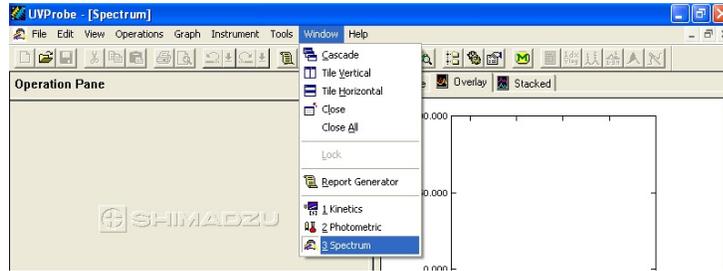


Figura 3.12: UVPROBE procedimiento.

grasa para que estén libres polvo y grasa. Se frotran suavemente hasta que desaparezca de la superficie cualquier rastro visible.

### 3.3.4. Cálculo de la RST

Para el cálculo de las propiedades solares existen dos métodos: el promedio pesado o el método de la ordenada de 50 selecciones, . Para el calculo de la RST se seleccionó el método del promedio pesado, el cual obtiene la reflectancia solar ( $\rho_s$ ) e integra la reflectancia espectral sobre la distribución estándar espectral ( $E_\lambda$ ), como se presenta en la Ecuación 3.1[18].

$$\rho_s = \frac{(\sum_{i=1}^n \rho(\lambda_i) E_{\lambda_i}) \Delta\lambda_i}{\sum_{i=1}^n E_{\lambda_i} \Delta\lambda_i} \quad (3.1)$$

### 3.3.5. Preparación de las Muestras para la Medición de la Emisividad

El procedimiento seguido para la preparación de las muestras para la medición de la emisividad fue el mismo que para la medición de la reflectancia, sin embargo en este caso las dimensiones de las muestras fueron de  $5x5cm$  como se muestra en la Figura 3.13.

Sin embargo cabe resaltar que las mediciones de emitancia solamente pueden realizarse sobre metales, como es el caso de las placas de aluminio, porque deben ser sobre materiales conductores, con el fin de asegurar la transferencia de calor con el disipador.



Figura 3.13: Muestras utilizadas para la medición de la emitancia.

### 3.3.6. Procedimiento de Medición de la Emitancia

En el Instituto de Energías Renovables (IER) de la UNAM se cuenta con un emisometro AE portable con el cual se midió la emisividad de los recubrimientos seleccionados anteriormente. Para la calibración del emisometro se utilizó una muestra patrón de alta emitancia ( $\varepsilon = 0.88$ ) y de baja emitancia ( $\varepsilon = 0.06$ ). La primera es de aluminio anodizado de color negro con recubrimiento teflón y la segunda de bronce niquelado. Primero se colocaron los patrones de alta y baja emitancia en los extremos del disipador.



Figura 3.14: Ubicación de los patrones de alta y baja emitancia sobre el disipador.

Para que las dos muestras permanezcan a la misma temperatura se debe

garantizar la transferencia de calor entre el disipador y las mismas. Por lo tanto, se colocan varias gotas de agua sobre el disipador antes de apoyar las muestras patrones.

Para la medición primero se colocó el emisómetro sobre la muestra patrón de alta emitancia, luego se esperó a que se estabilizará el display (aproximadamente por 90 segundos), si hay diferencia se ajusta con el potenciómetro ubicado sobre el voltímetro digital, al valor indicado en el patrón.

Posteriormente se coloca el medidor sobre el patrón de baja emitancia y se espera hasta su estabilización y si hay una diferencia con respecto al patrón de baja emitancia, se ajusta con un trimmer ubicado en la cabeza del detector al valor de 0.06.

Se repite el proceso anterior hasta calibrar el equipo con los patrones de alta y baja emitancia. La calibración se repite cada 30 minutos para disminuir los errores debido a cambios de temperatura de la muestra o a la temperatura ambiente. Para la medición se ubica la muestra patrón de alta emitancia sobre un extremo del disipador y la muestra a medir sobre el otro extremo.

### **3.3.7. Medición del Envejecimiento**

El envejecimiento o ensuciamiento fue medido a lo largo de seis meses, partiendo del día 10 de diciembre (caso de referencia) y concluyendo el día 10 de junio del 2015. Estas mediciones fueron mensuales. El parámetro que se midió en el período establecido tiempo fue la reflectancia.

Las muestras se colocaron en el techo del edificio de Mecánica en CENIDET ubicado en Cuernavaca, Morelos. Al término de cada mes las muestras eran retiradas y bajadas al laboratorio de Térmica para realizar las correspondientes mediciones de reflectancia con el espectrofotómetro. El procedimiento a seguir fue el siguiente:

1. Bajar las muestras para su medición.
2. Limpiar las muestras con agua y una franela.
3. Dejar secar las muestras.

4. Realizar la medición en el espectrofotometro.

Cabe resaltar que para evitar la contaminación de las muestras fue necesario utilizar guantes de latex, para evitar interferir con la medición.

### **3.4. Resultados de las Mediciones RR**

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones de la reflectancia solar ( $\rho_s$ ) y emitancia térmica ( $\epsilon$ ) de los RR blancos, rojos y azules, así como el cálculo de la Reflectancia Solar Total (RST) y *SRI* para los catorce recubrimientos seleccionados. Los resultados de la reflectancia solar se obtuvieron con el espectrofotómetro. Posteriormente se calculó la RST con el método del promedio pesado [18], luego se midió la emisividad térmica con un emisómetro. Después se calculó el SRI de los RR con base en la ASTM E1980. Finalmente se presentan los resultados del envejecimiento de once de los RR seleccionados, los tres recubrimientos elaborados a base de nopal no se presentan en este apartado.

En primer lugar se presentan los resultados de las mediciones del RR blanco Thermotek que fue el que se seleccionó para la verificación de las mismas, se consideró este RR porque se cuentan con los valores de emisividad y reflectancia en su ficha técnica. Posteriormente se presenta la reflectancia de los otros recubrimientos. Los valores medidos de reflectancia y emisividad se introdujeron al código numérico que se elaboró para cada clima para realizar el estudio paramétrico, los resultados se presentan en el Capítulo 5.

#### **3.4.1. Verificación de las Mediciones**

Para la verificación de las mediciones se seleccionó el RR Thermotek DOBLE ACCIÓN, cuya reflectancia ( $\rho = 0.82$ ) y emisividad ( $\epsilon = 0.91$ ) se presentan en su ficha técnica; la primera fue medida con base en la ASTM C1549, 2014 y la segunda con la ASTM C 1371, 2010, es decir utilizaron un reflectómetro y emisómetro para realizar las mediciones. En el presente trabajo se empleó el mismo estándar para la medición de emisividad, sin embargo para la reflectancia se utilizó la ASTM 903 el cual mide como se había mencionado anteriormente en un rango de 250 a 2500 nm, sin embargo la ASTM C1549 no reemplaza el método de medición de la ASTM E903, 1996

porque el reflectómetro mide solo en cuatro longitudes de onda (380, 500, 650 y 1220 nm). Por lo tanto, las mediciones con un espectrofotómetro son más precisas [23] [18].

La reflectancia espectral del caso de referencia se aprecia en la Figura 3.15. Las líneas punteadas verticales señalan la separación entre el espectro ultravioleta ( $u$ ), visible ( $v$ ) e infrarrojo cercano ( $n$ ), 300 a 400 nm, 400 a 800, 800 a 2500 nm, respectivamente. El símbolo  $\rho$  representa la reflectancia solar.

El RR Thermotek es altamente reflectivo en el espectro visible ( $\rho_{\text{vis}} = 0.85$ ), este valor se asocia directamente al color, en este sentido, el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) contribuye a estos valores de reflectancia, es actualmente utilizado para dar blancura a los recubrimientos. Este pigmento se caracteriza por incrementar la reflectancia de los recubrimientos en el espectro visible y en el infrarrojo cercano, mantiene su color y tiene un alto índice de refracción (2.4). Por lo tanto es el responsable de proporcionarle blancura, opacidad y protección a los recubrimientos.

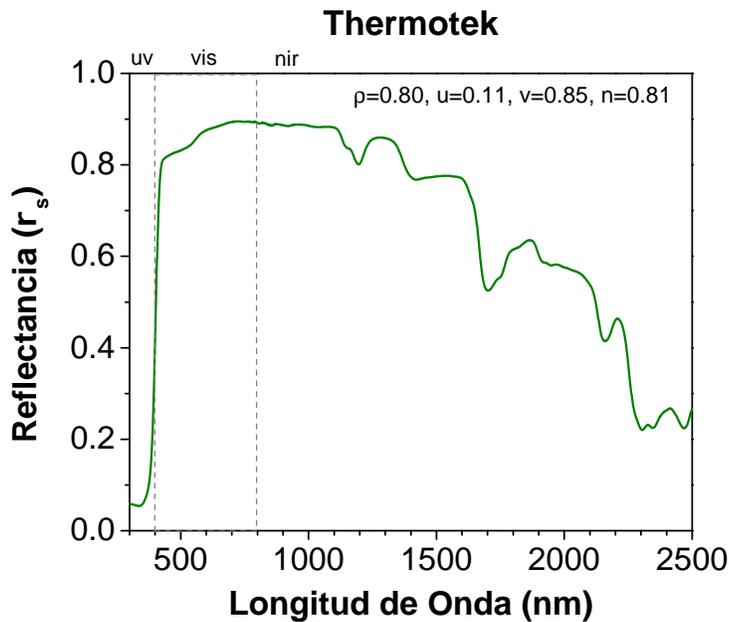


Figura 3.15: Reflectancia espectral para el RR Thermotek Doble Acción.

En la Tabla 3.5 se muestran los resultados detallados del cálculo de la

RST ( $\rho_\lambda$ ), para el espectro ultravioleta ( $\rho_{uv}$ ), visible ( $\rho_{vis}$ ) e infrarrojo cercano ( $\rho_{vis}$ ) del RR Thermotek con respectiva desviación estándar. Se muestra que este RR tiene valor alto reflectancia en el espectro visible e infrarrojo cercano, superior a 0.80.

Tabla 3.5: RST para Thermotek.

<b>Thermotek</b>	
$\rho_\lambda$	$0.80 \pm 0.0014$
$\rho_{uv}$	$0.11 \pm 0.0006$
$\rho_{vis}$	$0.85 \pm 0.0016$
$\rho_{nir}$	$0.81 \pm 0.0012$

La RST calculada en el presente trabajo fue de 0.80 y la reportada en la ficha técnica de 0.81. Esta diferencia es poco significativa, de  $\approx 0.01$ , esto se debe principalmente a que el método y equipo de medición fue distinto. En lo que respecta a la emitancia los resultados fueron de 0.90 y 0.91 para el valor medido y el reportado en su ficha técnica respectivamente. Al igual que en el caso anterior se tiene una variación  $\pm 0.01$ , este valor también representa a la incertidumbre del dispositivo. En el caso de la emisividad se ve ligeramente afectada por las condiciones climáticas. Con estos resultados se validaron las mediciones de los RR.

### 3.4.2. Recubrimientos Blancos

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones de reflectancia para los nueve recubrimientos blancos medidos que fueron medidos en trabajo. Para estos recubrimientos se midió la reflectancia espectral y se calculó la RST para los mismos. En las gráficas individuales de reflectancia se excluyó el RR Thermotek porque se presenta en la verificación de los resultados.

En este trabajo clasificamos a los recubrimientos blancos en dos categorías, los comerciales y los elaborados con baba de nopal Figura 3.16 y 3.17 respectivamente. La RST se representa para todas las gráficas en la parte superior con el símbolo  $\rho$ , la  $u, v$  y  $n$  representan a la reflectancia total para el espectro ultravioleta, visible e infrarrojo cercano respectivamente.

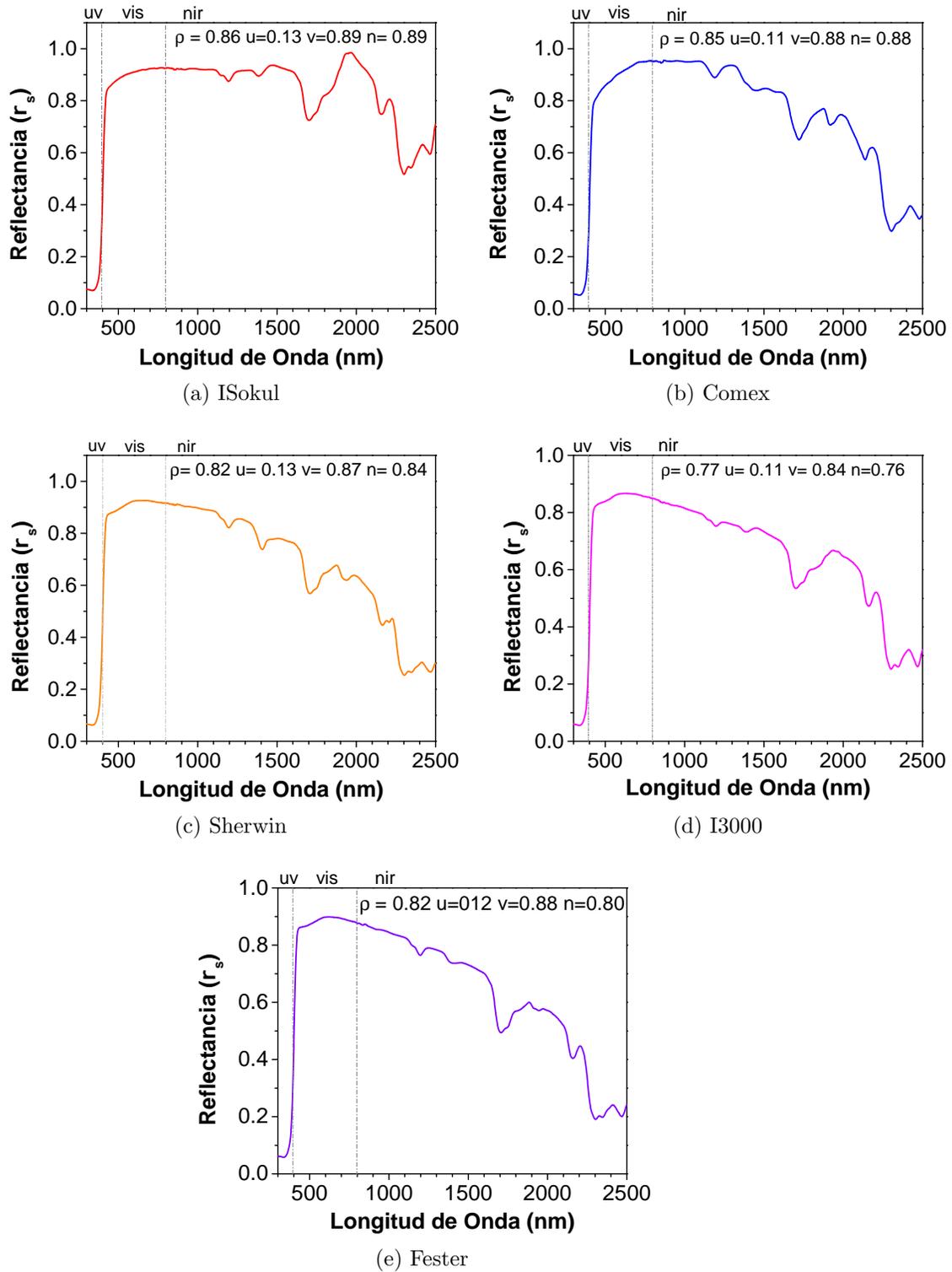


Figura 3.16: Reflectancia espectral para los RR blancos comerciales.

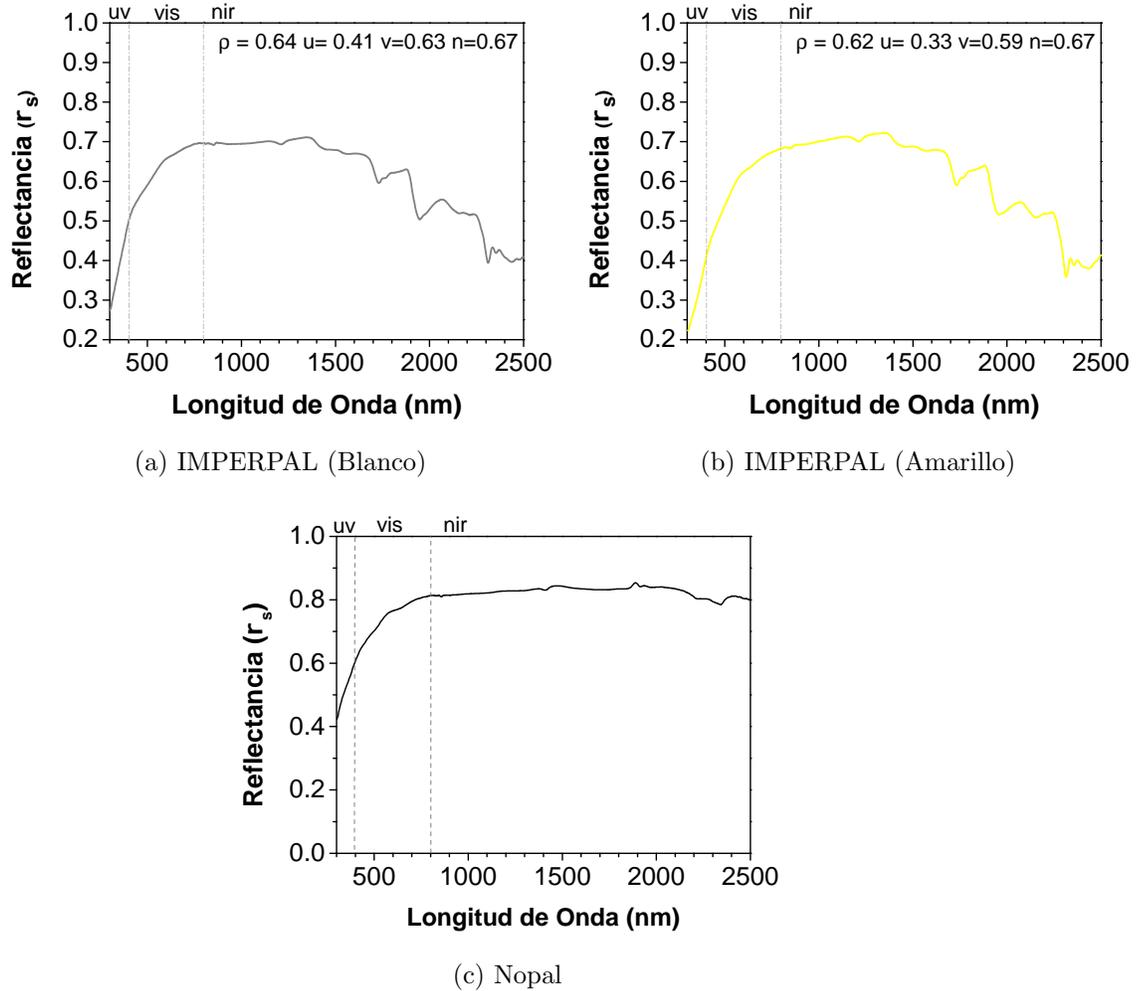


Figura 3.17: Reflectancia espectral para los recubrimientos elaborados con de baba de nopal.

En general se observa que todos los RR comerciales tienen un comportamiento similar, las mayores variaciones se presentan en el infrarrojo cercano. En lo que respecta a los recubrimientos elaborados a base de baba de nopal, los recubrimientos IMPERPAL Amarillo y blanco tienen su comportamiento es similar al de los RR comerciales. Sin embargo el recubrimiento cuyo comportamiento difiere de los RR medidos es la pintura de nopal, esto se debe a que precisamente no es un impermeabilizante sino una pintura, co-

mo se observa su comportamiento es más uniforme en comparación con los impermeabilizantes, su reflectancia en el infrarrojo cercano permanece con un valor casi constante, en cuanto al espectro visible es menor que los RR comerciales blancos, pero esto es debido a que este recubrimiento no contiene  $\text{TiO}_2$ , en cuando al espectro visible su reflectancia es mayor a la de los impermeabilizantes de nopal.

En la Figura 3.18 se muestra la reflectancia espectral para todos los recubrimientos blancos, de esta manera se aprecia más detalladamente estas las diferencias. Los RR comerciales se muestran con un símbolo sólido, mientras que los recubrimientos de nopal tienen un símbolo hueco. El RR con mayor reflectancia en el espectro visible es el RR Comex (línea azul) con un valor máximo de 0.95. También se ve una diferencia considerable de los RR comerciales con respecto a los recubrimientos de nopal, con una diferencia máxima en su reflectancia de 0.3.

En cuanto a la reflectancia el espectro infrarrojo cercano el RR Impac Sokul (ISokul, línea roja) a partir de aproximadamente los 1450 nm se percibe en mayor medida esta diferencia, con valor de reflectancia máximo de 0.98 en los 1963 nm, esta diferencia en comparación con los otros RR en el infrarrojo se consideró que se debe en gran medida a que este RR contiene microesferas de expancel las cuales mejoran el aislamiento térmico, tienen una mayor reflexión solar, sobre todo en el espectro infrarrojo cercano, mayor durabilidad y resistencia a la intemperie.

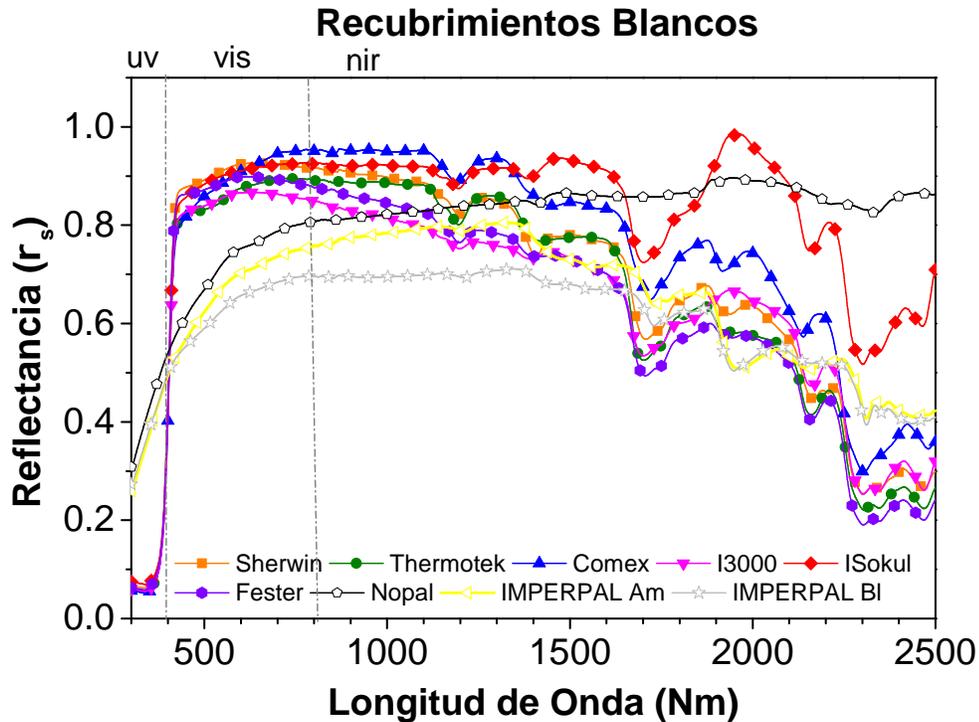


Figura 3.18: Reflectancias espectrales para los recubrimientos blancos.

Por otro lado, en la Figura 3.19 se muestra el gráfico de la RST de los recubrimientos blancos, Estos resultados se calcularon con el método del promedio pesado reportado en la ASTM E903, 1996. El RR Impac Sokul (ISokul) es el que tiene mayor RST ( $\rho_\lambda = 0.86$ ) y el Impac 3000 (I3000) es el que tiene la menor ( $\rho_\lambda = 0.77$ ), en cuanto a lo que respecta a los RR comerciales. En general, se observa que la reflectancia del RR Comex e Impac Sokul son del mismo orden. Por otro lado se aprecia que la reflectancia en el visible de los recubrimientos de nopal es considerablemente más baja que de los RR comerciales. Por lo tanto, los impermeabilizantes con baba de nopal son los que tienen la peor reflectancia 0.64 y 0.62, IMPERPAL BI e IMPERPAL Am respectivamente. También se observa que la RST de la pintura de nopal y el RR Impac 3000 (0.77) son aproximadamente del mismo orden, sin embargo el primero es pintura y el segundo impermeabilizante y su comportamiento espectral difiere en todas las longitudes de onda.

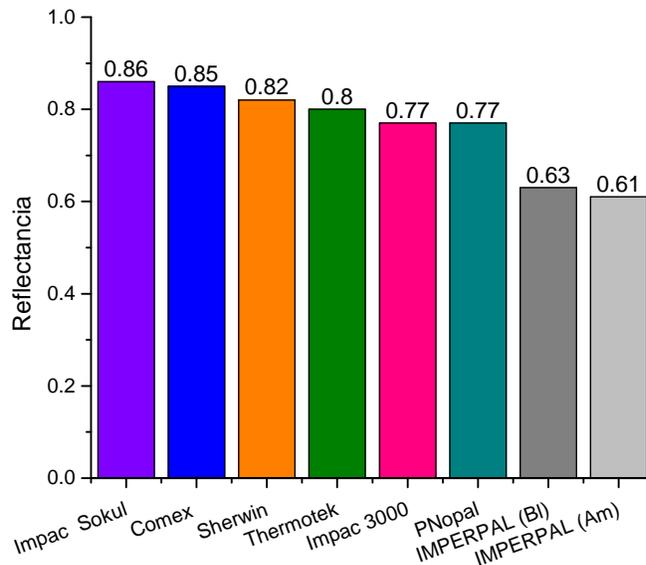


Figura 3.19: RST de los recubrimientos blancos.

Con base en estas mediciones se concluyó que los impermeabilizantes de nopal, no son reflectivos porque su valor de reflectancia es menor al 70%. Por otro lado, el recubrimiento con mayor reflectancia es el que contiene microesferas plásticas huecas (Impac Sokul). Los recubrimientos de nopal aún siguen siendo una alternativa, por su fácil elaboración y su bajo costo.

### 3.4.3. Recubrimientos Azules

En esta sección se presentan los resultados de la medición de la reflectancia de los RR azules fabricados por la empresa PROINSA, cabe resaltar que estos RR no han sido comercializados actualmente. La principal característica RR azules que los diferencia es que uno de ellos contiene microesferas plásticas huecas (expancel), en la Tabla 3.6 se muestra la clasificación de estos RR empleada a lo largo del presente trabajo.

Tabla 3.6: Clasificación de los recubrimientos azules.

Fabricante	Tipo
PROINSA	Expancel
	Normal

En la Figura 3.20 se presenta la reflectancia espectral de los RR azules. La línea negra muestra los resultados para el RR con expancel (Con Expancel) y la roja para el RR sin microesferas (Normal). Como se aprecia el recubrimiento con expancel es el que tiene una mayor reflectancia en el espectro visible (*vis*) e infrarrojo cercano (*nir*), sin embargo en el ultravioleta (*uv*) sus valores son del mismo orden. La variación más representativa de reflectancia en el espectro visible se encuentra a partir de los 565 nm una diferencia máxima de 0.11. El valor máximo en el espectro visible es de 0.70 y 0.69 para el recubrimiento con y sin expancel respectivamente. En lo que respecta a la reflectancia espectral en el infrarrojo se observa que el recubrimiento con tiene mayor reflectancia en todas las longitudes de onda, en el intervalo que va de los 1800 a 2100 nm es dónde presenta la diferencia más representativa; con una reflectancia máxima de 0.95 y 0.75 para el RR con expancel y el normal respectivamente.

En la Tabla 3.7 se muestra la RST de los RR azules, como se observa en el espectro ultravioleta la reflectancia es del mismo orden ( $\rho_{uv} = 0.12$ ). En el visible la diferencia total es de tan solo 0.02 para el RR con expancel y sin expancel. La mayor diferencia entre estos RR se encuentra en el espectro infrarrojo cercano como se había mencionado anteriormente (0.07), esta diferencia se debe principalmente a que uno de estos contiene expancel. En general se observó que el RR con mayor RST es el que cuenta con microesferas de expancel, esto se debe a las microesferas que hacen que se incremente su reflectancia sobre todo en el espectro NIR.

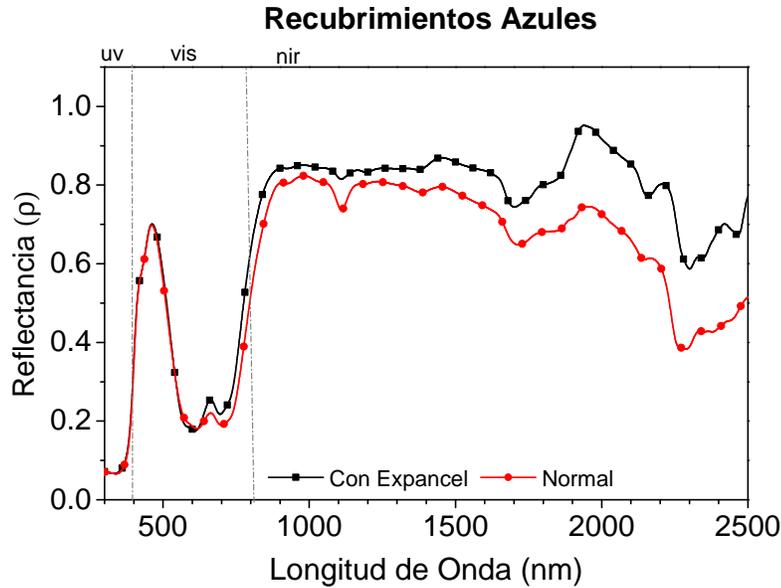


Figura 3.20: Reflectancia espectral para los RR azules.

Tabla 3.7: Reflectancia total de los RR azules.

RST	PROINSA	
	Expancel	Normal
$\rho_{\lambda}$	0.54	0.50
$\rho_{uv}$	0.12	0.12
$\rho_{vis}$	0.38	0.36
$\rho_{nir}$	0.81	0.74

#### 3.4.4. Recubrimientos Rojos

Para el presente estudio se seleccionaron tres recubrimientos rojos que son de la marca COMEX e Impac. Para el caso de los RR Impac se tienen dos el Impac Sokul (ISokul) y el 3000 (I300), la principal característica que los diferencia a estos, es que el primero contiene microesferas de expancel (Tabla 3.8).

Tabla 3.8: Clasificación de los RR rojos.

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>
<b>Comex</b>	TOP TOTAL 3 años
<b>Impac</b>	3000 Sokul

En la Figura 3.21 se muestra la reflectancia espectral de los RR rojos. Se observa que el recubrimiento con una mayor reflectancia es RR Impac Sokul (línea rosa), este efecto se le atribuye a las microesferas de expandel que ayudan a que exista mayor reflectancia sobre todo en el infrarrojo como ya se había observado y mencionado en los casos anteriores.

Por otro lado, el RR que tiene el peor comportamiento es el RR Comex ( $\rho_s = 0.30$ ), sin embargo a partir de los 1200 nm la reflectancia de este recubrimiento con respecto al Impac 3000 es mayor, en general estos dos RR son del mismo orden. Esto se puede corroborar de igual manera en la Tabla 3.9 donde se muestra la RST de los RR rojos, con una diferencia entre estos dos RR de tan solo 0.01 y su máxima variación se presenta en el espectro visible, sin embargo es poco significativa de tan solo 0.01.

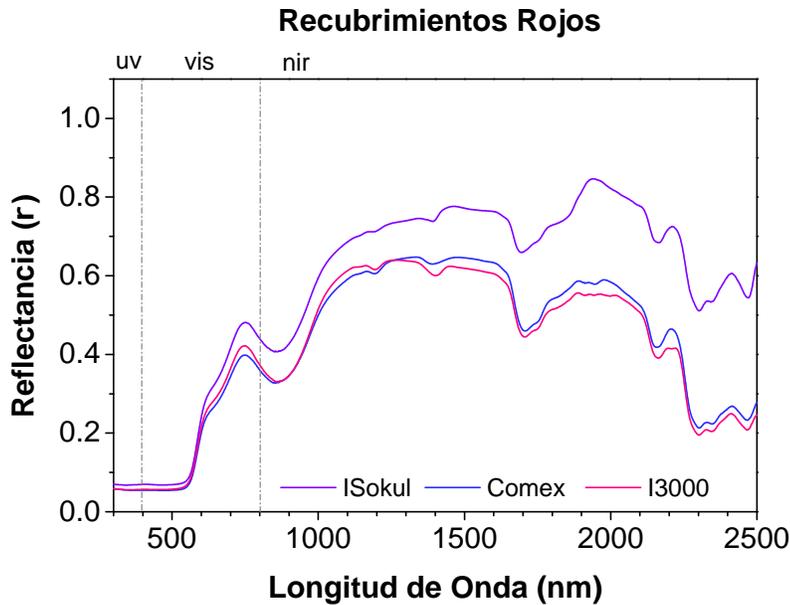


Figura 3.21: Reflectancia espectral para los recubrimientos rojos.

Tabla 3.9: RST de los RR rojos.

RST	ISokul	I3000	Comex
$\rho_\lambda$	0.37	0.31	0.30
$\rho_{uv}$	0.07	0.06	0.06
$\rho_{vis}$	0.22	0.19	0.18
$\rho_{nir}$	0.61	0.49	0.49

## Conclusiones de las mediciones para los RR

En general los RR azules tienen una mayor reflectancia en comparación con los rojos con una diferencia de la RST máxima de 0.24. La reflectancia espectral de los RR azules es mayor en el visible a partir de los 400 a los 560 nm y en los rojos de los 560 a los 800 nm, estas diferencias son causadas por los pigmentos de coloración. En cuanto al espectro infrarrojo cercano en general los RR azules tienen una mayor reflectancia, esto se debe a que el color rojo es más oscuro por lo tanto su reflectancia es menor.

Por otro lado se observa que los RR con mayor RST son los blancos, con una diferencia máxima de 0.55. En el espectro visible tanto los RR azules como rojos tienen un valor bajo de reflectancia en comparación con los blancos debido a su pigmentación. Sin embargo actualmente los fabricantes y algunos investigadores están invirtiendo en tecnología para mejorar la reflectancia de los recubrimientos reflectivos de color, como es el caso del equipo del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley (*LBNL*). Esto se debe entre otras causas a que actualmente los RR más utilizados son de color rojo por tradición, sin embargo este recubrimiento absorbe mayor radiación que un techo sin RR.

Además actualmente se está mejorando la reflectancia de los RR rojos y azules mediante la utilización por ejemplo del óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) con dióxido de titanio, lo cual puede lograr reflectancias de hasta el 0.48 y 0.44 para los RR rojos y azules. Mientras que los recubrimientos convencionales que tienen reflectancias que van del 10 a 20% [1].

Por otro lado, para que un recubrimiento de color sea considerado reflectivo su reflectancia debe estar entre 0.3 y 0.6. Los recubrimientos presentados en el presente trabajo están entre el rango establecido, por lo tanto, son considerados reflectivos. En los que respecta a los RR blancos su reflectancia tiene que ser mayor a 0.70 por lo tanto, los recubrimientos elaborados con baba de nopal no son considerados reflectivos.

### **3.5. Emisividad**

Las mediciones de emisividad total se realizó en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM con base en la ASTM C 1371, 2010. Los resultados obtenidos de las mediciones se presentan en la Tabla 3.10. Donde se puede notar que en general, los recubrimientos tienen un valor de emisividad mayor a 0.80 como era de esperarse, están en un rango de 0.82 a 0.91. En letra negrita se marcó el RR que fue utilizado para la validación de las mediciones.

Tabla 3.10: Emisividad de los Recubrimientos.

Recubrimiento	Color	Emisividad
Comex	Rojo	0.91
	Blanco	0.89
<b>Thermotek</b>	Blanco	<b>0.9</b>
Sherwin Williams	Blanco	0.89
Fester	Blanco	0.85
Impac	Blanco (Sokul)	0.82
	Blanco (I3000)	0.89
	Rojo (ISokul)	0.81
	Rojo (I3000)	0.88
Nopal	Blanco	0.86
IMPERPAL BI	Blanco	0.88
IMPERPAL AM	Blanco	0.88
PROINSA	Azul (Expancel)	0.84
	Azul (Normal)	0.83

El RR con mayor emisividad fue el Comex rojo ( $\epsilon = 0.91$ ) y el Impac Sokul (ISokul) rojo es el que tiene la menor emisividad. Como se aprecia la emisividad es independiente del color y de la reflectancia para los RR, por otro lado son dependientes de la temperatura. Los RR con menor emisividad son los que contienen expancel para el caso de los RR rojos y blancos. A mayor emisividad del RR se incrementa la cantidad y velocidad de calor disipada al medio ambiente así como la capacidad de intercambiar energía radiante por una diferencia de temperaturas.

### 3.6. SRI

El *SRI* se calcula con base en su reflectividad solar, emisividad térmica y temperatura superficial. Este mide la habilidad de la superficie para rechazar calor cuando existe un incremento de temperatura, en otras palabras el *SRI* mide la habilidad de la superficie para reducir la incidencia de calor, cuando hay un incremento de temperatura. Para su cálculo se utilizó la ASTM E1980,2011. En las Tablas 3.11 y 3.12 se muestran el *SRI* para los RR blancos y de color respectivamente.

Tabla 3.11: *SRI* de los RR blancos.

	<b>SRI</b>
<b>Impac Sokul</b>	107
<b>Comex</b>	107
<b>Sherwin Williams</b>	103
<b>Fester</b>	102
<b>Thermotek</b>	100
<b>Impac 3000</b>	96

Tabla 3.12: *SRI* de los RR azules y rojos.

<b>Recubrimiento</b>	<b>Color</b>	<b>SRI</b>
<b>PROINSA Expancel</b>	Azul	62
<b>PROINSA Normal</b>		54
<b>Impac Sokul</b>	Rojo	37
<b>Comex</b>		32
<b>Impac 3000</b>		32

Se puede observar en las Tablas anteriores que el SRI es mayor en el caso de los RR blancos y rojos para el ISokul (SRI = 107 y 37, respectivamente), para el caso de los azules es el RR PROINSA con Expancel (SRI= 62). La principal característica que estos los tres RR mencionados anteriormente, es que todos estos tienen en sus componentes microesferas de expancel. Por otro lado como es de esperarse, los RR blancos tienen un mayor SRI en comparación con los azules y rojos.

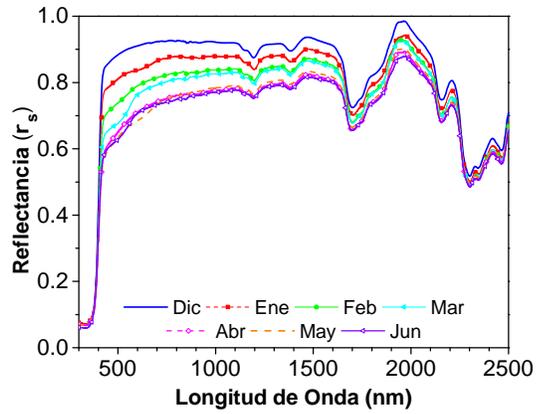
### 3.7. Envejecimiento de los Recubrimientos Reflectivos

Se midió el envejecimiento para los RR blancos, azules y rojos durante un periodo de seis meses para evaluar el efecto de las condiciones climáticas para los diferentes RR. Solamente evaluaron once recubrimientos para estas mediciones, los recubrimientos de nopal no se presentan en este apartado.

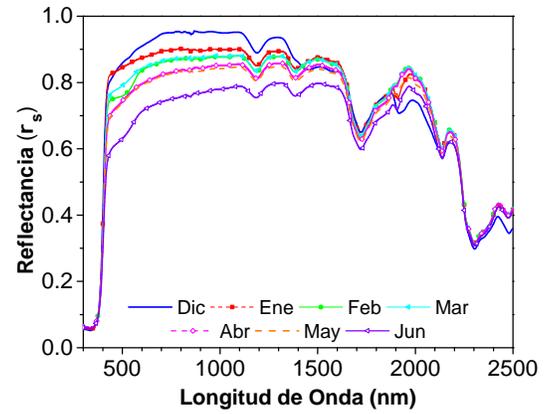
Las mediciones se realizaron del día 10 de diciembre del 2014 al 10 de junio del 2015, tomando como el caso de referencia al mes diciembre, esto se realizó con el fin de evaluar el deterioro de estos RR a lo largo del tiempo. Las mediciones de la reflectancia se realizaron con el espectrofotómetro siguiendo la metodología que se enuncia en la parte superior de este capítulo.

### **3.7.1. RR Blancos**

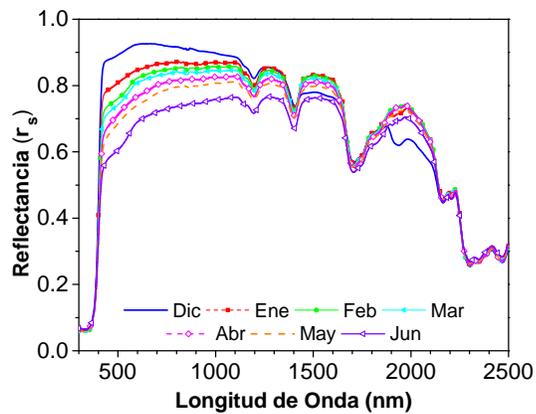
En la Figura 3.22 se ilustra la reflectancia espectral de los RR blancos durante los seis meses de estudio. En general, se observa una reducción más representativa de reflectancia en el espectro visible e infrarrojo cercano (*nir*). La disminución más predominante se encuentra en la un rango de longitud de onda que está entre los 400 a 2200 nm para todos los casos.



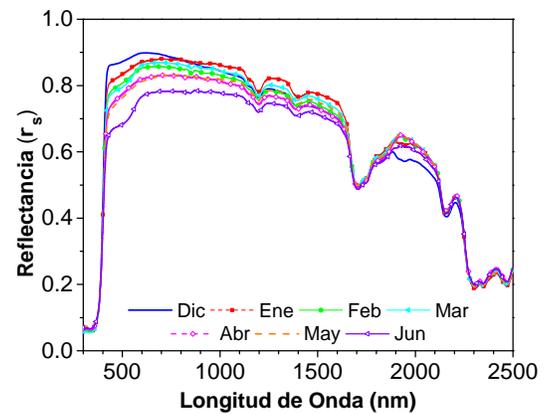
(a) ISokul



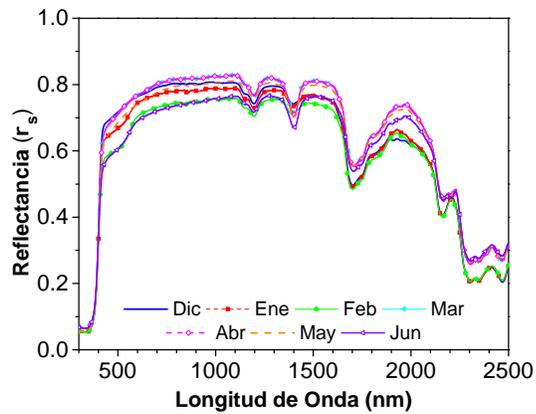
(b) Comex



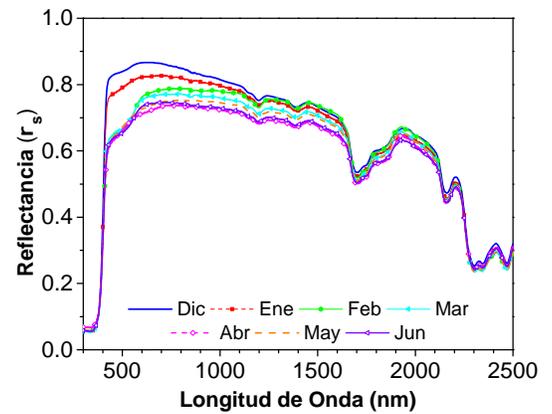
(c) Sherwin



(d) Fester



(e) Thermotek



(f) I3000

Figura 3.22: Envejecimiento de los RR blancos del 10 de diciembre al 10 junio del 2015.

En la Figura 3.23 se muestra su RST de los RR blancos durante el período establecido. El RR Thermotek (línea roja) fue el que sufrió el mayor deterioro con una disminución en su reflectancia de hasta el 22.5 % (Tabla 3.13), seguido por el Impac Sokul 20.93 %. No obstante el RR que sufrió menor degradación de sus propiedades reflectivas fue el Fester, con una reducción porcentual de tan solo (9.75).

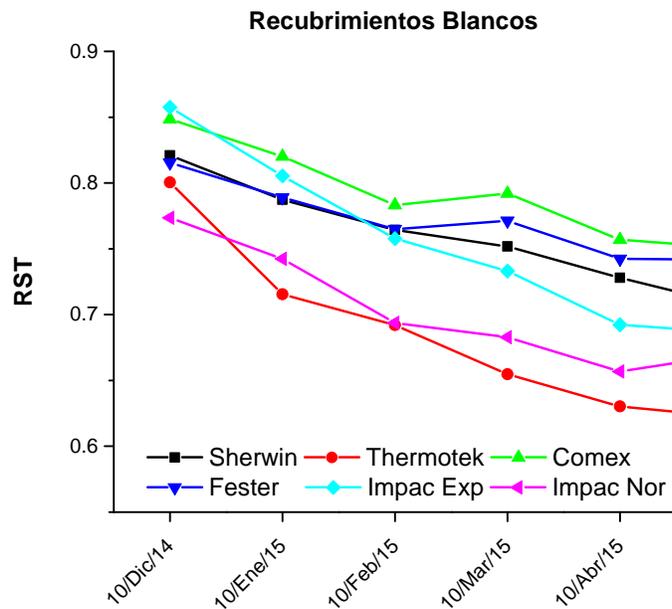


Figura 3.23: Envejecimiento de los RR blancos.

Se observan reducciones significativas a lo largo de seis meses para algunos recubrimientos, por lo que se considera importante su evaluación, para tomar una mejor decisión a la hora de seleccionar el RR.

### 3.7.2. RR Azules

En la Figura 3.24 se muestra la reflectancia espectral donde se ilustra el envejecimiento de los RR azules durante el período comprendido del 10 de diciembre al 10 de junio del 2015.

Tabla 3.13: Porcentaje de reducción de RST de los recubrimientos en marzo con respecto al mes inicial (Diciembre).

Recubrimiento	Porcentaje de Reducción de Reflectancia
Sherwin Williams	14.63 %
Thermotek	<b>22.5 %</b>
Comex	11.76 %
Fester	<b>9.75 %</b>
Impac Sokul	20.93 %
Impac 3000	14.28 %

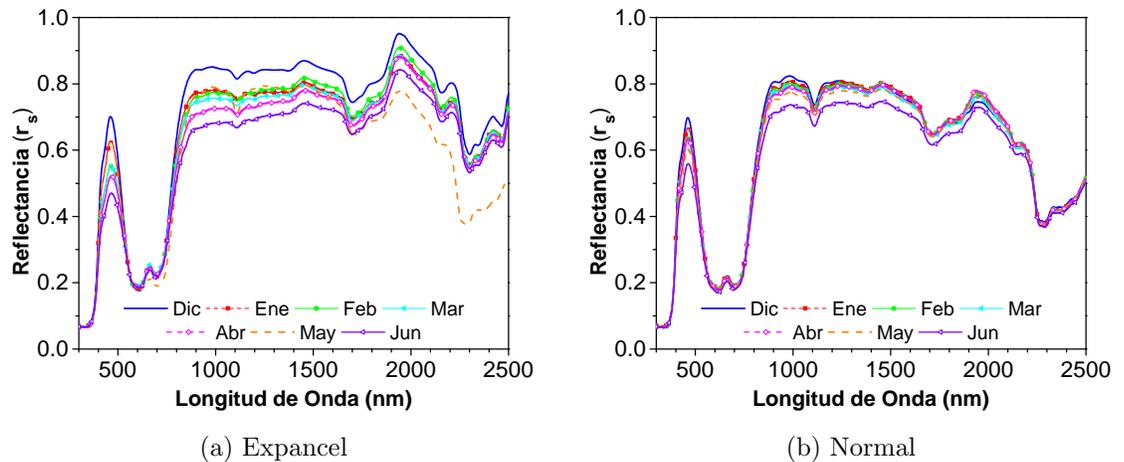


Figura 3.24: Envejecimiento de los RR azules DEL 10 de diciembre al 10 de junio del 2015. a) con microesferas de expancel y b) Normal

Como se aprecia el RR con microesferas de expancel se degrada más rápido, sin embargo esta diferencia es poco significativa. En el rango de 400 a 500 nm y de 800 a 2200 nm es dónde se percibe más esta degradación. En la Tabla 3.14 se muestran la RST de los RR azules para los seis meses. En junio se percibe que la diferencia entre los RR azules es ahora, de solo 0.01.

Tabla 3.14: RST de los RR azules en el período del 10 de diciembre al 10 de junio del 2015.

	<b>Expancel</b>	<b>Normal</b>
<b>Diciembre</b>	0.54	0.50
<b>Enero</b>	0.51	0.50
<b>Febrero</b>	0.49	0.49
<b>Marzo</b>	0.49	0.48
<b>Abril</b>	0.47	0.48
<b>Mayo</b>	0.47	0.45
<b>Junio</b>	0.46	0.45

Para estos RR azules se tienen diferencias porcentuales de su reflectancia inicial con respecto a la medida en junio de 14.81 y el 10 %, para el RR con expancel y normal correspondientemente.

### 3.7.3. RR Rojos

En la Figura 3.25 se muestra la reflectancia para los RR rojos en el período del 10 de diciembre al 10 de junio del 2015, para observar el efecto de las condiciones climáticas.

En la Figura 3.26 se muestra la RST de los RR rojos a lo largo del tiempo (envejecimiento). Para estos RR la reducción en su reflectancia es menor que en el caso de los RR azules y blancos, la diferencia de reflectancia máxima es de 0.03. En la Tabla 3.15 se muestra la disminución a lo largo del tiempo con una reducción porcentual de 9.68, 5.41 y 3.33 % para el RR Impac 3000, Impac Sokul y Comex respectivamente. En general, la disminución de la reflectancia es poco significativa para estos RR, sin embargo el que mejor conserva sus propiedades superficiales de reflectancia es el RR Comex.

En la Tabla 3.15 se muestran la RST de los recubrimientos reflectivos de color rojo y su envejecimiento a lo largo del tiempo.

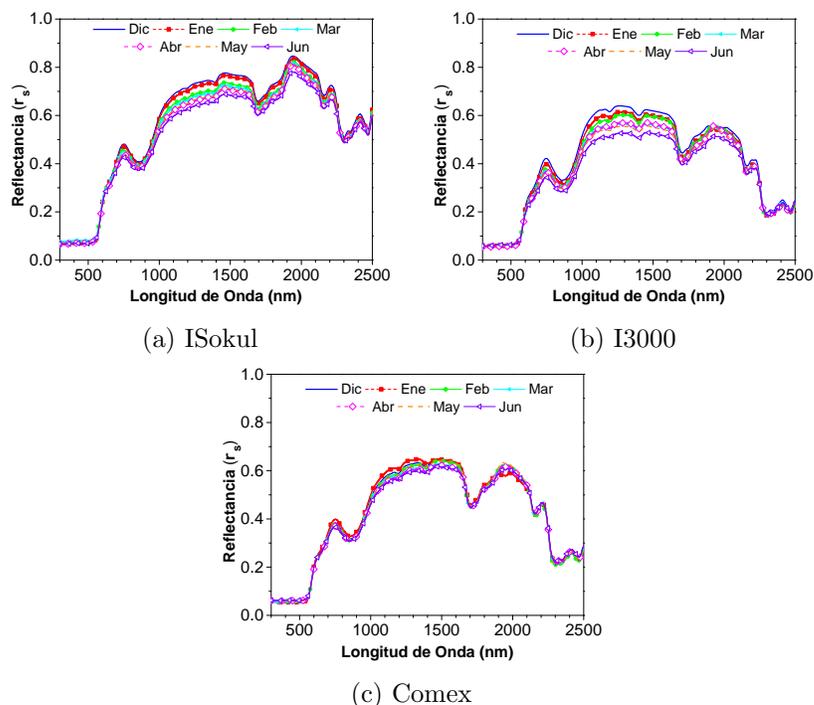


Figura 3.25: Envejecimiento de los RR rojos.

Tabla 3.15: Envejecimiento de los recubrimientos reflectivos rojos.

	Dic	Ene	Febr	Mar	Abr	May
<b>Comex</b>	0.30	0.30	0.29	0.29	0.29	0.29
<b>Impac Sokul</b>	0.37	0.36	0.36	0.36	0.35	0.35
<b>Impac 3000</b>	0.31	0.30	0.29	0.28	0.28	0.28

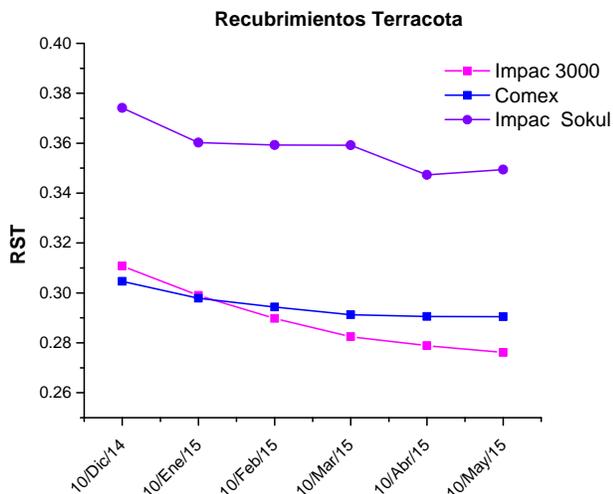


Figura 3.26: RST para los RR rojos en el periodo del 10 de diciembre al 10 de junio del 2015.

### **Conclusiones del Envejecimiento de los RR**

Se puede observar que los RR rojos y azules tienen reducciones poco significativas en comparación con los RR blancos. Uno de los factores que influyen en esto, es que el RR blanco es más propenso al ensuciamiento, es decir se le adhieren en mayor medida partículas de polvo.

Se considerará importante evaluar el envejecimiento de los RR reflectivos, porque si se tienen RR con degradaciones exponenciales, tal vez sea más conveniente elegir un recubrimiento cuya reflectancia sea un poco menor pero su durabilidad sea mayor, para implementar esta estrategia pasiva menor cantidad de veces y reducir costos.



# Capítulo 4

## Modelo Físico y Matemático para el Techo

En este capítulo se presentan el modelo físico del techo, sus suposiciones y su formulación matemática. En primer lugar se presenta el modelo físico completo del techo con un recubrimiento reflectivo para la transferencia de calor por conducción, mediante el planteamiento de la ecuación gobernante de conducción de calor promediada en el tiempo para el modelo completo. Para la presente tesis se plantearon dos modelos para techos, el primero es una loza de concreto con un RR, el segundo es un sistema compuesto que consta de un material aislante, una loza de concreto y un RR en la parte exterior. Posteriormente se describe el método de solución, discretización de las ecuaciones diferenciales, la descripción del algoritmo de solución, verificación del código, independencia de malla tanto espacial como temporal. Para la solución de las ecuaciones se utilizó el Método del Volumen Finito (MVF). Finalmente se describen los datos climáticos del caso de estudio.

Se analizó el modelo físico para un techo bidimensional donde interviene la transferencia de calor por conducción principalmente, sin embargo en su frontera norte se consideró la transferencia de calor por radiación y convección y en la sur se consideró la conducción y convección. Se analizaron seis climas representativos de la República Mexicana, que son Hermosillo, Monterrey, Mérida, Cd. de México, Xalapa y Villahermosa que fueron seleccionados con base en el INEGI.

## 4.1. Modelo Físico del Techo

En la Figura 4.1 se muestra el modelo físico representativo del techo que consiste en una placa horizontal bidimensional con y sin RR. La configuración 4.1a es un techo de concreto simple con un espesor ( $H_y$ ) de 10 cm. La segunda es un techo compuesto de concreto y poliestireno con un espesor de 12.54 cm ( $H_y$ ); el segundo componente tiene un espesor ( $H_{y1}$ ) de 2.54 cm. El ancho del techo ( $H_x$ ) considerado fue de 1 m. Ambas configuraciones fueron analizadas con y sin RR en su superficie de estudio. El espesor de los RR se consideró despreciable.

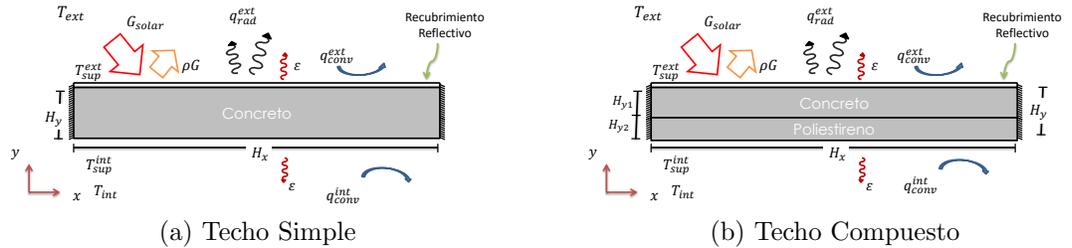


Figura 4.1: Modelos físico, a) techo simple y b) techo compuesto.

Los materiales que se utilizaron para resolver el modelo físico son considerados homogéneos, por lo tanto la conductividad térmica se considera constante. La reflectancia y emitancia de los recubrimientos se midieron y validaron.

La transferencia de calor en un techo se puede modelar a partir de la ecuación gobernante de conducción de calor, para el planteamiento del modelo matemático se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Estado pseudotransitorio.
2. Modelo bidimensional.
3. Medio Compuesto.
4. El edificio cuenta con aire acondicionado ( $T_{int} = cte = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

5. La temperatura ambiente, radiación y velocidad del viento se obtuvieron de una estación meteorológica mediante mediciones.
6. Propiedades Constantes ( $\rho, C_p, k, \rho_s$ ).
7. El techo se considera un emisor gris, difuso y reflector de radiación.
8. Propiedades ópticas independientes de la longitud de onda y temperatura.

La consideración de bidimensionalidad se basa en considerar al techo muy alargado de tal manera que, es válido que un corte transversal proporcione información sobre la temperatura, además las propiedades son consideradas constantes a lo largo del techo, por lo que se considera que este tipo de análisis proporciona información sobre el sólido. Esta consideración simplifica el problema, lo que trae como consecuencia reducciones significativas del tiempo computacional.

En lo que respecta a la consideración del estado pseudotransitorio se basa en que la temperatura es variable a lo largo del día por lo tanto se considera importante medir la radiación y la temperatura en cada paso de tiempo y usar esta información para modelar el sistema en diferentes tiempos imitando el comportamiento transitorio.

Se consideró un medio compuesto para el segundo caso de estudio porque en la vida real los techos normalmente están compuestos por varios materiales, por lo tanto, se justifica porque lo que se plantea es tener un modelo de techo más cercano a uno real.

El considerar la temperatura del aire al interior del techo como constante porque actualmente como se mencionó en el Capítulo 1, actualmente gran cantidad de edificios utilizan sistemas climatización, sobre todo en verano y de esta manera se puede tener un mayor control sobre las variables al interior del edificio.

Para obtener resultados más acercados a la realidad se consideró conveniente tomar los valores de temperatura ambiente, radiación y velocidad del viento, con base en las mediciones realizadas por estaciones meteorológicas.

La consideración cinco es adoptada en forma frecuente en el intervalo de temperatura donde opera el sistema. Las propiedades superficiales (reflextancia, emitancia) se midieron experimentalmente.

En la consideración ocho se asume como una aproximación al flujo incidente de radiación solar normal. Por lo general, la radiación solar incide oblicuamente sobre el techo, por lo que la normal de esa radiación incidente, además la radiación solar incidente es variable en el tiempo. Para este estudio, se consideró un valor constante.

## 4.2. Modelo Matemático

La ecuación gobernante de conducción de calor para una placa bidimensional, en estado transitorio se presenta en la Ec. 4.1. En el presente trabajo el análisis realizado fue pseudotransitorio, sin embargo se resuelve numéricamente con la misma ecuación.

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{k}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (4.1)$$

Donde T es la Temperatura, k la conductividad térmica,  $C_p$  el calor específico y  $\rho$  la densidad. A continuación se presentan las condiciones de frontera y su método de solución.

### 4.2.1. Condiciones de Frontera

El techo se analizó con y sin recubrimiento en  $y = H_y$  (superficie exterior). La superficie externa recibe un flujo de calor ( $q$ ) por la radiación solar ( $G$ ) y un intercambio de calor por radiación y convección hacia el medio ambiente exterior ( $Q_{rext}$  y  $Q_{cext}$ , respectivamente), cuya adición da como resultado el flujo de calor total de la superficie exterior ( $Q_{Total}$ ). En la superficie interior ( $y = 0$ ) el techo intercambia calor por convección ( $Q_{cint}$ ) hacia el interior con una  $T_{int} = 24$  °C.

La condición de frontera en la superficie exterior ( $y = H_y$ ) e interior ( $y = 0$ ) se presentan en las Ecuaciones 4.2 y 4.3, respectivamente. Mientras que las fronteras verticales (en  $x = 0$  y en  $x = H_x$ ) se consideraron

adiabáticas (Ecuaciones 4.4 y 4.5). Para la solución del modelo matemático se utilizó el método del volumen finito (MVF).

Para  $y = H_y$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha G + h_{amb} (T - T_{air}) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_{ext}^4) \quad \text{de } 0 \leq x \leq H_x \quad (4.2)$$

Para  $y = 0$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h_{int} (T - T_{int}) \quad \text{de } 0 \leq x \leq H_x \quad (4.3)$$

Para  $x = H_x$ :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{de } 0 < y < H_y \quad (4.4)$$

Para  $x = 0$ :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{de } 0 < y < H_y \quad (4.5)$$

La ecuación 4.2 involucra los términos de los flujos de calor por convección y radiación definidos en las ecuaciones siguientes:

$$Q_{cext} = h_{ext} \cdot (T_{sext} - T_{amb}) \quad (4.6)$$

$$Q_{rext} = \epsilon \sigma \cdot (T_{sext}^4 - T_{sky}^4) \quad (4.7)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección  $h_{ext}$  fue calculado con base en:

$$h_{ext} = 2.8 + 3.0V \quad (4.8)$$

Donde  $V$  es la velocidad del aire que está en  $m/s$ . El intercambio de radiación entre el techo y la superficie  $T_{amb}$  se calcula en función de la temperatura del aire exterior (Ecuación 4.9). Los valores de  $T_{amb}$  y  $T_{ext}$  están en  $K$ .

$$T_{amb} = 0.0552T_{ext}^{1.5} \quad (4.9)$$

La adición de las Ecuaciones 4.6 y 4.7 representa el flujo de calor total de la superficie exterior ( $Q_{Total} = Q_{cext} + Q_{rext}$ ).

Por otra parte en la Ecuación 4.10 se presenta el cálculo del flujo de calor convectivo de la superficie interior, que corresponde al término ubicado del lado derecho de la Ecuación 4.3

$$Q_{cint} = h_{int} \cdot (T_{sint} - T_{int}) \quad (4.10)$$

El coeficiente de transferencia de calor  $h_{int}$  es igual a 9.26 o 6.13  $\text{Wm}^{-2} \text{K}^{-1}$  según la dirección del flujo de calor (ascendente o descendente, respectivamente) [24].

### 4.3. Método de Solución: Ecuación de Conducción de Calor

La ecuación gobernante de conducción de calor, se pueden resolver de manera analítica y numérica, sin embargo debido a su condición de frontera no lineal en la parte superior, se complica encontrar esta solución, por lo tanto se recurrió a utilizar un método numérico para su solución.

Entre los métodos numéricos más utilizados para resolver las ecuaciones de conservación son: el Método de Volumen Finito (MVF), Método de Diferencias Finitar (MDF) y el Método de Elemento Finito (MEF). La diferencia principal entre ellos es su forma de discretización. Para el presente trabajo se seleccionó el Método de Volumen Finito, comparado con el MDF, este método es mucho más flexible (se puede implementar en mallas estructuras y no estructuradas), en el área de la dinámica de fluidos computacional el MVF es la más utilizada, una de sus características más importantes es que la solución numérica para la variable de estudio, satisface en forma exacta a las ecuaciones de conservación sobre los volúmenes de control. La solución del MVF empleada para el caso se estudio se enlista a continuación:

1. Se definió la malla numérica.
2. Se generó la malla numérica.
3. Se discretizó la ecuación gobernante de conducción de calor para un sistema bidimensional en estado transitorio, en otras palabras, la ecuación diferencial se integró sobre cada volumen de control para reducirlo a un sistema de ecuaciones algebraicas.

4. Se seleccionó el método de solución de sistemas de ecuaciones algebraicas, el método de Gauss Seidel en direcciones alternantes (LGS-ADI).

El MVF se caracteriza por que en el centro de cada volumen de control se tiene un nodo computacional, en este nodo se calculan las variables. Al discretizar las ecuaciones se obtiene una ecuación algebraica para cada volumen de control como se mencionó anteriormente.

### 4.3.1. Generación de Malla Computacional

La malla computacional juega un papel muy importante, ya que mientras más se adapte la geometría del caso de estudio a la realidad los resultados serán físicamente más aceptables. Para resolver el modelo físico se generó una malla computacional, que consiste en representar las características geométricas del sistema, en otras palabras las coordenadas de los nodos ( $x$ ), el espesor de los volúmenes de control ( $\partial x$ ) la distancia entre los nodos ( $\delta x$ ), para este caso se utilizó una arreglo con contacto en la frontera, es decir que todos los volúmenes de control internos tienen el mismo espesor ( $\partial x$ ) (Figura 4.2).

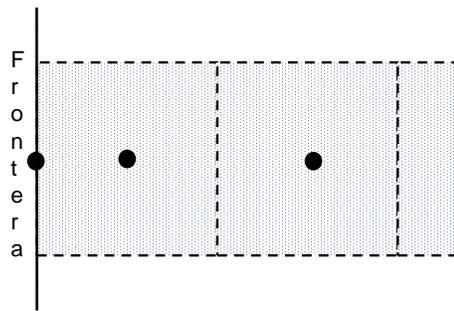


Figura 4.2: Condición de frontera del caso de estudio.

Además al seleccionar una malla adecuada, el tiempo de computo puede verse reducido, porque este está ligado directamente a ella. Para este caso se realizó la independencia de malla espacial y temporal.

En la Figura 4.3 se muestra el volumen de control de la malla bidimensional utilizada para la discretización de la ecuación de conducción de calor

4.1, la cual es representativa para cualquier volumen de la malla.

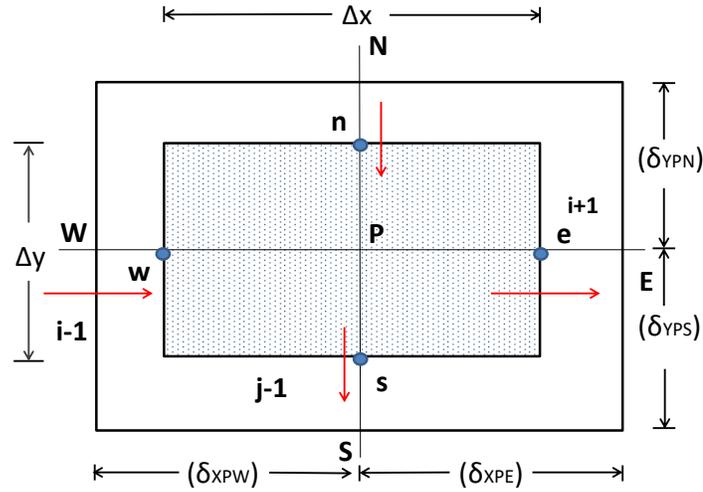


Figura 4.3: Malla bidimensional para el caso de estudio.

### 4.3.2. Discretización de la Ecuación de Conducción de Calor

La discretización de la ecuación de conducción de calor se realizó con el método del volumen finito, básicamente este método consiste en reducir la ecuación diferencial parcial del modelo matemático de una ecuación de segundo orden a un conjunto de expresiones algebraicas. La Ecuación 4.11 fue la empleada en los nodos internos.

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \quad (4.11)$$

Donde:  $\phi = T$ ,  $\Gamma = \frac{k}{C_P}$ , se resolvió para  $0 < x < H_x$  y  $0 < y < H_y$ . La discretización se resolvió mediante la integración del dominio de interés. Los resultados de la integración se presenta a continuación:

$$\left[ \frac{\partial \bar{\rho\phi}}{\partial t} \right] \Delta x \Delta y = \left[ \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e + \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] \Delta y + \left[ \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n + \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] \Delta x + \bar{S} \Delta x \Delta y$$

Posteriormente se utilizó el esquema de interpolación implícito para el término transitorio (tiempo)

$$\left[ \frac{(\rho\phi)_P^t - (\rho\phi)_P^{t_0}}{\Delta t} \right] \Delta x \Delta y = \left[ \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e^t + \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w^t \right] \Delta y + \left[ \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n^t + \left( \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s^t \right] \Delta x + \bar{S} \Delta x \Delta y$$

Posteriormente se utilizó la interpolación de esquema centrado, considerando los valores de los nodos adyacentes de la interface del volumen de control (nodo E,W,N y S), se obtiene de manera simplificada:

$$\begin{aligned} \phi_p \left( \frac{\rho \Delta x \Delta y}{\Delta t} \right) + \phi \left( \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} + \frac{\Gamma_w}{\delta x_{PW}} \right) \Delta y + \phi_P \left( \frac{\Gamma_n}{\delta y_{PN}} + \frac{\Gamma_s}{\delta y_{PS}} \right) \Delta x = \phi_E \left( \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} \right) \Delta y \\ + \phi_w \left( \frac{\Gamma_w}{\delta x_{PW}} \right) \Delta y + \phi_n \left( \frac{\Gamma_n}{\delta y_{PN}} \right) \Delta x + \phi_s \left( \frac{\Gamma_s}{\delta y_{PS}} \right) \Delta x + \phi_P^{t_0} \left( \frac{\rho \Delta x \Delta y}{\Delta t} \right) + \bar{S} \Delta x \Delta y \end{aligned}$$

Se agrupan los términos de la ecuación en coeficientes como sigue

$$\begin{aligned} \underbrace{\left[ \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} - \frac{\Gamma_w}{\delta x_{PW}} + \frac{\Gamma_n}{\delta y_{PN}} - \frac{\Gamma_s}{\delta y_{PS}} \right]}_{a_P} T_P = \\ \underbrace{\frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}}}_{a_E} T_E + \underbrace{\frac{\Gamma_w}{\delta x_{PW}}}_{a_W} T_W + \underbrace{\frac{\Gamma_n}{\delta y_{PN}}}_{a_N} T_N + \underbrace{\frac{\Gamma_s}{\delta y_{PS}}}_{a_S} T_S + \underbrace{\rho_P^0 C_p \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t}}_{a_0} T_0 + \underbrace{a_P^0 \phi_P^0}_b \end{aligned} \quad (4.12)$$

De forma detallada, los coeficientes para este esquema se presentan como:

$$\begin{aligned}
a_P &= a_E + a_W + a_N + a_S + \rho_P C_p \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} \\
a_P^0 &= \rho_P^0 C_p \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t} \\
a_W &= \frac{\Gamma_w}{\delta x_{PW}} \Delta y \\
a_E &= \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} \Delta y \\
a_S &= \frac{\Gamma_s}{\delta y_{PS}} \Delta x \\
a_N &= \frac{\Gamma_n}{\delta y_{PN}} \Delta x \\
b &= a_P^0 \phi_P^0
\end{aligned}$$

La ecuación resultante de coeficientes agrupados que resulta de la integración espacial del volumen de control se obtuvo de la ecuación discretizada general en estado transitorio. Cabe resaltar que este trabajo se resolvió en estado pseudotransitorio. Esta ecuación se puede expresar como:

$$a_p \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + b \quad (4.13)$$

### 4.3.3. Algoritmo LGS ADI

Para la solución del código numérico se utilizó el solver Gauss Seidel con Direcciones Alternantes (LGS-ADI), el método de Gauss- Seidel es un método iterativo que surge de la modificación del método iterativo Jacobí, a diferencia de que en este se toman los valores recientes de cada iteración, sin embargo la convergencia de este método no es tan rápida, debido a la forma en la que transfiere la información con los nodos vecinos. Sin embargo el método que Gauss Seidel Línea por línea es el empleado en este trabajo, estos métodos son utilizados ampliamente para resolver problemas de CFD, parten del método de TDMA, existen variaciones del método de Línea por línea, entre ellos el LBL-x,LBL-y, LBL-ADI, LGS-x, LGS-y y LGS-ADI. El método de línea de Gauss-Seidel de direcciones alternantes (LGS-ADI), es la combinación del LGS-x y LGS-y. Se inicia con cualquiera de los dos métodos y estos te darán

un valor de salida “ $\phi$ ” para todo el dominio de la solución y estos valores resultantes se utilizan para aplicar el segundo método y así sucesivamente hasta que converja el sistema. Básicamente los pasos a seguir para desarrollar el algoritmo son:

1. Estimar los valores para todos los puntos de la variable  $\phi_P^{n=0}$ .
2. El cálculo inicia con los valores inventados para determinar una primera aproximación para los valores de la variable sobre su diagonal principal, posteriormente los valores resultantes se utilizan para una segunda ronda de iteraciones, es decir se toman los valores calculados para las siguientes iteraciones.
3. Se renombra la variable  $\phi_P^n = \phi_P^{n+1}$  este método es aplicado a lo largo de líneas horizontales y verticales hasta lograr satisfacer el criterio de convergencia para la variable  $\phi_P$ .
4. Se resuelve el LGS-X y al terminar una primera corrida los valores que salen del programa como  $\phi_P^n$  posteriormente se resuelve el LGS - y, al terminar de calcular los valores finaliza la primera iteración.
5. Se repite el paso anterior hasta que se satisface el criterio de convergencia de la variable  $\phi_P$ .

$$[\phi_P(i)]^{n+1} = \frac{a_W(i) [\phi_W(i-1)]^{n+1} + a_E(i) [\phi_E(i+1)]^{n+1} + [b^{**}(i)]^n}{a_P(i)} \quad (4.14)$$

Dónde  $b^{**} = a_S(i) [\phi_S(i-1)]^n + a_N(i) [\phi_N(i+1)]^n + [b(i)]^n$ .

#### 4.3.4. Discretización de las Condiciones de Frontera

Para resolver el problema del caso de estudio, se define un valor adivinado inicial y las condiciones de frontera, de estas depende la solución numérica. En los nodos ubicados en las frontera no se considera la masa ni el volumen. Las condiciones de frontera más utilizadas son la de Dirichlet (de primera clase), Neuman (de segunda clase) y Robín (de tercera clase), en este caso de estudio se utilizaron las tres.

### Condición de Frontera de Dirichlet

En la frontera de primera clase se considera un valor constante de la variable, el cual es independiente de los nodos vecinos y permanece constante a lo largo del proceso. Se deduce a partir de la ecuación algebraica en notación de coeficientes agrupados como:

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_S \phi_S + a_N \phi_N + b \quad (4.15)$$

Dónde

$$\begin{aligned} a_P &= 1 \\ a_E &= 0 \\ a_W &= 0 \\ a_N &= 0 \\ a_S &= 0 \\ b &= \phi_{frontera} \end{aligned}$$

Por lo tanto, con base en los resultados de la 4.15 se deduce:

$$\phi_P = \phi_{frontera} \quad (4.16)$$

### Condición de Frontera de Neuman

En la condición de frontera de segunda clase o de Neuman se conoce el gradiente de la variable en la dirección normal a la frontera correspondiente. Esta condición se puede expresar como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = A \quad (4.17)$$

Para las condiciones de frontera Este y Oeste del caso de estudio  $A = 0$  debido a que se encuentra aislado en las fronteras. Esta variación se relaciona con el nodo más cercano en la dirección de variación.

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial x} &= A \\ \frac{T_E - T_P}{\delta x_{PE}} &= A \\ T_E - T_P &= A\delta x_{PE} \\ T_P &= T_E - A\delta x_{PE}\end{aligned}$$

Donde  $A\delta x_{PE} = 0$ , debido a que el caso de estudio tiene fronteras adiabáticas. Esta condición de frontera es la oeste.

$$\begin{aligned}a_P &= 1 \\ a_E &= 1 \\ a_W &= 0 \\ a_N &= 0 \\ a_S &= 0 \\ b &= 0\end{aligned}$$

La condición de frontera “Este” es análoga a los utilizados en la condición de frontera anterior como se presentan a continuación:

$$\begin{aligned}a_P &= 1 \\ a_E &= 0 \\ a_W &= 1 \\ a_N &= 0 \\ a_S &= 0 \\ b &= 0\end{aligned}$$

Cuándo el valor de la derivada es nulo, el término “ b” es igual a cero.

### Condición de Frontera de Robín

La condición de frontera de Robín, también conocida como de tercera clase, esta condición se encuentra gobernada por la Ecuación diferencial de primer orden no homogéneo que se expresa como:

$$k \cdot \frac{\partial T_{frontera}}{\partial n} + h \cdot T_{frontera} = A \quad (4.18)$$

Esta condición de frontera para el caso de estudio se encuentra en la frontera norte, donde en este caso resulta ser el caso de una frontera convectiva y radiativa. Su discretización se asemeja a la de Neuman como sigue:

$$k \cdot \frac{T_P - T_S}{\delta y_{PN}} = h_{out}(T_{amb} - T_P) + h \quad (4.19)$$

Dónde  $h = \sigma \epsilon (T_{sky}^4 - T_{\infty}^4)$  representa a los términos radiativos.

Al reescribir se tiene:

$$\left( \frac{\delta y_{PN}}{k} + 1 \right) T_P = \frac{\delta y_{PN}}{k} (h_{out} \cdot T_{amb} + h) + T_S \quad (4.20)$$

La 4.20 expresada en forma de coeficientes agrupados:

$$a_P = 1 + \left( h_{out} \cdot \frac{\delta y_{PN}}{k} \right)$$

$$a_E = 0$$

$$a_W = 0$$

$$a_N = 0$$

$$a_S = 1$$

$$b = \delta y_{PN} \cdot \left( \frac{\sigma \cdot \epsilon \cdot (T_{sky}^4 - T_{\infty}^4) + h_{out} \cdot T_{out} + \alpha \cdot G}{k} \right)$$

### 4.3.5. Verificación del Código

El código numérico desarrollado en Fortran fue validado comparando los resultados con la solución analítica para una placa compuesta del artículo reportado por Chang and Payne [25]. En la Figura 4.4 se muestra el modelo físico del sistema, se puede observar que sólo existen condiciones de frontera de primera y segunda clase. Este ejercicio se realizó para verificar los resultados del código numérico en un sistema compuesto, sus condiciones de frontera, los efectos combinados de la variación de propiedades y el efecto bidimensional. En la Figura 4.5 se muestran los resultados comparados con la solución analítica, se puede notar una diferencia significativa entre los resultados de la solución analítica y numérica para las isotermas de 300 y 250°C. La diferencia porcentual máxima es del 3.0 %.

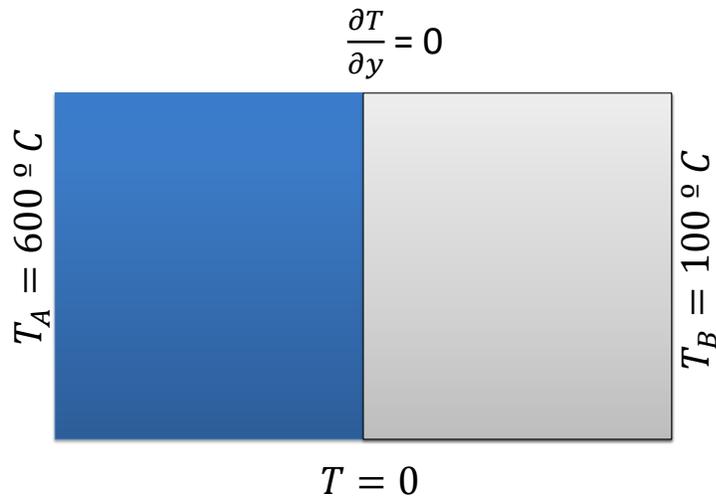


Figura 4.4: Modelo físico.

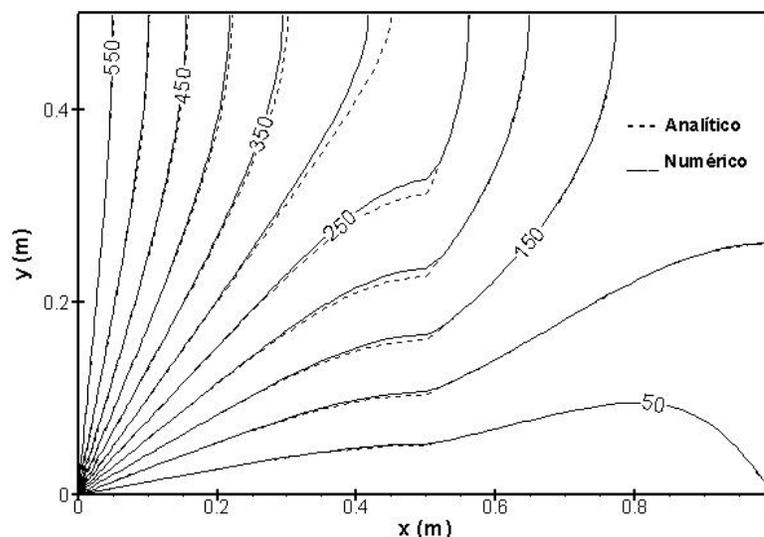


Figura 4.5: Comparación de las isotermas para un sistema compuesto.

La condición de frontera se validó con un artículo reportado por Hernández *et al.* en el 2014. Se tomó el clima de Mérida para dos días de Junio, se evaluó un sistema compuesto en estado estacionario. Los datos climáticos se obtuvieron de Meteonorm. El espesor de  $y_1 = 12.54$  cm, la configuración es de concreto y poliestireno, dónde el último tiene un espesor de 2.54 cm. Se consideró que el techo tenía 1 m de ancho. La simulación se hizo para dos recubrimientos: uno blanco y uno gris. El espesor del caso de estudio no se consideró [11]. La diferencia porcentual máxima es del 6%. En la Figura ?? se muestra la distribución de temperaturas.

#### 4.3.6. Independencia de Malla Espacial

En este apartado se presenta la independencia de malla espacial para los casos de estudio del modelo de conducción de calor bidimensional del techo de concreto. Se presentó el modelo simple con la finalidad de seleccionar la malla óptimas cuyos resultados sea independiente de la malla.

Para el estudio de independencia de malla se seleccionó el clima de Hermosillo, el cual alcanza las temperaturas ambiente más altas en comparación con los otros cinco climas de estudio. El día con las condiciones ambientales

más extremas fue el 3 de junio del 2014 a las 5:50 pm, se consideró para este estudio la irradiación solar incidente ( $G_{\alpha} = 523\text{W/m}^2$ ), temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}} = 49.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y la velocidad del viento ( $\nu = 3.5 \text{ m/s}$ ). Las mallas numéricas seleccionadas fueron de 41 x 21,51 x 26, 61 x 31, 71 x 36, 81 x 41, 91 x 46, 101 x 51 nodos computacionales. Este estudio se realizó para una loza de concreto simple de 10 cm de espesor y 1 m de longitud sin RR.

En la Tabla 4.1 se muestran los resultados de la malla espacial, en los resultados se presenta la temperatura superficial al interior y exterior, el flujo de calor conductivo al interior para el nodo central en la dirección en  $x$ . Se obtuvo un error máximo de  $2.70 \times 10^{-10}$  en la temperatura superficial interior. Para este caso de estudio se concluyó que la malla numérica más adecuada fue la de 81 x 41.

Tabla 4.1: Resultados de la independencia de malla temporal.

Malla	$T_{\text{sext}}$	%*	$T_{\text{sint}}$	%*	$Q_{\text{cint}}$	%*
41x21	59.54		45.14		129.61	
51x26	59.54	$1.21 \times 10^{-11}$	45.14	$2.97 \times 10^{-10}$	129.62	$5.55 \times 10^{-10}$
61x31	59.54	$3.87 \times 10^{-12}$	45.14	$5.10 \times 10^{-11}$	129.62	$9.26 \times 10^{-12}$
71x36	59.54	$1.31 \times 10^{-11}$	45.14	$6.64 \times 10^{-11}$	129.62	$3.47 \times 10^{-10}$
81x41	59.54	$1.13 \times 10^{-11}$	45.14	$2.70 \times 10^{-10}$	129.62	$5.39 \times 10^{-10}$
91x46	59.54	$5.20 \times 10^{-12}$	45.14	$7.76 \times 10^{-11}$	129.62	$7.17 \times 10^{-10}$
101x51	59.54	$1.98 \times 10^{-11}$	45.14	$2.08 \times 10^{-11}$	129.62	$6.33 \times 10^{-10}$

Nota: Los valores que corresponden a %\* son los porcentajes de diferencia absoluta.



# Capítulo 5

## Resultados

Posteriormente se realizó el estudio paramétrico del análisis de conducción de calor para un techo bidimensional simple y para uno compuesto para los seis climas representativos de la República Mexicana, seleccionados con base en el INEGI. Para este estudio se consideró el día más cálido y frío de cada clima. Este estudio se dividió en dos casos, el primero consiste en una loza de concreto sin RR reflectivo y con los diferentes RR (Caso 1), el segundo caso fue un sistema compuesto por un RR, una capa de concreto de 10 cm y una de poliestireno de 2.54 cm (Caso 2). Este estudio fue realizado con el Compilador de Fortran. Finalmente se presenta el análisis de resultados de las mediciones y del estudio paramétrico.

### 5.1. Estudio Paramétrico de los Recubrimientos Reflectivos

Para conocer los flujos de calor a través del techo para cada clima, se introdujeron los parámetros medidos de cada RR. Los parámetros de estudio elegidos para la simulación de la transferencia de calor por conducción del techo bidimensional fueron: la emisividad y reflectancia. Las simulaciones se realizaron para los catorce recubrimientos en los seis climas representativos de la República Mexicana seleccionados anteriormente, los datos climáticos fueron proporcionados por el SMN.

Como se había mencionado anteriormente el estudio se realizó para dos techos característicos, uno simple y uno compuesto. El material empleado

para el sistema simple fue el concreto y para el compuesto el concreto con poliestireno con un espesor de 10 y 2.54 cm, respectivamente. Las propiedades termofísicas de los componentes del techo se presentan en la Tabla 5.1. Las configuraciones para el techo simple y compuesto, así como sus dimensiones y características detalladas se presentan en el Capítulo 4.

Tabla 5.1: Propiedades de utilizadas en el sistema simple y compuesto del techo.

Propiedades	Concreto	Poliestireno	Unidades
$\rho$	2400	30	kg/m <sup>3</sup>
$C_p$	1080	1200	J/kg K
$k$	1.80	0.027	W/m K
$\rho_s$	0.33		
$\epsilon$	0.84		

Para cada clima se seleccionó el día más cálido y frío del año 2014, los cuales fueron tratados y adaptados a los requerimientos necesarios para su implementación en el código numérico. Los resultados del código numérico se presenta en dos casos, en el primero se presentan los al techo con un sistema simple (Caso 1) y el segundo al techo compuesto, su estructura queda como se muestra a continuación estructurados como se muestra a continuación (Caso 2):

1. Caso 1. Conducción de calor bidimensional de un sistema simple constituido por una loza de concreto con y sin RR.
  - a) Hermosillo
  - b) Monterrey
  - c) Xalapa
  - d) México
  - e) Villahermosa
  - f) Mérida
2. Caso 2. Conducción de calor bidimensional de un sistema compuesto integrado por una loza de concreto y poliestireno con y sin RR.
  - a) Hermosillo

- b)* Monterrey
- c)* Xalapa
- d)* México
- e)* Villahermosa
- f)* Mérida

### **Caso 1. Sistema Simple del Techo**

En esta sección se muestra la solución del modelo matemático de conducción de calor para el techo de concreto con y sin recubrimiento cuya emisividad y reflectancia se midió previamente como se muestra en el Capítulo 4. Los resultados obtenidos para cada caso fueron la temperatura superficial y flujos de calor al exterior e interior del techo para cada clima, se analizaron los recubrimientos blancos, rojos, azules y el techo sin RR.

El clima de Hermosillo es el primero que se presenta en cada caso de estudio, por que se seleccionó como representativo para la implementación de todos los recubrimientos, en los otros climas solamente se seleccionó un RR representativo de cada color así como el caso del techo sin RR. Este clima se seleccionó porque sus condiciones ambientales y radiación tienen menores fluctuaciones a lo largo del día más cálido y frío en comparación con los otros climas.

#### **Hermosillo**

Para el clima de Hermosillo se seleccionó el día con la temperatura ambiente máxima ( $T_{\text{amb,max}} = 49.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y mínima ( $T_{\text{amb,min}} = 2.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ) que fueron el día 3 de junio y 27 de diciembre del 2014, respectivamente. A continuación se presentan los resultados del código numérico para el techo de concreto sin RR, con recubrimientos blancos y con RR de color (rojo y azul).

#### **Concreto**

En la Figura 5.1 se muestran los resultados para el techo de concreto sin RR. Del del lado izquierdo se presentan los resultados para el día 3 junio del 2014 y del lado derecho para el 27 de diciembre del 2014 (Figura 5.1a y 5.1b, respectivamente). En la parte superior de cada Figura se muestran las temperaturas y en la parte inferior el flujo de calor exterior e interior. Además en la

parte superior izquierda de cada figura se presenta la radiación para cada día.

Existen dos simbologías presentadas a lo largo de todas las figuras en el presente apartado, los que tienen un relleno sólido y hueco; los primeros hacen referencia a la superficie exterior y los segundos a la interior para las temperaturas y los flujos de calor.

En la Figura 5.1a se observa que la temperatura superficial exterior e interior máxima para el verano son del orden de los 76 y 55 °C, respectivamente, mientras que para la Figura 5.1b alcanza una  $T_{\text{sext,max}} = 38.09$  °C y  $T_{\text{sint,max}} = 32.38$  °C para el invierno. En ambos casos, las temperaturas superficiales al exterior e interior son mayores a la temperatura ambiente ( $T_{\text{amb,max}} = 49.39$  y  $20.99$  °C).

Las temperaturas superficiales las temperaturas son muy elevadas para ambos meses, lo cual traería como consecuencia un discomfort térmico cálido, la casa se alcanza temperaturas elevadas para ambas épocas del año.

Por otro lado, respecto a los flujos de calor se alcanzan valores en la superficie exterior del techo del orden de los 500 y 400 W/m<sup>2</sup> ( $Q_{\text{Total,ext}}$ ) para el mes de junio y diciembre, respectivamente; en cuanto al flujo de calor interior máximo es del orden de los 180 y 60 W/m<sup>2</sup> ( $Q_{\text{conv,int}}$ ) para el verano e invierno, respectivamente. El flujo de calor promedio exterior e interior es de  $Q_{\text{prom,ext}} = 142.48$  y  $Q_{\text{prom,int}} = 74.05$  W/m<sup>2</sup> para el día 3 de junio; mientras que para el día 27 de diciembre se tiene un  $Q_{\text{prom,ext}} = 146.87$  W/m<sup>2</sup> y  $Q_{\text{prom,int}} = -39.68$  W/m<sup>2</sup>. El flujo de calor promedio interior es negativo debido a que existen muchas pérdidas de calor sobre todo en los periodos donde no existe radiación (de las 12:00 pm a las 9:00 am y de las 18:00 a las 12:00 pm). Este efecto se puede ver para ambos días del año, es principalmente debido al enfriamiento nocturno.

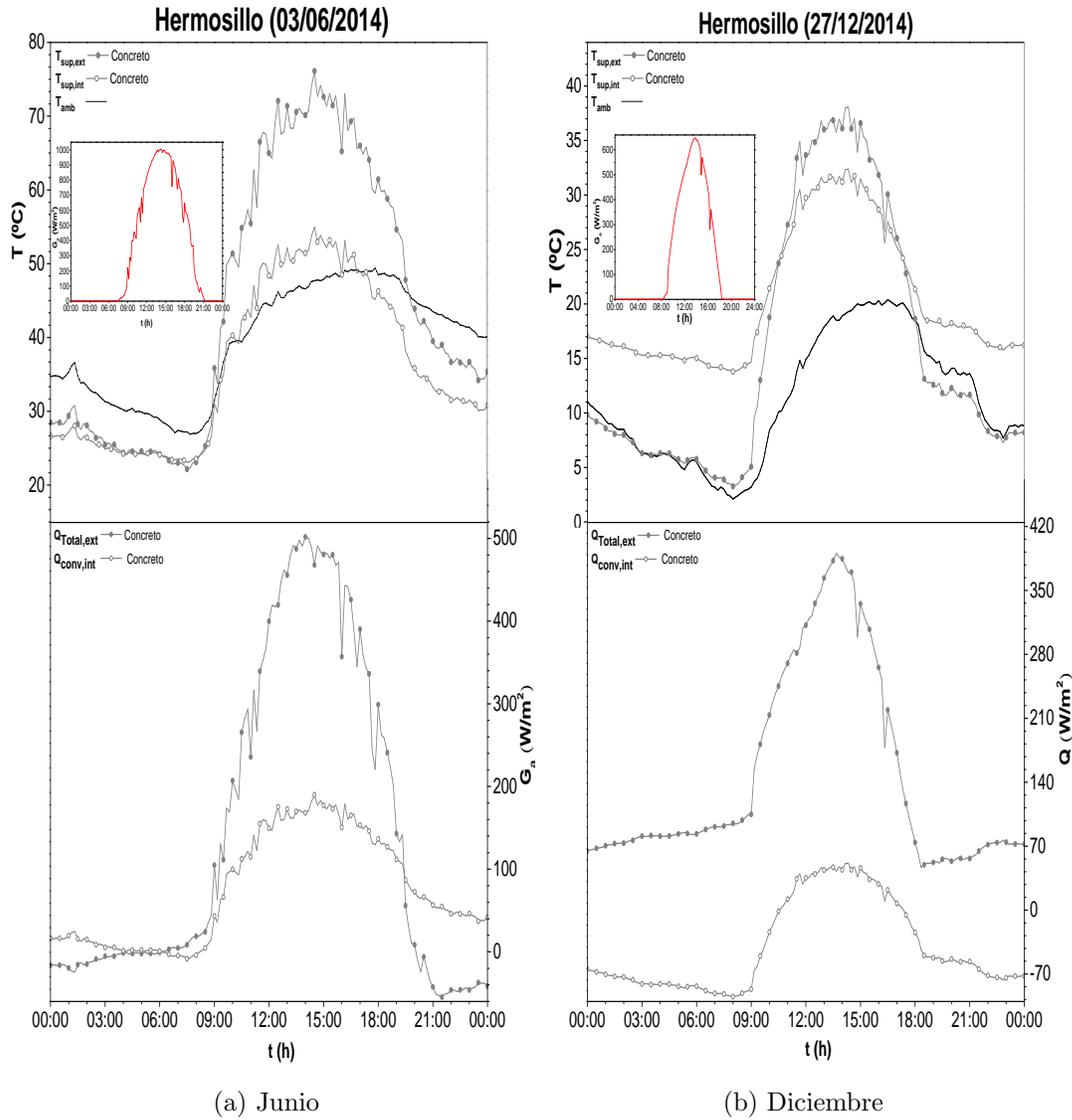


Figura 5.1: Temperatura y flujo de calor del sistema simple del techo de concreto sin RR. a) 3 de junio del 2014 y b) 27 de diciembre del 2014.

### Blancos

En este apartado se muestran los resultados de la simulación del código numérico para el sistema del techo simple con la aplicación de los nueve RR

blancos seleccionados anteriormente. La descripción detallada de los recubrimientos, la emisividad y reflectancia de cada RR se presentan en el Capítulo 4. En la Figura 5.2 se presentan estos resultados, del lado derecho se presentan los gráficos de temperatura y flujo de calor para el día más cálido de verano y del lado izquierdo para el día más frío de invierno.

Se observa que los RR comerciales tienen un comportamiento similar, es decir que la variación entre sus temperaturas máximas exteriores e interiores es poco significativa. Los RR blancos tienen una temperatura exterior e interior máxima de  $T_{\text{sext,max}} = 53.92^{\circ}\text{C}$  y  $T_{\text{sint,max}} = 41.80^{\circ}\text{C}$  para el RR Impac 3000 (I3000);  $T_{\text{sext,max}} = 50.08^{\circ}\text{C}$   $T_{\text{sint,max}} = 39.51^{\circ}\text{C}$  para el RR Impac Sokul (ISokul), siendo el RR I3000 el que tiene un peor comportamiento térmico. Con una diferencia del orden de los  $3.84^{\circ}\text{C}$  y  $5.40^{\circ}\text{C}$  para la temperatura exterior e interior, respectivamente. La reflectancia está entre 0.77 a 0.86 para estos RR blancos.

Por lo que respecta a los recubrimientos elaborados con baba de nopal la variación entre su reflectancia es mayor porque están en un intervalo de 0.62 a 0.77, siendo la pintura de nopal la que tiene una mayor reflectancia. En general, los impermeabilizantes de nopal son los que tienen el peor comportamiento térmico, sus temperaturas máximas son mucho mayores en comparación con los RR comerciales. La pintura de nopal es la que tiene temperaturas superficiales menores ( $T_{\text{sext,max}} = 54.01^{\circ}\text{C}$  y  $T_{\text{sint,max}} = 37.71^{\circ}\text{C}$ ), pero para los impermeabilizantes de nopal (IMPERPAL Am e IMPERPAL B1) se tiene temperaturas superficiales hasta del orden de los  $60^{\circ}\text{C}$  para el mes de junio, estas diferencias se deben principalmente a los materiales empleados para la elaboración como es el caso del  $TiO_2$  que sirve para darle blancura al RR, este elemento afecta considerablemente la reflectancia solar en espectro visible.

En cuanto a las temperaturas superficiales exteriores se alcanzan diferencias máximas de  $3.85^{\circ}\text{C}$  con una desviación estándar de  $\pm 1.41$  y para las  $T_{\text{sint,max}}$  se tiene una diferencia máxima de  $2.75^{\circ}\text{C}$  y una desviación estándar de  $\pm 1.53$ . entre el RR con menor y mayor reflectancia.

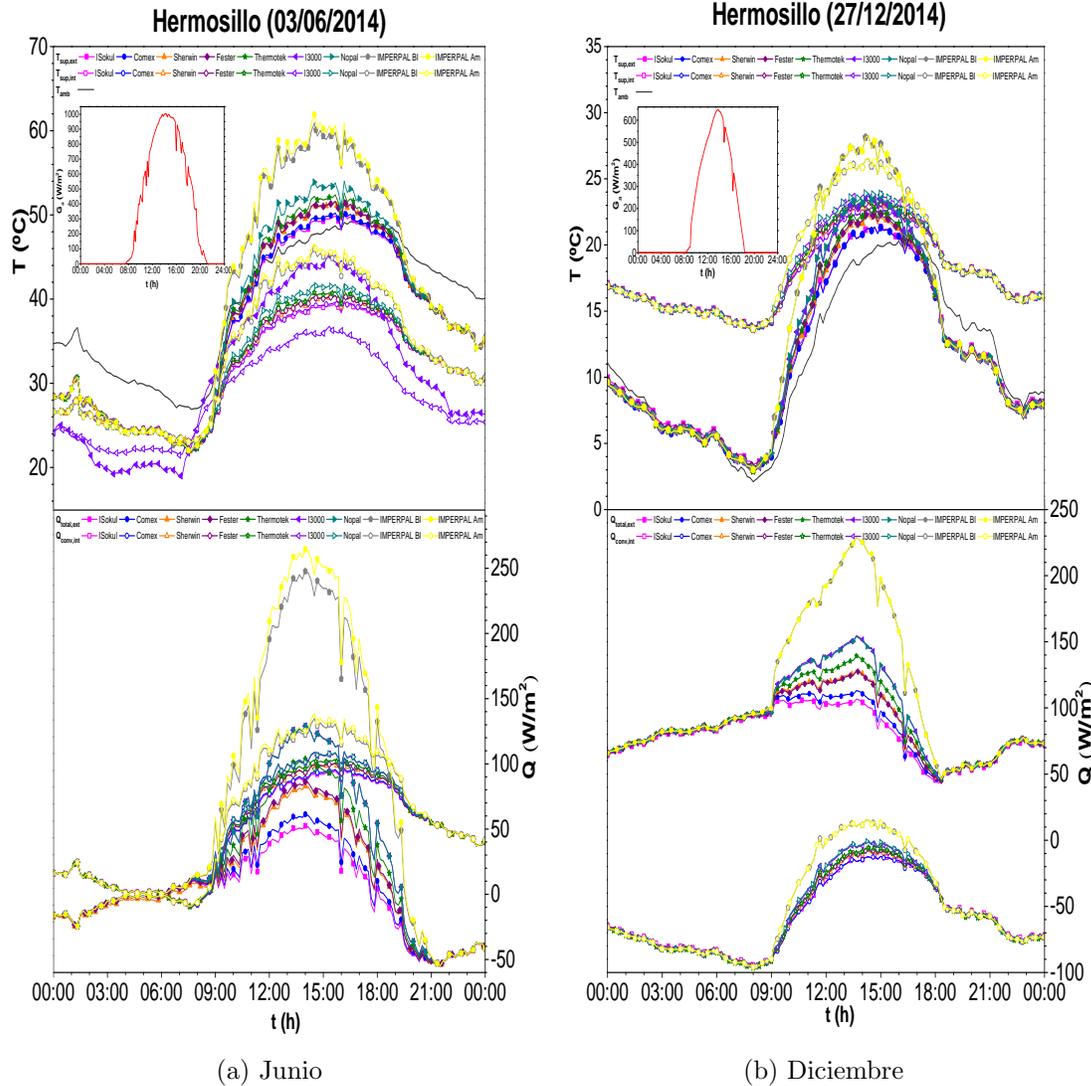


Figura 5.2: Temperatura y flujo de calor de los RR Blancos para el clima de Hermosillo. a) para el el 3 de junio del 2014 y b) el 27 de diciembre del 2014.

En la Tabla 5.2 se presentan las temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores así como el flujo de calor promedio de los recubrimientos blancos. Donde se observa que el flujo de calor total exterior (conducción y convección) y el flujo convectivo interior ( $Q_{Total,ext}$  y  $Q_{conv,int}$ , respectivamente disminuye al incrementar la reflectancia, esto quiere decir que permite

que entre menor cantidad de radiación solar al interior del techo, lo cual trae como consecuencia disminuciones en la temperatura superficial exterior e interior de hasta 26.04 y 18.60°C con respecto al techo de concreto sin recubrimiento principalmente para el mes de junio, esto ayudaría a reducir las cargas de enfriamiento sobre todo en climas cálidos como el de Hermosillo.

Tabla 5.2: Temperaturas superficiales máximas y mínimas de los recubrimientos blancos y su flujo de calor para el día 3 de junio del 2014.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{sint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
IMPERPAL BI	61.05	40.20	67.60	58.44
IMPERPAL Am	60.92	39.78	62.13	57.54
PNopal	54.01	37.72	24.48	49.85
Impac 3000	<b>53.92</b>	41.80	24.72	49.62
Thermotek	52.59	37.18	16.74	47.89
Fester	51.82	36.97	11.03	47.14
Sherwin	51.74	36.90	9.01	46.86
Comex	50.42	36.44	3.27	45.20
Impac Sokul	<b>50.08</b>	36.40	0.16	45.08

En la Figura 5.2b se presentan las temperaturas superficiales y flujo de calor para el día 27 de diciembre del 2014. La  $T_{\text{sext,max}}$  es de 23.72 °C y la  $T_{\text{sint,max}}$  es de 23.86 °C para el RR Impac 3000 (I3000) y para el RR Comex que es el que tiene temperaturas superficiales menores se tiene una  $T_{\text{sext,max}}$  de 21.33 °C y una  $T_{\text{sint,max}}$  de 22.69 °C con una diferencia de temperaturas de 2.37°C y 1.17°C para la  $T_{\text{sext}}$  y  $T_{\text{sint}}$ , respectivamente. Por otro lado los recubrimientos elaborados con baba de nopal alcanzan temperaturas hasta de  $T_{\text{sext,max}} = 28.25^\circ\text{C}$  y  $T_{\text{sint,max}} = 26.52^\circ\text{C}$ .

Como se observó en el clima de verano, a mayor reflectancia de los RR las temperaturas superficiales al interior y exterior disminuyen, en este caso hubo una reducción del orden de 6.91 y 3.86°C, respectivamente (Tabla 5.3). Estas variaciones no afectan considerablemente a las condiciones de confort al interior del edificio.

Tabla 5.3: Temperaturas superficiales máximas y mínimas de los recubrimientos blancos y su flujo de calor para el día 27 de diciembre del 2014.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{sint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
IMPERPAL BI	28.25	26.52	110.07	-50.05
IMPERPAL Am	28.02	26.08	109.78	-50.59
PNopal	23.88	23.94	91.79	-55.00
Impac 3000	<b>23.71</b>	23.86	92.58	-55.79
Thermotek	22.74	23.38	89.17	-57.17
Fester	22.39	23.20	85.43	-56.64
Sherwin	22.20	23.11	86.46	-57.67
Impac Sokul	21.36	22.70	79.79	-57.39
Comex	<b>21.33</b>	22.69	82.80	-58.80

### Color (azul y rojo)

En la Figura 5.3 se muestran los resultados del código numérico para el techo con RR azules y rojos. Como se mencionó previamente, las líneas tienen un símbolo sólido y hueco se refiere a la temperaturas superficial y flujos de calor al exterior ( $T_{\text{sext}}$ ) e interior ( $T_{\text{sint}}$ ), respectivamente. Las gráficas tienen en la leyenda Az y Ro previo al nombre de los RR de color, indican el color del recubrimiento ya sea azul (Az) o rojo (Ro).

Se observa que la  $T_{\text{sext}}$ ,  $T_{\text{sint}}$ ,  $Q_{\text{Total,ext}}$  y el  $Q_{\text{conv,int}}$  son del mismo orden para el RR Comex (Ro Comex) e Impac Sokul (Ro ISokul) cuya línea es de color azul y morado, respectivamente. Esto se debe a que su reflectancia tiene una diferencia porcentual del 3.22%, en otras palabras es de solamente 0.01. La mayor diferencia en los resultados de los RR rojos es para el RR Ro ISokul.

En la Figura 5.3a se pueden observar que para los RR rojos la  $T_{\text{sext}}$  y la  $T_{\text{sint}}$  es mayor en comparación con la temperatura ambiente. Con una diferencia entre sus temperaturas máximas de 27.22 y 5.85 °C, respectivamente. Como observa para este clima se alcanzan temperaturas superficiales elevadas al implementar un RR rojo en verano, las cuales pueden ocasionar un discomfort térmico cálido. Mientras que para los RR azules la  $T_{\text{sext}}$  es mayor con respecto a la temperatura ambiente por 18.45 °C y logró una reducción

de la temperatura hasta 8.77 °C con respecto a los RR rojos, por lo que respecta a la  $T_{\text{sint,max}}$  es del mismo orden que la  $T_{\text{amb,max}}$  con una desviación estándar de 0.62 °C.

Por lo que se refiere a los flujos de calor para el mes de junio, tampoco se encuentran grandes diferencias entre los RR azules y los rojos. Se observan pérdidas de calor tanto interiores como exteriores en el periodo nocturno (8:00 pm a las 9:00 am).

En el caso del día más frío (27 de diciembre del 2014) para los RR azules se tienen diferencias de hasta 12.39 y 8.83°C para la  $T_{\text{sext,max}}$  y  $T_{\text{sint,max}}$  respectivamente, estas diferencias son en comparación con la temperatura ambiente (Figura 5.3b). En el caso de los RR rojos las diferencias para la temperatura superficial exterior e interior es de hasta 17.91°C y 12.11°C con respecto a la temperatura ambiente.

Aún en el mes de diciembre se observa que los RR de color el techo permanece a temperaturas más elevadas que las de los alrededores. Sin embargo para el clima de Hermosillo estas temperaturas son elevadas en comparación con la temperatura de confort promedio. Sin embargo en el clima de Hermosillo aún en invierno se alcanzan temperaturas superficiales muy elevadas con los RR de color. En cuanto al flujo de calor, se puede observar que del horario de las 12:00 a las 9:00 hrs y el periodo de las 16:00 a las 24:00 hrs el flujo de calor disminuye porque en este periodo no existe radiación solar y se tiene el efecto de la masa térmica del concreto, el cual consiste en absorber la energía proveniente del Sol en los lapsos donde existe mayor radiación y distribuirla gradualmente en los periodos sin radiación, la velocidad de esta dispersión depende en gran medida de la emisividad térmica. Por otro lado se observa que en el periodo de las 9:00 am a las 16:00 pm llega gran cantidad de radiación a la superficie del techo de hasta 647 W/m<sup>2</sup> para el invierno.

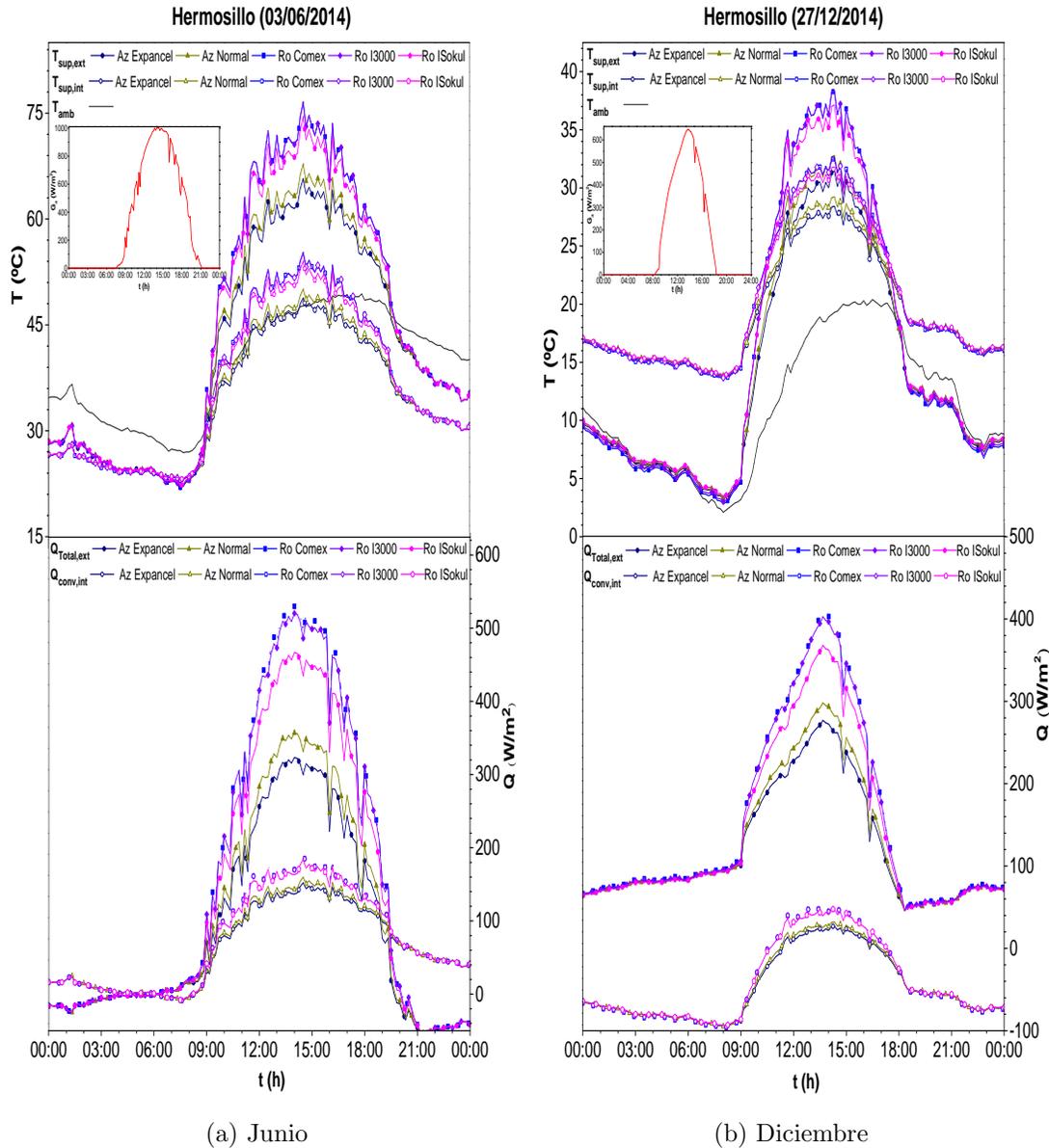


Figura 5.3: Temperatura y Flujo de calor de los RR de color (rojos y azules). a) para el día más cálido de junio y b) el día más frío de diciembre del 2014

Las temperaturas superficiales máximas de la superficie exterior e interior como el flujo de calor promedio se muestran en la Tabla 5.4 para el día 3 de

junio del 2014. Donde se pueden percibir una diferencia entre las  $T_{\text{sext,max}}$  y  $T_{\text{sint,max}}$  de 2.08 y 0.58°C para los RR rojos, respectivamente; para los RR azules se tienen diferencias de 2.1 y 0.63°C para la temperatura superficial exterior e interior máximas, respectivamente. Por otro lado, en cuanto al flujo de calor se tienen diferencias de  $Q_{\text{Total,prom}} = 18.94$  y  $Q_{\text{cint}} = 1.47$  para los RR rojos y para los azules de  $Q_{\text{Total,prom}} = 10.61$  y  $Q_{\text{cint}} = 2.31$ .

Tabla 5.4: Temperaturas superficiales exteriores e interiores máximas de los RR azules y rojos así como el flujo de calor para el día 3 de junio del 2014.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{sint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Ro Comex</b>	76.62	44.49	151.76	74.48
<b>Ro I3000</b>	76.54	44.48	148.55	74.45
<b>Ro ISokul</b>	74.54	43.91	131.21	72.40
<b>Az Normal</b>	67.85	41.88	96.56	65.03
<b>Az Expancel</b>	65.75	41.25	85.95	62.72

En la Tabla 5.5 se muestran las  $T_{\text{sext,max}}$  y  $T_{\text{sint,max}}$  de los RR azules y rojos, así como el flujo de calor para el día 27 de diciembre del 2014. Con tan solo cambiar un RR rojo por un azul se pueden disminuir la temperatura superficial exterior e interior hasta 6.9 y 3.24°C, respectivamente.

El RR Impac Sokul ( $T_{\text{sext,max}} = 37.12^\circ\text{C}$ ) y PROINSA Expancel ( $T_{\text{sext,max}} = 31.42^\circ\text{C}$ ) son los que tienen un mejor comportamiento térmico con respecto a los RR de color, por lo tanto son los que se utilizaran para los otros casos de estudio. En lo que respecta al flujo de calor promedio se tienen diferencias máximas de entre ( $Q_{\text{prom,ext}} = 10.91\text{W/m}^2$ ) y ( $Q_{\text{prom,int}} = 0.73\text{W/m}^2$ ) para los RR rojos. Mientras que para los RR azules se tienen diferencias de ( $Q_{\text{prom,ext}} = 4.8\text{W/m}^2$ ) y ( $Q_{\text{prom,int}} = 1.6\text{W/m}^2$ ).

Tabla 5.5: Temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores de los RR de los RR azules y rojos así como el flujo de calor para el día 27 de diciembre del 2014.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{sint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Ro Comex</b>	38.32	15.60	151.76	-40.80
<b>Ro I3000</b>	38.31	15.72	150.62	-40.24
<b>Ro ISokul</b>	37.12	15.70	140.85	-40.07
<b>Az Normal</b>	32.79	14.45	124.88	-44.89
<b>Az Expanel</b>	31.42	14.05	120.08	-46.49

En general para el techo con RR se concluyó que las variaciones de temperaturas y flujos de calor entre los RR blancos, entre los rojos y entre los azules son poco significativas para el día más cálido y frío; además no se perciben visualmente en algunos casos. Por lo tanto se seleccionó RR representativo blanco, rojo y azul. El RR seleccionado para los blancos fue el RR ISokul blanco, para los rojos el ISokul rojo y para los azules el PROINSA con expanel. El criterio de selección fue la reflectancia solar, estos RR tienen el valor mayor en cuanto a reflectancia con 0.86, 0.54 y 0.37 para el RR blanco, azul y rojo, respectivamente.

Por otro lado, se consideró que para el clima de Hermosillo es necesario implementar un RR blanco con la finalidad de reducir en la medida de lo posible a las temperaturas superficiales al exterior e interior del techo para las dos épocas del año.

### Monterrey

En la Figura 5.4 se aprecian las temperaturas superficiales y el flujo de calor para el día más cálido del año (27 de abril del 2014) para el techo con RR blanco, azul y rojo, así como para el techo sin RR, estos RR fueron seleccionados anteriormente. Los símbolos con relleno sólido se refieren a la  $T_{\text{sup,ext}}$  y  $Q_{\text{total,ext}}$  y los símbolos huecos hacen referencia a la  $T_{\text{sup,int}}$  y  $Q_{\text{conv,int}}$ . Las letras Bl, Az y Ro que se encuentran antes del nombre de cada RR indican el color, blanco, azul y rojo, respectivamente.

En la Tabla 5.6 se presentan las temperaturas máximas y flujos de calor promedio al interior y exterior del techo para el día más cálido. Como se aprecia las  $T_{\text{sext}}$  y  $T_{\text{sint}}$  del techo sin y con RR rojo son del mismo orden, alcanzan un valor máximo de  $T_{\text{sext,max}} = 59.85\text{ °C}$  y  $T_{\text{sint,max}} = 45.32\text{ °C}$  para el concreto; mientras que para el RR rojo son  $T_{\text{sext,max}} = 58.77\text{ °C}$  y  $T_{\text{sint,max}} = 44.68\text{ °C}$ . De manera que se tiene una diferencia de  $1.08\text{ °C}$  y de  $0.64\text{ °C}$  para  $T_{\text{sext,max}}$  y  $T_{\text{sint,max}}$ , respectivamente. En lo referente al comportamiento térmico de estos dos casos, es similar utilizar o no un RR rojo en términos de confort, sin embargo en lo que respecta a la infiltraciones al interior del techo, utilizar un RR rojo es una mejor opción.

Por lo que se refiere al RR azul y blanco, se aprecia una mayor disminución de las temperaturas superficiales y flujos de calor con respecto al rojo y de concreto. Las disminuciones de temperatura máximas se aprecian al aplicar un RR blanco con respecto a un techo sin RR, sus reducciones máximas son para las  $T_{\text{sext,max}}$  y  $T_{\text{sint,max}}$  de hasta  $17.22\text{ °C}$  y  $10.24\text{ °C}$ , respectivamente.

Las temperaturas y flujos de calor para el día más frío del año (29 de enero del 2014) para el clima de Monterrey, se aprecian en la Figura 5.5, como se observa en el lado superior izquierdo de la gráfica de temperaturas, en este día la radiación tiene muchas fluctuaciones, esto se debe principalmente a la existencia de nubosidades.

Tabla 5.6: Temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores de los RR para el día 27 de abril del 2014 para Monterrey.

<b>Recubrimiento</b>	<b><math>T_{\text{sext,max}}</math> [°C]</b>	<b><math>T_{\text{sint,max}}</math> [°C]</b>	<b><math>Q_{\text{Total,prom}}</math> [W/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>Q_{\text{cint,prom}}</math> [W/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Bl ISokul</b>	42.63	35.08	19.67	22.20
<b>Az Expancel</b>	53.10	41.31	103.16	34.43
<b>Ro ISokul</b>	58.77	44.68	155.78	45.37
<b>Concreto</b>	59.85	45.32	157.95	42.47

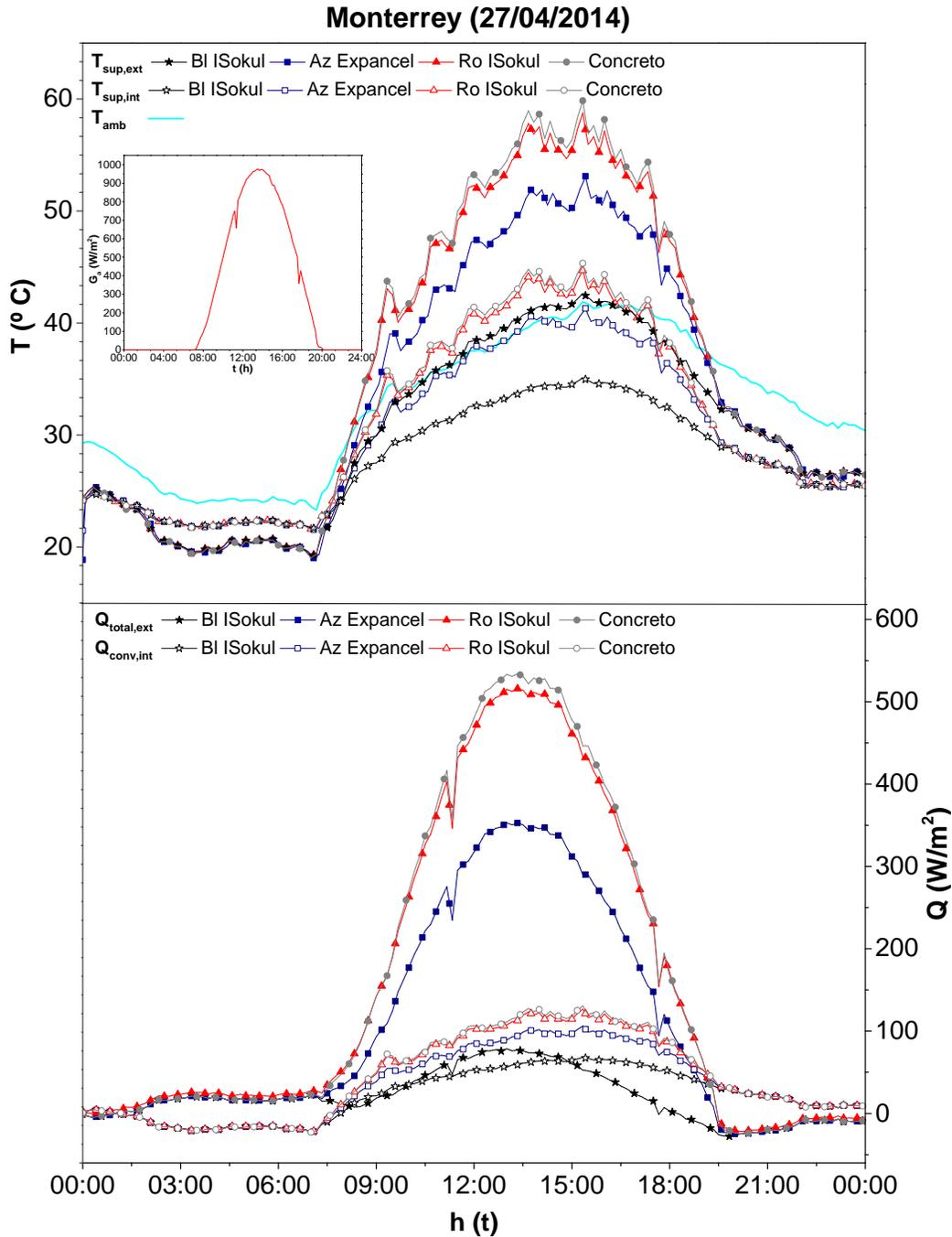


Figura 5.4: Temperatura y flujo de calor de los del techo de concreto con y sin RR para el 27 de abril del 2014.

En general, se observa que para todos los casos las temperaturas superficiales tanto al interior como al exterior, son mayores en comparación con la temperatura ambiente. Como se aprecia en el caso anterior al aplicar o no un RR rojo no produce mucha diferencia en lo que respecta a sus temperaturas y flujos de calor y por lo tanto el confort térmico es similar, porque la reflectancia del concreto y los RR rojos son del mismo orden 0.34 y 0.37, respectivamente. Por otro lado, se observa que las temperaturas superficiales exteriores tienen valores menores que las interiores, esto es causado por que este clima es el que reporta las menores temperaturas y además en el interior del techo se cuenta con un sistema de aire acondicionado, es decir tiene una temperatura constante de 24 °C.

En este clima en invierno, se presentan temperaturas muy bajas, por lo que se puede tener un un disconfort térmico frío. Tiene unas temperaturas promedio al exterior e interior de  $T_{\text{prom,ext}} = 5.68 \text{ °C}$  y  $T_{\text{prom,int}} = 14.98 \text{ °C}$  considerando una temperatura de confort promedio de 24 °C, sería conveniente implementar sistemas de climatización en esta época del año. En cuanto a la aplicación de un RR rojo se tienen temperaturas promedio de  $T_{\text{prom,ext}} = 9.43 \text{ °C}$  y  $T_{\text{prom,int}} = 16.89 \text{ °C}$ , sin embargo aún con este RR sería necesario utilizar sistemas de climatización.

En la Tabla 5.7 se puede apreciar que en el día más frío del año se pueden tener diferencias de 23.84 °C y 13.08 °C para la temperatura superficial exterior e interior de los RR blancos con respecto al techo sin RR. Por otro lado, se tiene una temperatura promedio interior de 14.81 °C lo cual es una temperatura muy baja para invierno utilizando un RR y se tendría que utilizar una gran cantidad de energía para mantener el espacio a una temperatura de confort.

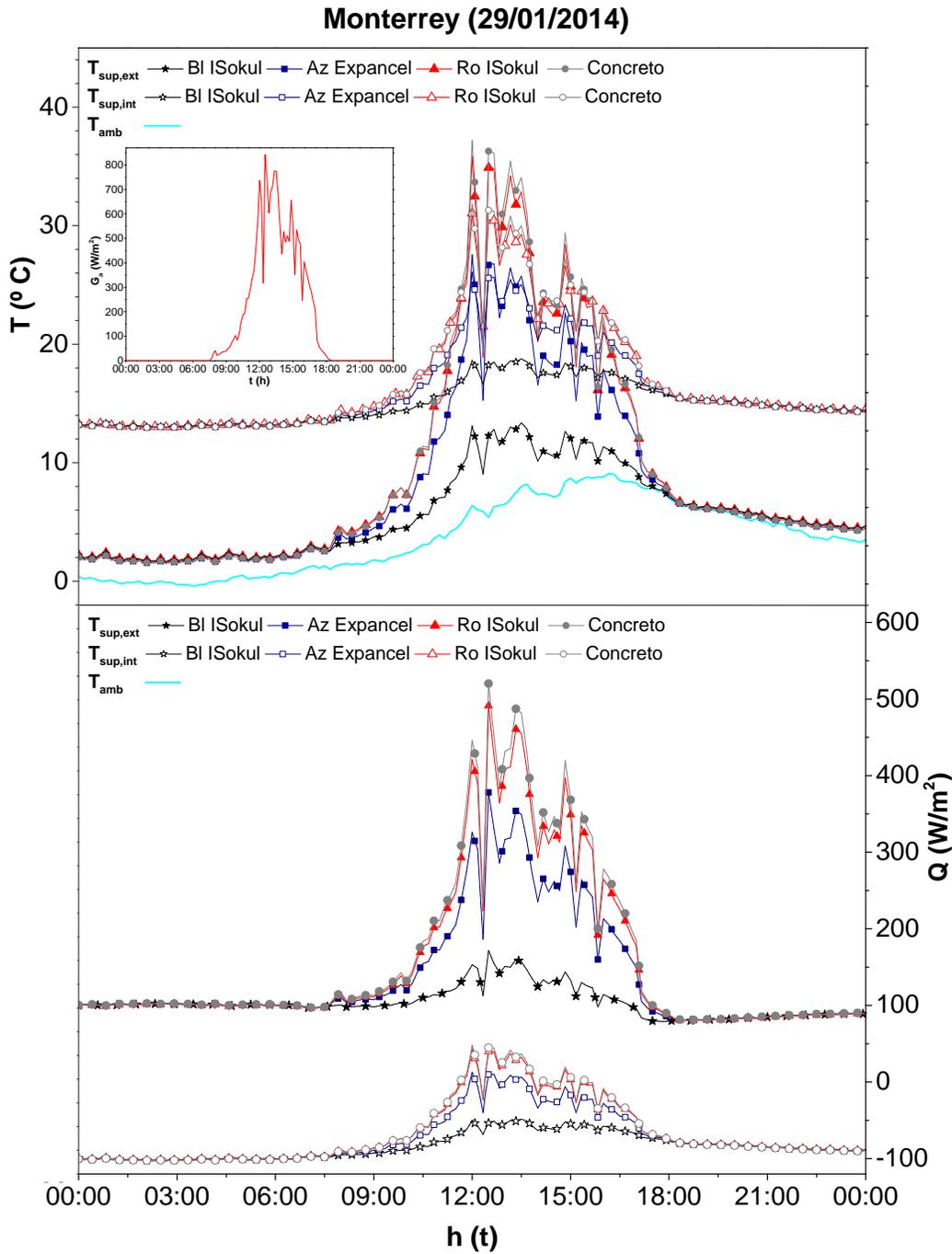


Figura 5.5: Temperatura y flujo de calor del techo de concreto con y sin RR para el día 29 de enero del 2014.

Tabla 5.7: Temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores de los RR para el día 29 de enero del 2014 para Monterrey.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{sint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
Bl ISokul	13.36	18.76	103.29	-83.73
Az Expanel	27.54	26.10	137.70	-73.44
Ro ISokul	35.85	31.05	155.14	-67.13
Concreto	37.17	31.83	160.47	-66.88

### Xalapa

Para el estudio paramétrico se seleccionaron dos climas templados representativos de la República Mexicana, Xalapa y México, con un clima templado húmedo y subhúmedo, respectivamente. En este apartado se presentan las temperaturas y flujos de calor para el techo con un RR blanco, azul y rojo, así como para el techo de concreto sin RR para el clima de Xalapa. Se seleccionó como el día más cálido y más frío el 28 de abril y el 16 de enero del 2014, respectivamente.

En la Figura 5.6 se muestran los resultados de la implementación de los RR en el techo para el día más cálido. Donde se puede apreciar que las temperaturas y el flujo de calor para el techo con y sin RR rojo son del mismo orden. Por lo que respecta a las temperaturas al interior del RR blanco durante el día alcanzan temperaturas de 30 °C.

En la Tabla 5.8 se muestran las temperaturas superficiales exteriores e interiores de los RR para el día 28 de abril del 2014.

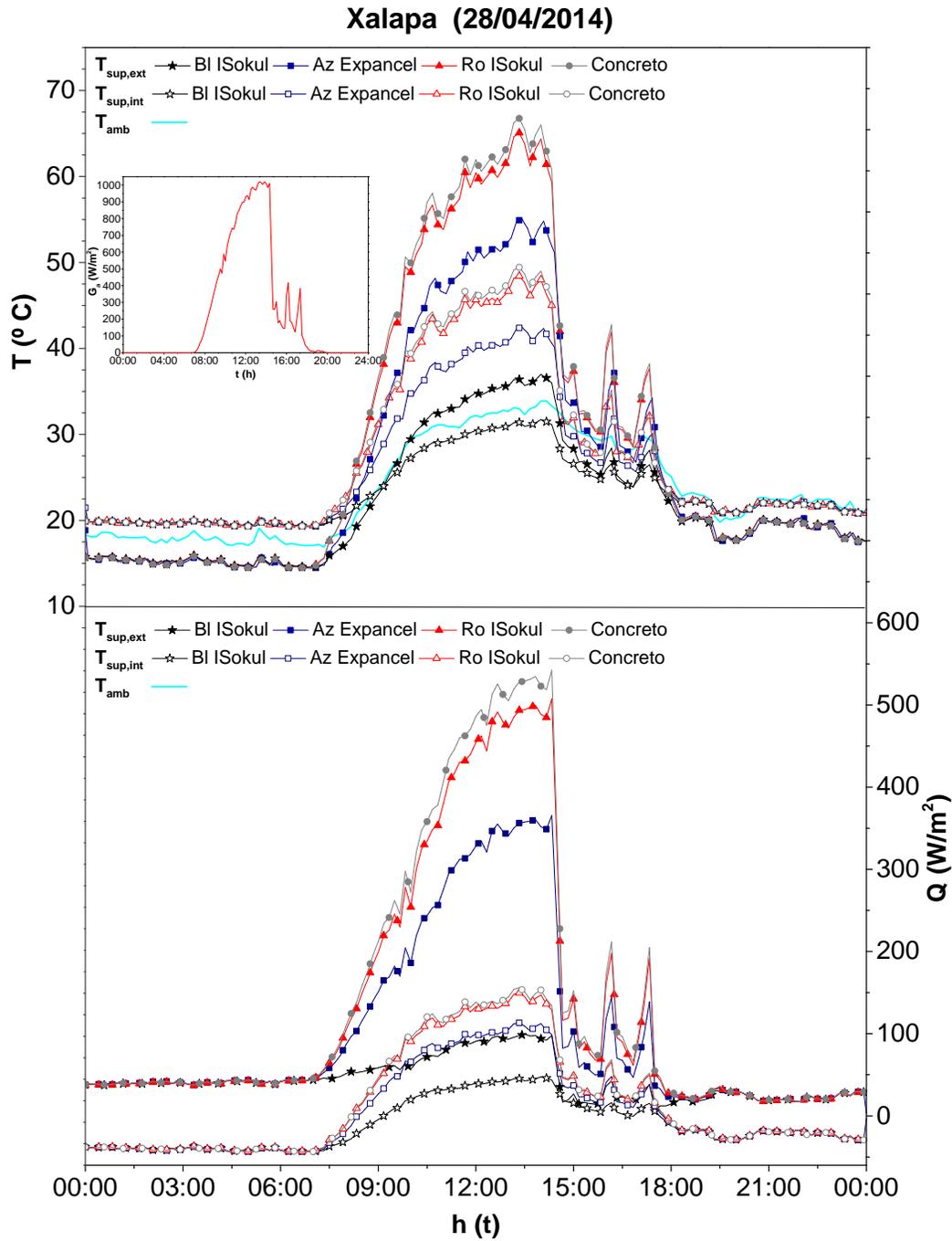


Figura 5.6: Temperatura y flujo de calor para el techo de concreto con y sin RR para el día 28 de abril del 2014.

Tabla 5.8: Temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores de los RR para el día 28 de abril del 2014 para Xalapa.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{sint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Bl ISokul</b>	36.98	31.72	43.49	-11.12
<b>Az Expanel</b>	55.07	42.48	102.17	4.55
<b>Ro ISokul</b>	65.07	48.43	132.30	13.37
<b>Concreto</b>	66.76	49.43	140.46	14.46

En la Figura 5.7 se presentan las temperaturas y flujos de calor para el día 14 de enero del 2014 en Xalapa.

## México

El clima del edo. de México es templado subhúmedo en la mayor parte del territorio. En este apartado se muestran los resultados de las simulaciones de la aplicación del RR para el techo con y sin RR para este clima. Se seleccionó el día más cálido y más frío estos fueron el 14 de abril y el 18 de enero correspondientemente.

En la Figura 5.8 se aprecia la temperaturas superficiales y flujos de calor para el día más cálido. Los resultados muestran que el comportamiento térmico para el techo de concreto (línea gris) con y sin RR rojo (línea roja) es del mismo orden, se tiene una diferencia entre sus temperaturas máximas exteriores e interiores del orden de  $2.3\text{ °C} \pm 0.36$ . Por otro lado al aplicar el RR blanco (línea negra) al techo se aprecian reducciones de temperatura máximas del orden de los 35 y 21 °C para la  $T_{\text{sext,max}}$  y  $T_{\text{sint,max}}$ .

Por lo que se refiere al flujo de calor máximo  $Q_{\text{max,ext}}$  y  $Q_{\text{max,int}}$ , se obtienen reducciones al aplicar un RR blanco con respecto a un techo sin RR de aproximadamente 414.98 y 130.01 W/m<sup>2</sup>, respectivamente. Se aprecian para todos los casos pérdidas de calor en la noche, cuándo no existe radiación (18:00 pm a 9:00 am).

Por otro lado, se observa que los resultados tanto de temperatura como el

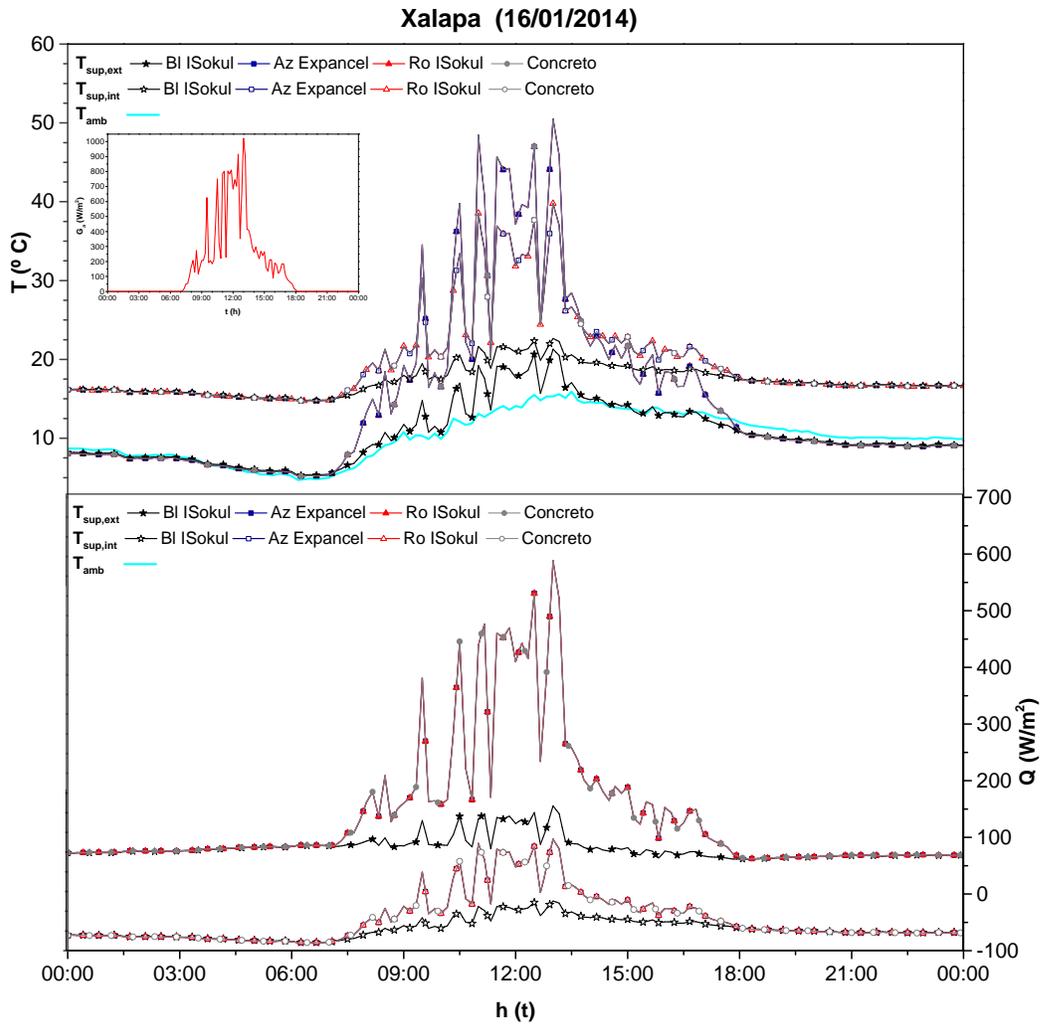


Figura 5.7: Temperatura y flujo de calor para el techo con y sin RR para el día 16 de enero del 2014.

flujo de calor que tienen un comportamiento que se asemeja al de la radiación solar, que es la Figura que se encuentra al lado izquierdo de la temperatura. En este clima aplicar un RR blanco alcanza temperaturas interiores del mismo orden que la temperatura ambiente.

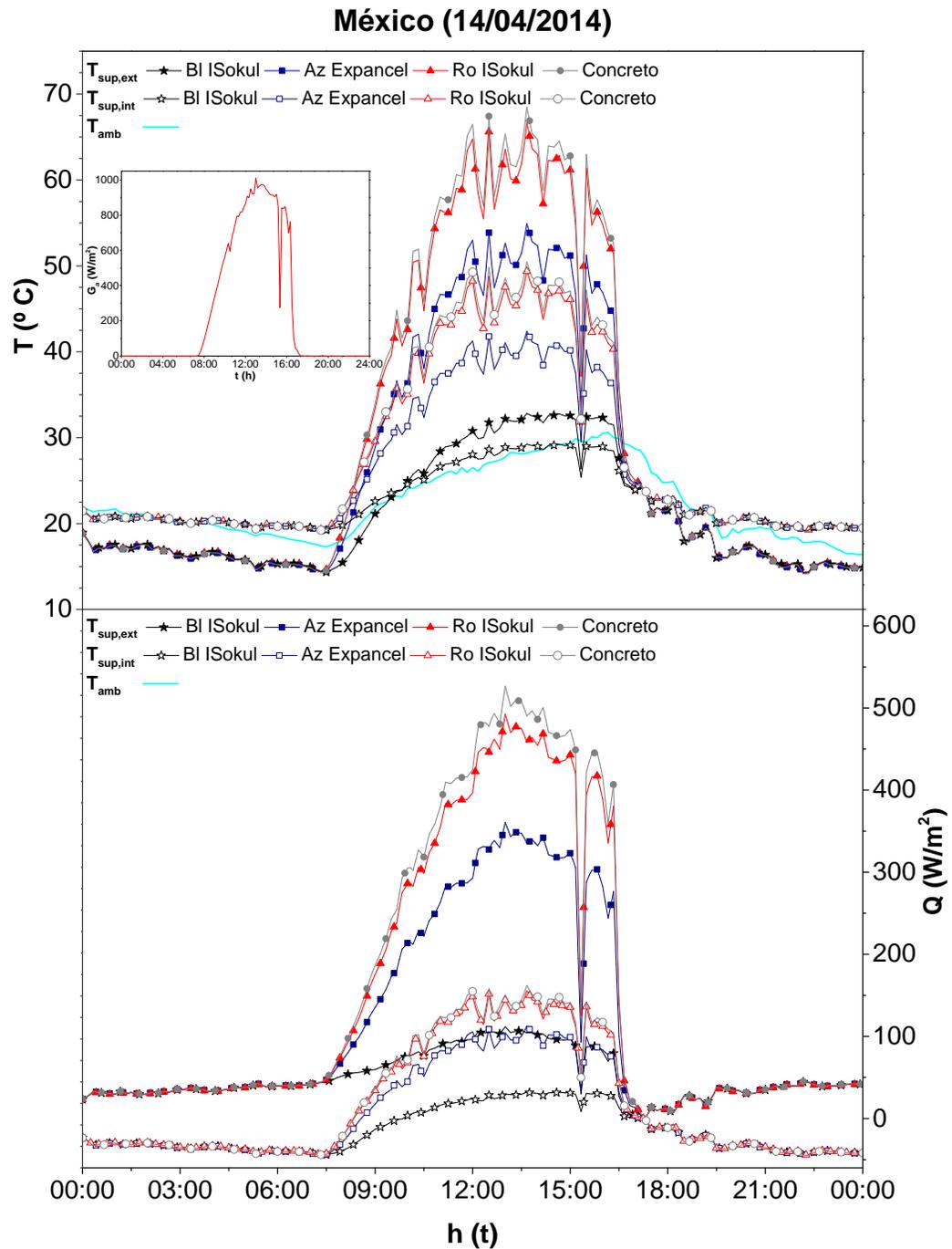


Figura 5.8: Temperatura y flujo de calor del techo con RR (blanco, azul y rojo) y del techo de concreto sin RR para el día 14 de abril del 2014.

Las temperaturas máximas superficiales y los flujos de calor promedio tanto exteriores como interiores para el día más cálido se muestran más detalladamente en la Tabla 5.9.

Como se puede observar, la reducción en las temperaturas, debido a que los recubrimientos son bastante considerables. También, se pueden apreciar reducciones en el flujo de calor promedio al exterior e interior máximos del orden de 53.09 y 17.73 W/m<sup>2</sup>, correspondientemente.

Tabla 5.9: Temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores de los RR para el día 14 de abril del 2014 para Xalapa.

Recubrimiento	T <sub>sext,max</sub> [°C]	T <sub>sint,max</sub> [°C]	Q <sub>Total,prom</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>ciint,prom</sub> [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Bl ISokul</b>	36.98	32.82	99.86	-1.21
<b>Az Expancel</b>	54.91	42.39	112.25	4.55
<b>Ro ISokul</b>	66.65	49.37	144.15	15.19
<b>Concreto</b>	68.47	50.45	152.95	16.52

En la Figura 5.9 se muestran los resultados del código numérico para el día 18 de enero del 2014. En la parte superior se muestran las temperaturas y el flujo de calor en la parte inferior. La gráfica en miniatura muestra la radiación para ese día.

Se puede observar que para el techo con RR blanco (línea negra) se tienen temperaturas interiores de aproximadamente los 22 °C, para el periodo de las 9:00 a las 18:00 hrs y su temperatura superficial exterior tiene temperaturas menores, esto se debe a que al interior del techo esta climatizado. Estas temperaturas están por debajo del rango de confort promedio, por lo tanto se tendría que climatizar el edificio.

Mientras que al aplicar un RR azul las temperaturas tanto al exterior (símbolo sólido) como al interior (símbolo hueco) se tienen temperaturas máximas del orden de los 40 y 30 °C, respectivamente.

En cuanto al flujo de calor se observan reducciones considerables sobre todo al aplicar un RR blanco con respecto a no utilizar ninguno o emplear un recubrimiento rojo. El flujo de calor se ve reflejado en gran medida en el

periodo de las 8:00 a las 18:00 hrs.

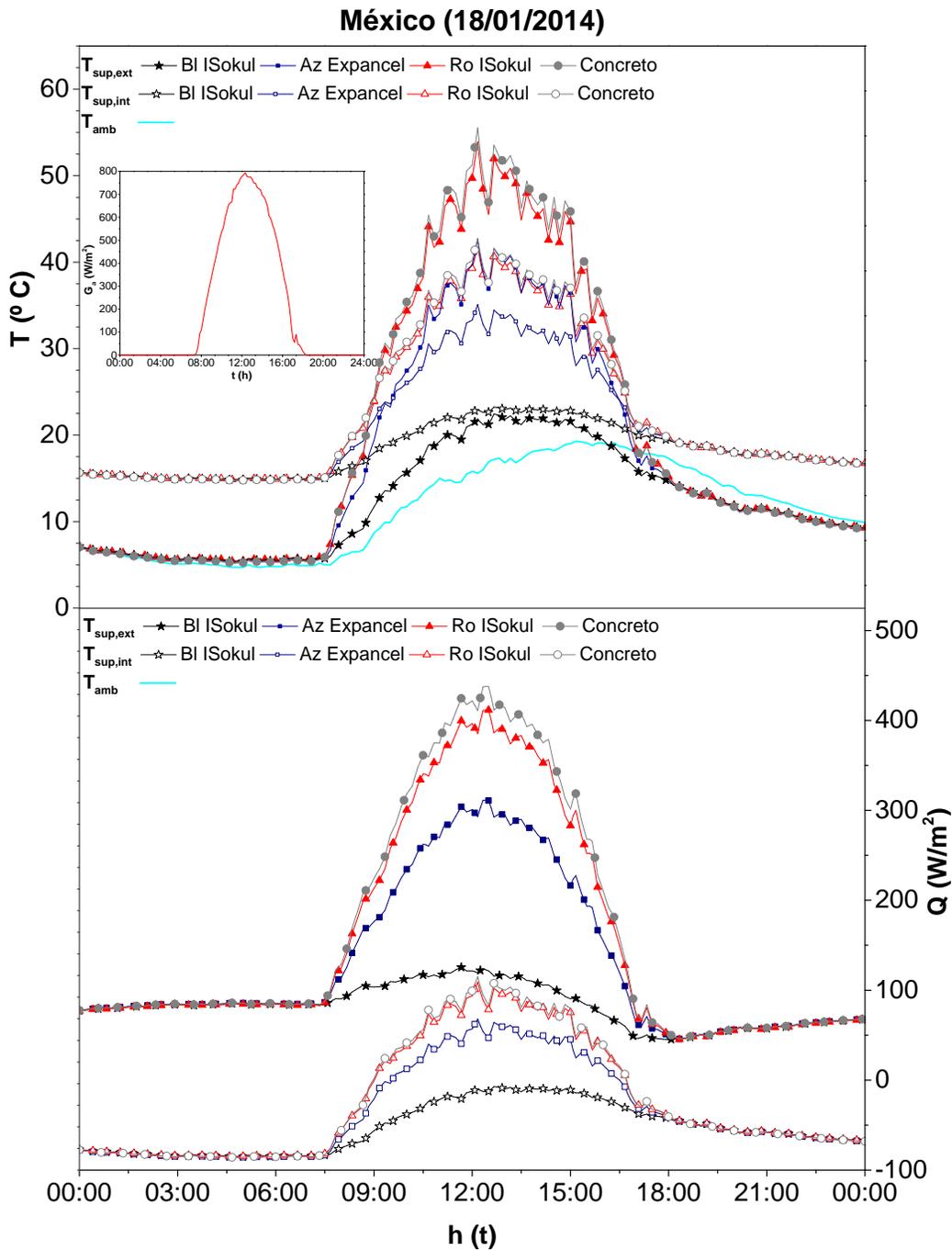


Figura 5.9: Temperatura y flujo de calor del techo con un RR blanco, azul y rojo y de concreto sin RR para el día 18 de enero del 2014.

En la Tabla 5.10 se muestran cuantitativamente los valores de las temperaturas máximas y el flujo de calor promedio para el exterior e interior del techo. Se aprecia que para el RR blanco tanto la  $T_{\text{sext,max}}$  como la  $T_{\text{sint,max}}$  son del mismo orden con una diferencia de  $0.79\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En este caso la temperatura interior es mayor que la exterior. Por otro lado se observa que para todos los casos el flujo de calor convectivo interior es negativo, lo que significa que la dirección del flujo va desde el interior al exterior, en el caso de los RR blancos entra mayor cantidad de calor del interior, por lo tanto la temperatura interior es mayor que la exterior.

En el caso del flujo de calor promedio exterior se tienen reducciones de orden del  $80\text{ W/m}^2$ .

Tabla 5.10: Temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores de los RR para el día 18 de enero del 2014 para México.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\text{sint,max}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [ $\text{W/m}^2$ ]
<b>Bl ISokul</b>	22.43	23.22	82.61	-53.62
<b>Az Expancel</b>	42.66	35.10	130.41	-35.15
<b>Ro ISokul</b>	53.92	41.80	155.16	-24.70
<b>Concreto</b>	55.52	42.75	162.51	-23.76

En la Tabla 5.11 se muestran las temperaturas promedio de la superficie exterior e interior. El RR blanco tiene un valor de  $11.74\text{ }^{\circ}\text{C}$  por debajo de la temperatura de confort. El RR que más se acerca es el Impac Sokul rojo (Ro ISokul).

Tabla 5.11: Temperatura promedio exteriores e interiores para los RR para el día 18 de enero del 2014 para México.

Recubrimiento	$T_{\text{prom,ext}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\text{prom,int}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
<b>Bl ISokul</b>	12.26	18.22
<b>Az Expancel</b>	16.91	20.82
<b>Ro ISokul</b>	19.69	22.44
<b>Concreto</b>	19.97	22.61

**Villahermosa**

En la Figura 5.10 se muestran las temperaturas y flujos de calor para el día 28 de abril del 2014. En la parte superior izquierda se muestra la incidencia solar, esta presenta una disminución de su valor de 947 a 563 W/m<sup>2</sup> aproximadamente en el horario de las 14:20 a las 14:50 hr. Estas variaciones drásticas se pueden deber a factores externos como la nubosidad.

En color Cyan se muestra la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), la cual se aprecia es del orden del techo con un RR blanco sobre todo para su temperatura exterior, sin embargo se observa que al interior (línea negra hueca), disminuye alrededor de 6 °C. Por otro lado, al utilizar un RR rojo las temperaturas se elevan hasta los 68.58 y 51.51 °C para la  $T_{sext}$  y  $T_{sint}$ , respectivamente.

En cuanto al flujo de calor se observa que en general se tiene el mismo comportamiento para el exterior e interior del edificio en los RR, excepto para el RR blanco, donde el flujo convectivo interior alrededor 14:40 hrs incrementa a diferencia de en los otros casos, en este horario es cuándo existen valores mayores de radiación y temperaturas.

Los resultados de las temperaturas superficiales máximas y flujos de calor para el día más cálido en Villahermosa se presentan en la Tabla 5.12. Al implementar un RR blanco se reduce las temperaturas superficiales máximas con respecto al techo sin RR hasta 29.4 y 17.49 °C para la  $T_{sext,max}$  y  $T_{sint,max}$ , respectivamente.

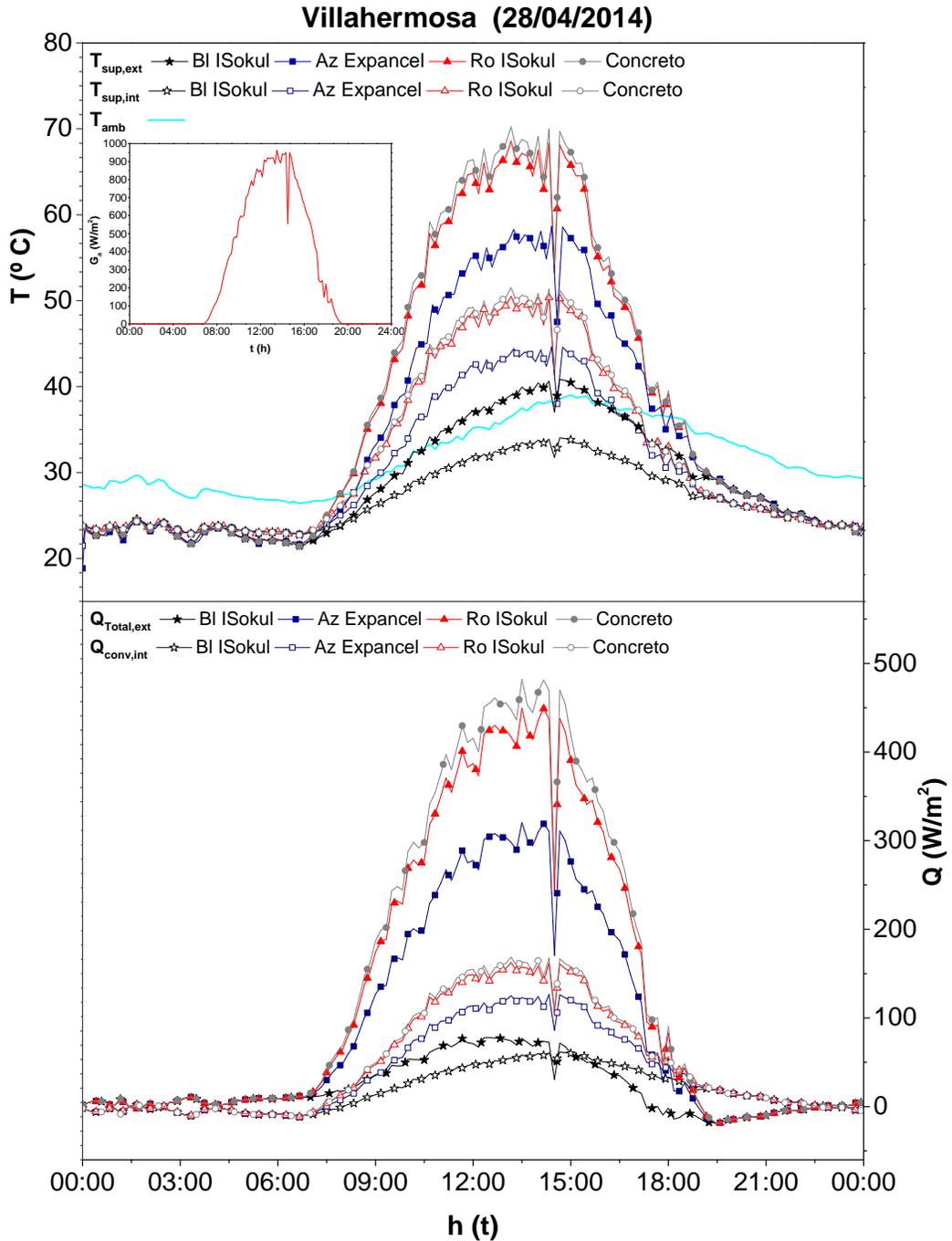


Figura 5.10: Temperatura y flujo de calor para el techo con un RR blanco, azul y rojo y sin RR para el día 28 de abril del 2014.

## 5.1. Estudio Paramétrico de los Recubrimientos Reflectivos 123

Los flujos de calor promedio presentan reducciones de aproximadamente 114.14 y 30.63 W/m<sup>2</sup> para el  $Q_{\text{prom,ext}}$  y  $Q_{\text{prom,int}}$ , respectivamente.

Tabla 5.12: Temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores de los RR para el día 28 de abril del 2014 para Villahermosa.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{shint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Bl ISokul</b>	40.84	34.01	20.81	17.42
<b>Az Expancel</b>	61.01	46.01	89.52	36.13
<b>Ro ISokul</b>	68.57	50.51	125.56	46.53
<b>Concreto</b>	70.24	51.50	134.96	48.04

Para el clima de Villahermosa en verano se tienen una  $T_{\text{prom,ext}}$  y  $T_{\text{prom,int}}$  de 28.89 y 26.95 °C, respectivamente para los RR blancos. Para este clima el RR blanco es el que presenta los mejores resultados desde el punto de vista térmico. Con este RR se reducirían significativamente las cargas de enfriamiento. Tal vez podrían llegar a tener las condiciones de confort.

En la Figura 5.11 se muestran los resultados para el día más frío de Villahermosa que es el día 30 de enero del 2014. Donde se puede observar que las temperatura superficial exterior está por debajo de la temperatura ambiente, estos valores tienen un valor máximo de  $\approx 20$  °C. En general, las temperaturas de la superficie exterior (símbolos sólidos) son mayores que las interiores.(símbolos huecos). Se observa como las temperaturas tienen una dependencia directa con la radiación solar del día.

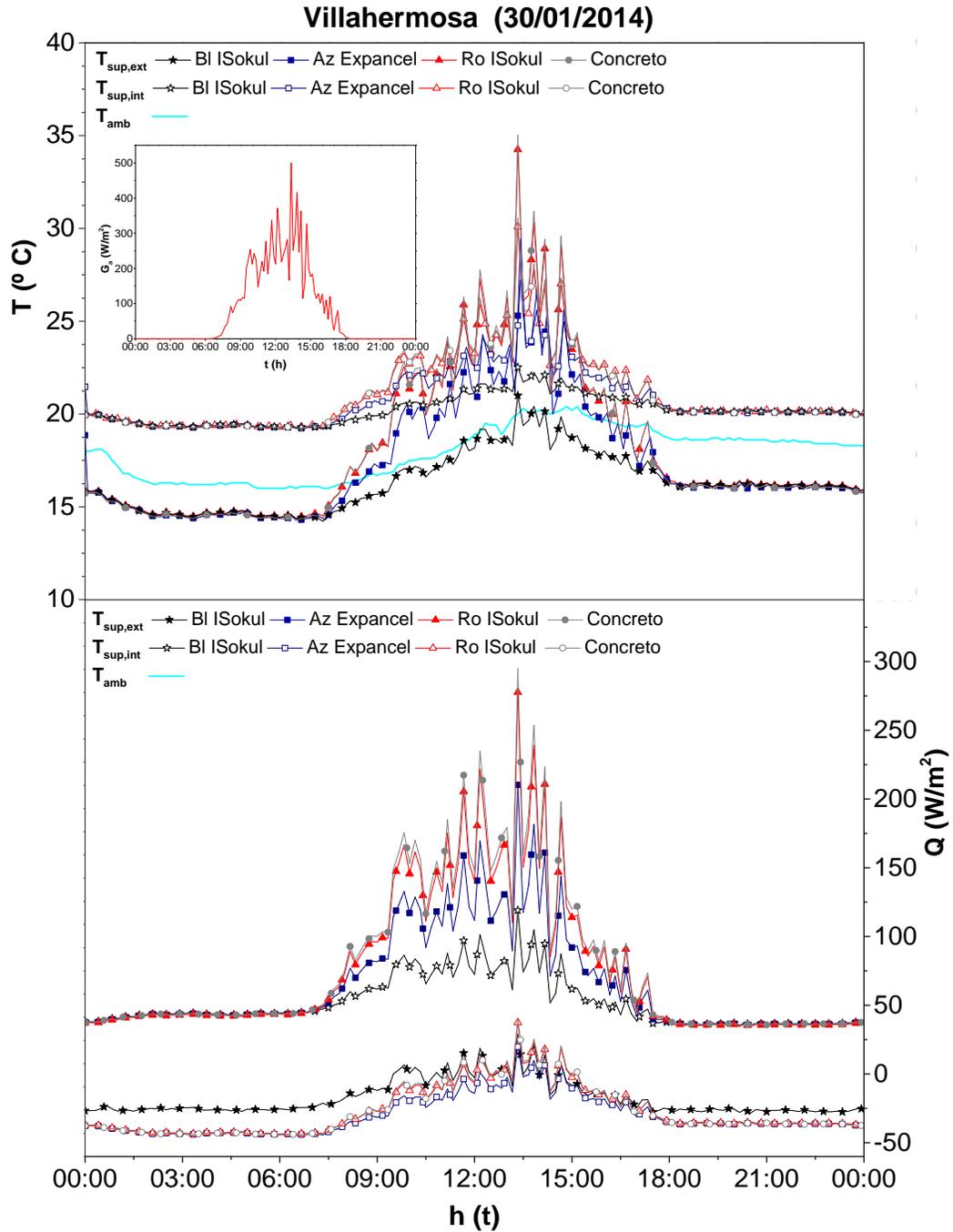


Figura 5.11: Temperatura y flujo de calor de los RR (Blanco, Azul y Rojo) y del techo de concreto sin RR para el día 30 de enero del 2014.

En la Tabla 5.13 se muestran las temperaturas máximas superficiales y el flujo de calor para el techo con los RR reflectivos seleccionados. Se muestra que al aplicar RR azules se tienen unas temperaturas máximas interiores y exteriores más cercanas a las temperaturas de confort, sin embargo sus temperaturas promedio son  $T_{\text{prom,ext}} = 17.83\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $T_{\text{prom,int}} = 20.75\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En esta época sería más adecuado un RR rojo, sin embargo se tiene que seleccionar el más adecuado considerando las condiciones climáticas de ambos días extremos.

Tabla 5.13: Temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores de los RR para el día 30 de enero del 2014 para Villahermosa.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\text{shint,max}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
<b>Bl ISokul</b>	20.99	22.51	45.70	-35.16
<b>Az Expancel</b>	29.43	27.23	89.52	36.13
<b>Ro ISokul</b>	34.24	30.09	74.56	-27.15
<b>Concreto</b>	35.03	30.56	77.54	-27.11

### Mérida

El clima de Mérida se caracteriza por ser cálido húmedo. En la Figura 5.12 se muestran los resultados para el día más cálido del clima de Mérida que fue el 7 de abril del 2014. Donde se puede observar que el techo con RR rojo y sin RR, tienen un comportamiento muy similar, tienen una desviación estándar del orden de los  $\pm 0.27$  y  $0.16$  para sus temperaturas superficiales promedio exterior e interior, respectivamente. Por otro lado, se observa que los RR blancos son los únicos cuya temperatura superficial interior es menor que la temperatura ambiente, lo cual implicaría una reducción significativa en las cargas de enfriamiento, mientras que al aplicar un RR rojo se tienen temperaturas máximas exteriores e interiores del orden de  $66$  y  $48\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Con estas temperaturas sería necesaria la implementación de sistemas de enfriamiento en esta época.

Respecto al flujo de calor, se observa que se tiene un comportamiento similar para el techo con y sin RR, la diferencia más predominante es en el techo con RR blanco, ya que para el  $Q_{\text{sext}}$  se tiene que a partir de las 14:40

hrs, el flujo de calor comienza a disminuir y en el mismo horario el  $T_{\text{sint}}$  comienza a incrementar. En ese horario es cuando se tienen los valores mayores en la temperatura ambiente.

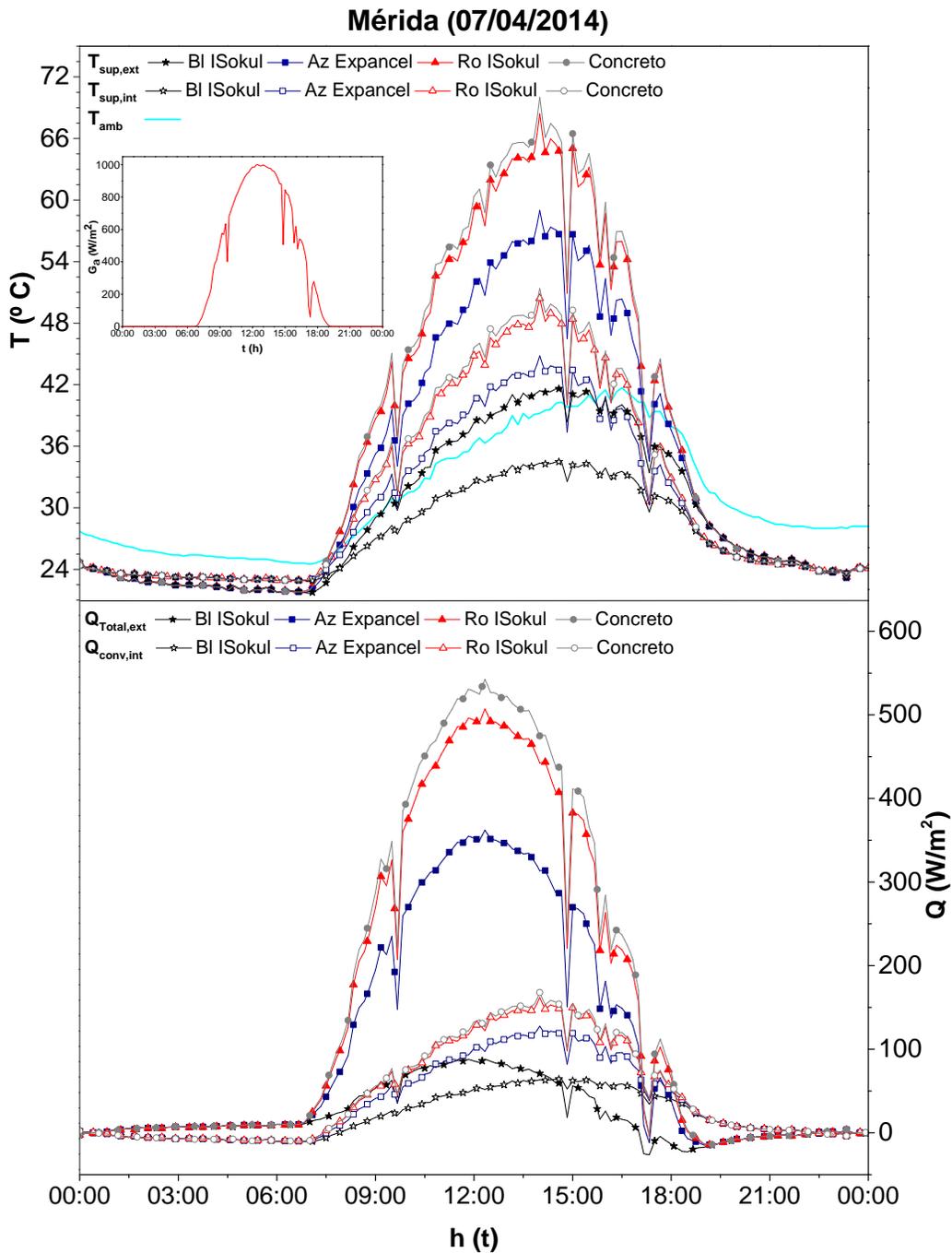


Figura 5.12: Temperatura y flujo de calor de los RR (Blanco, Azul y Rojo) del techo de concreto sin RR para el día 7 de abril del 2014.

En la Tabla 5.14 se reportan la  $T_{\text{sext,max}}$ ,  $T_{\text{sint,max}}$  así como el  $Q_{\text{Total,prom}}$  y  $Q_{\text{cint,prom}}$  para el día más cálido de Mérida. Donde se observan reducciones de 28.41 y 16.9 °C para la  $T_{\text{sext,max}}$  y  $T_{\text{sint,max}}$  correspondientemente al aplicar un RR blanco en comparación con un techo sin RR. Por otro lado, para el  $Q_{\text{Total,ext}}$  y  $Q_{\text{conv,int}}$  se tienen reducciones de hasta 454.49 y 103.59W/m<sup>2</sup>, respectivamente.

Tabla 5.14: Temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores de los RR para el día 7 de abril del 2014 para Mérida.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{sint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Bl ISokul</b>	41.60	34.47	22.55	18.78
<b>Az Expancel</b>	58.99	44.81	111.16	36.49
<b>Ro ISokul</b>	70.42	51.61	142.92	46.53
<b>Concreto</b>	70.01	51.37	153.36	44.48

En la Figura 5.13 se muestran las temperaturas y flujos de calor de la superficie exterior e interior para el techo con y sin RR reflectivo, para el día más frío del año, que es el 17 de enero del 2014. Como se puede observar en la esquina superior izquierda de la gráfica de las temperaturas, la radiación con gran cantidad de fluctuaciones lo cual se ve reflejado en las temperaturas y en los flujos de calor. Estas fluctuaciones dificultan el análisis de los resultados, sin embargo, se alcanza a percibir que las temperaturas superficiales exteriores e interiores para los RR blancos en el periodo de las 9:00 a las 18:00 hrs tienen un comportamiento similar al de la temperatura ambiente. En cuanto a los RR rojos se alcanzan temperaturas hasta del orden de los 53 °C.

Por lo que se refiere al flujo de calor, los periodos con mayor transferencia de calor son de 9:00 a 18:00 hrs que son los periodos con mayor radiación. Para los RR blancos en el flujo de calor convectivo interior es negativo en su mayoría, lo cual significa que la transferencia de calor es desde el interior del techo hacia la superficie exterior, esto se debe principalmente a la influencia del sistema de climatización que está en la parte interior del techo.

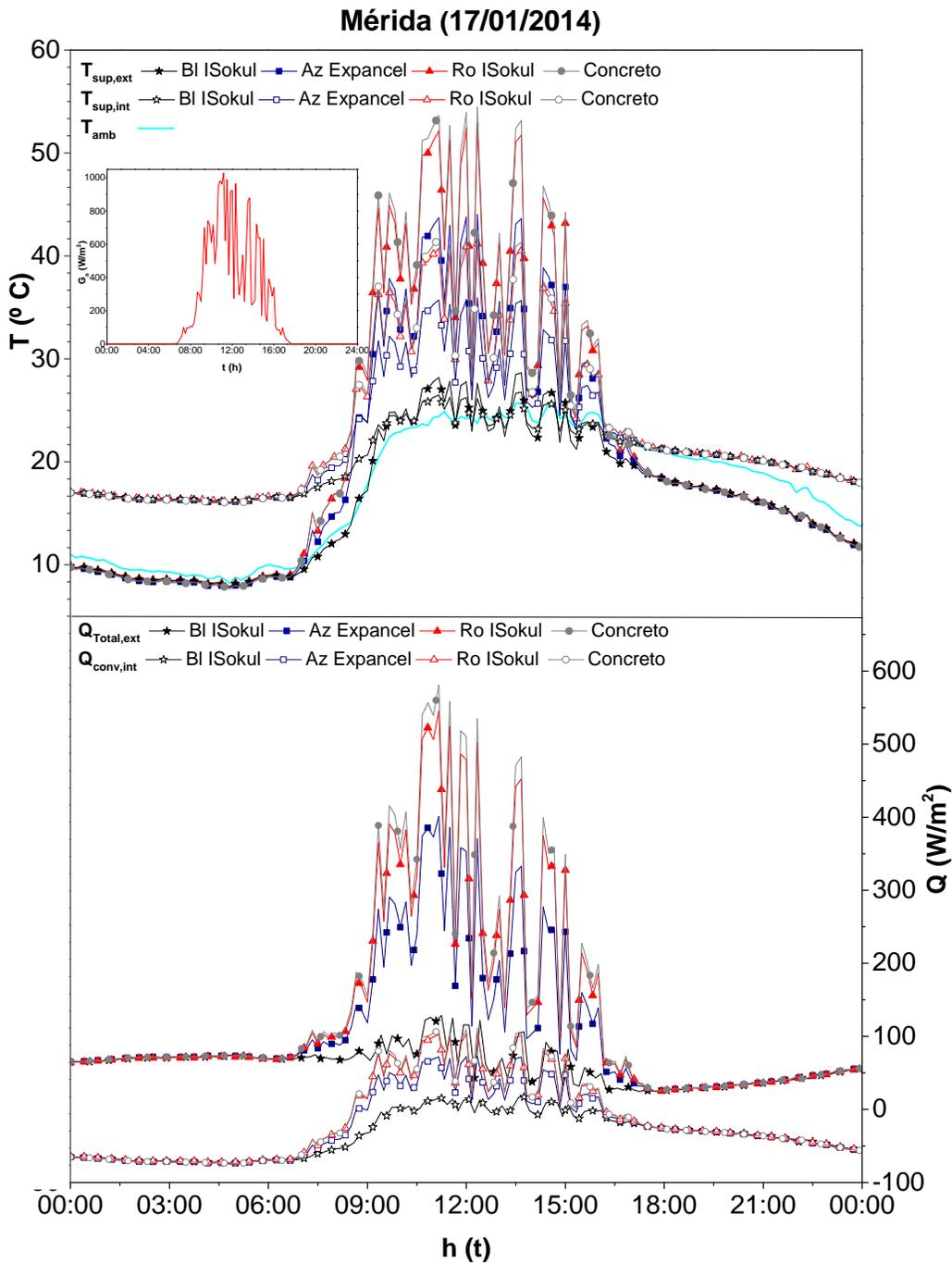


Figura 5.13: Temperatura y flujo de calor de los RR (Blanco, Azul y Rojo) y del techo de concreto sin RR para el día 17 de enero del 2014.

En la Tabla 5.15 se muestran las temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores de los RR seleccionados y del techo sin RR, para el día más frío del año 2014 en Mérida. Donde se observa que se reducen las temperaturas al aplicar un RR blanco con respecto a un techo sin RR hasta 25.8 y 15.35°C. para la  $T_{\text{sext,max}}$  y  $T_{\text{sint,max}}$ , respectivamente. Por lo que respecta a los flujos de calor, se reduce el flujo de calor promedio exterior de hasta 77.48 W/m<sup>2</sup> y para la interior incrementa la transferencia de calor desde el exterior al interior hasta 19.18 W/m<sup>2</sup>.

Tabla 5.15: Temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores de los RR para el día 17 de enero del 2014 para Mérida.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{sint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
Bl ISokul	28.65	26.76	60.93	-35.39
Az Expancel	44.02	35.91	107.70	-23.81
Ro ISokul	52.91	41.20	131.68	-16.78
Concreto	54.45	42.11	138.41	-16.21

### Sistema Compuesto del Techo

En este apartado se presenta el análisis del techo compuesto con y sin RR, compuesto por una capa concreto y de poliestireno al interior de 10 y 2.54 cm, respectivamente. Las características detalladas de los techos se presentan en el Capítulo 4.

### Hermosillo

Al igual que en caso del techo simple, se seleccionó el clima de Hermosillo como representativo para los otros climas porque sus datos climáticos de temperatura y radiación tienen menor cantidad de fluctuaciones para el día más cálido y frío de cada mes en comparación con los demás, sobre todo en invierno; por lo tanto se pueden analizar y visualizar mejor sus resultados. Las temperaturas y el flujo de calor del techo se relacionan directamente con el comportamiento de las variables atmosféricas, principalmente con la radiación. Para el clima de Hermosillo se incluyen los resultados de la simulación para todos los RR blancos, azules y rojos, así como para el techo sin RR. No

obstante para los otros climas de estudio se seleccionó un RR representativo de cada color, cuyo valor de reflectancia fuera el más alto, en el Capítulo 3 se presenta la reflectancia de todos los RR. Por lo tanto, se seleccionó el RR PROINSA con expancel para los azules e Impac Sokul para los blancos y rojos.

### **Concreto**

En la Figura 5.14 se aprecian los resultados del análisis de conducción de calor para el techo compuesto sin RR. Dónde se presentan los resultados para el día más cálido y frío del año 2014, el 3 junio (lado izquierdo) y el 27 de diciembre, respectivamente. En la parte superior de cada figura se muestra las temperaturas y en la inferior el flujo de calor; la radiación se presenta en el lado superior izquierdo de las temperaturas para cada día representativo. En lo que respecta a la simbología de los gráficos, se tienen los símbolos con relleno sólido y hueco, los primeros se refiere a los resultados al exterior del techo y los segundos al interior ya sea para la temperatura o los flujos de calor.

Para el verano se tiene una temperatura superficial exterior ( $T_{\text{sext,max}}$ ) e interior ( $T_{\text{sint,max}}$ ) máxima del techo de 87.30 y 28.79 ° C, respectivamente. Las temperaturas promedio son de 48.32 y 25.85 ° C al exterior e interior del techo, respectivamente. En lo que respecta a los flujos de calor al exterior e interior del techo se tienen valores promedio de  $Q_{\text{Total,prom}} = 214.93 \text{ °C}$  y  $Q_{\text{conv,prom}} = 11.27 \text{ °C}$  para el verano. Las temperaturas al exterior del edificio son muy elevadas sin embargo al introducir la capa de aislamiento al interior del techo, se observa que las temperaturas al interior permanecen casi constantes lo cuál se puede ver en el flujo de calor convectivo interior ( $Q_{\text{conv,int}}$ ), que la transferencia de calor es muy poca. Como es de esperarse se tienen los valores más altos de temperatura y transferencia de calor en el horario de las 9:00 a las 21:00 hrs, que es cuando existe radiación.

En cuanto al invierno se tienen  $T_{\text{sext,max}}$  y  $T_{\text{sint,max}}$  de 41.85 y 25.35 °C, respectivamente. Con unas temperaturas promedio de  $T_{\text{sext,prom}}$  y  $T_{\text{sint,prom}}$  de 12.67 y 23.50 °C. Las temperaturas superficiales al exterior disminuyen hasta del orden de 46 °C con respecto al verano. Sin embargo en el interior las temperaturas están dentro del intervalo de confort (24 a 26 °C). Tanto para el invierno y verano las temperaturas al interior son casi del mismo orden que la temperatura a la cual se encuentra el interior por la condición de frontera constante de 24 °C que se estableció al considerar un sistema

---

de climatización al interior. Por lo que se refiere a los flujos de calor en ese mes se tienen  $Q_{\text{Total,prom}} = 117.52 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $Q_{\text{conv,prom}} = -5.40 \text{ }^\circ\text{C}$ . La transferencia de calor en el interior va de adentro hacia afuera. En este clima la mayor transferencia de calor se da en el periodo que va desde las 9:00 a las 18:00 hrs.

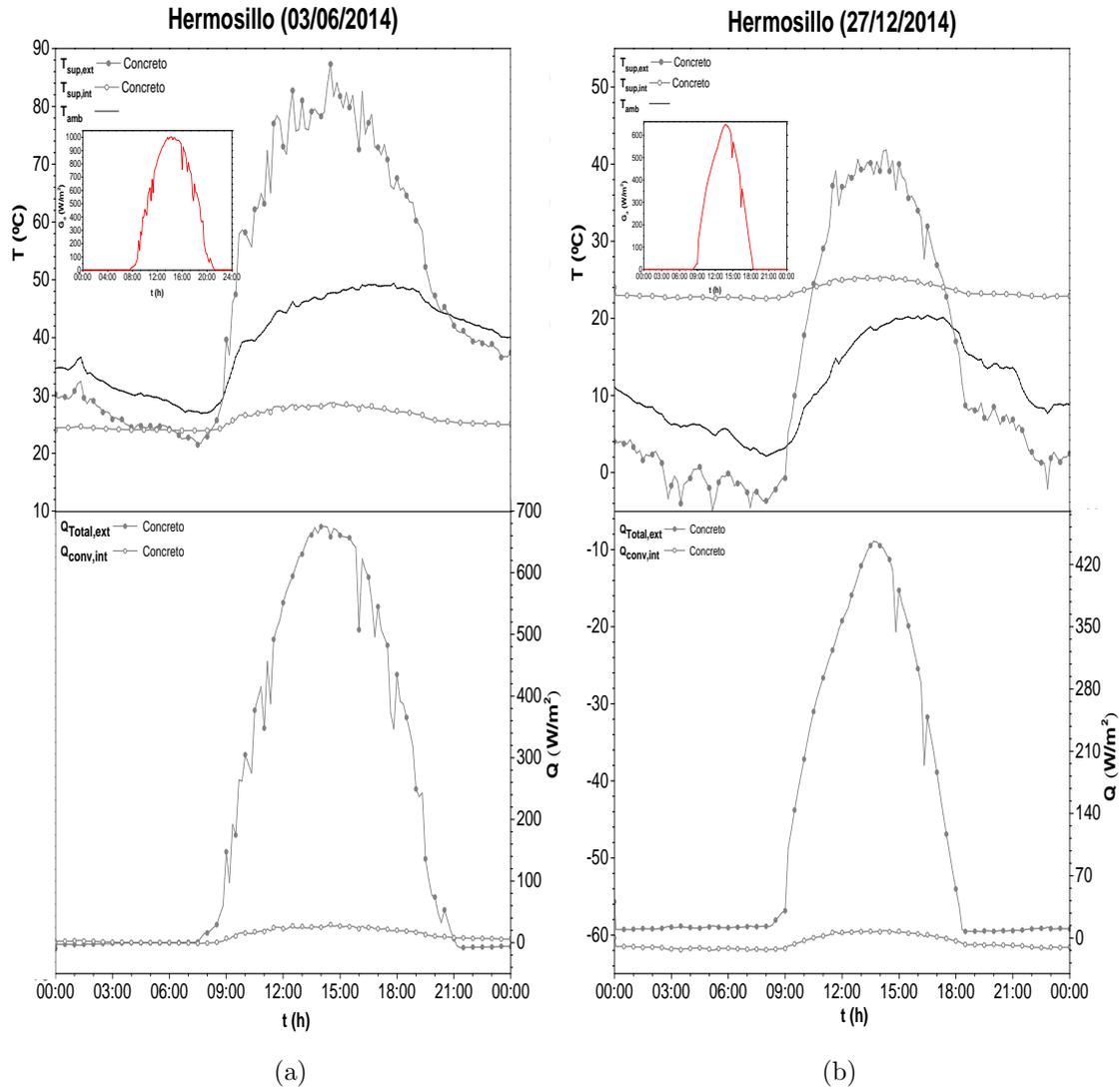


Figura 5.14: Temperatura y flujo de calor del techo compuesto de concreto sin RR para el día más cálido y frío. a) 3 de junio del 2014 y b) 27 de diciembre del 2014.

### Blancos

En la Figura 5.15 se muestran los resultados para el techo compuesto con la aplicación de los nueve recubrimientos blancos seleccionados anteriormen-

---

te. Del lado izquierdo se presentan los resultados para el día 3 de junio del 2014 (día más cálido) y del lado derecho para el día 27 de diciembre del 2014 (día más frío). Como se puede percibir en ambas gráficas las temperaturas interiores y flujos de calor al interior tienen una pequeña fluctuación y sus temperaturas permanecen dentro del intervalo de los (símbolo hueco)  $24^{\circ}\text{C}$ , además no se alcanzan a percibir claramente las diferencias entre los RR, este es uno de los motivos por los que se seleccionó solo un RR.

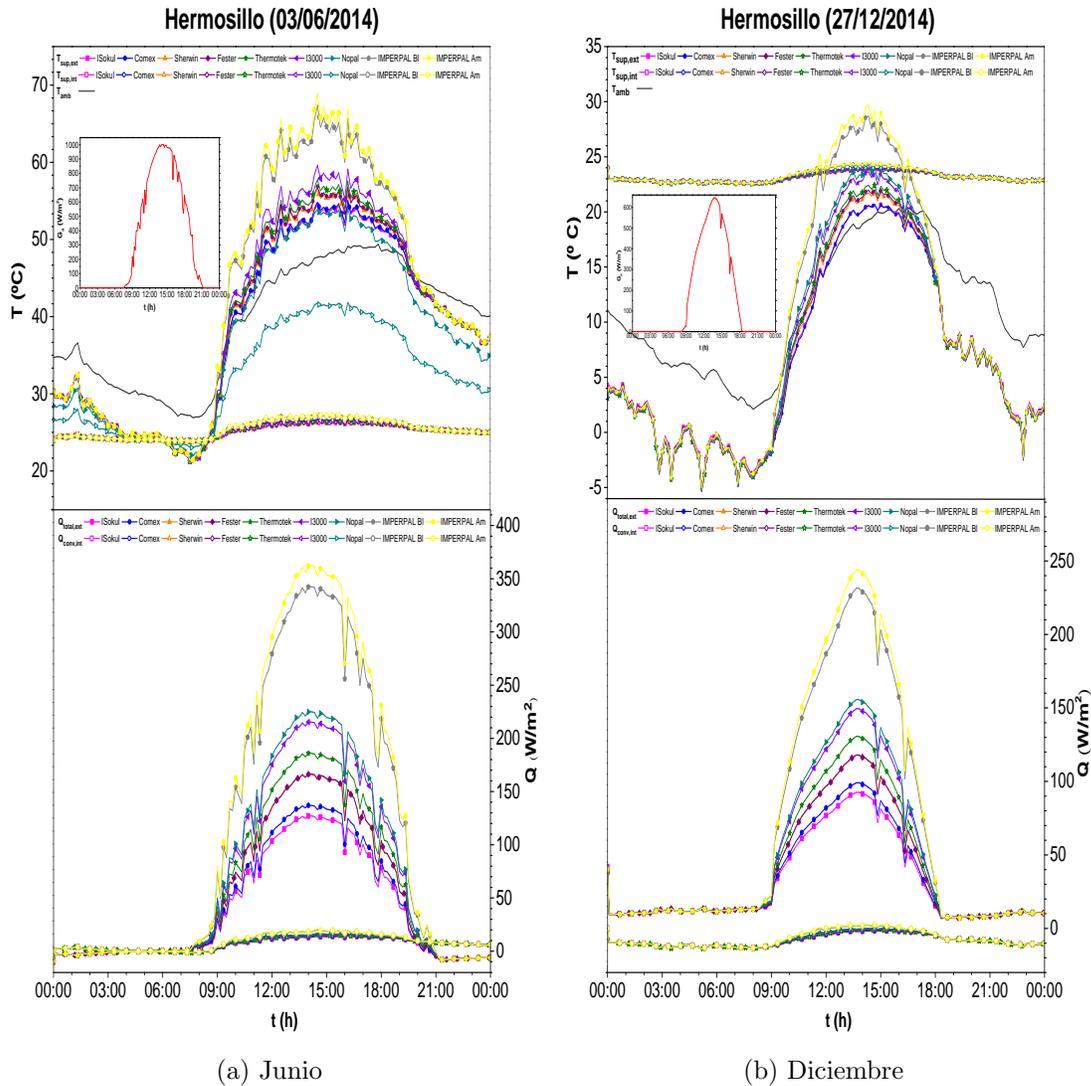


Figura 5.15: Temperatura y flujo de calor del techo con los RR blancos para el día más cálido y más frío en el 2014 para Hermosillo . a) 3 de junio y b) 27 de diciembre.

En la Tabla 5.16 se muestran las temperaturas superficiales y flujo de calor exteriores e interiores del techo compuesto para el día 3 de junio del 2014. Se presentan los recubrimientos en orden ascendente del que tiene menor reflectancia al mayor, el IMPERPAL Am e Impac Sokul, respectivamente. Al

exterior del techo se tienen variaciones máximas de las  $T_{\text{sext,max}}$  y  $T_{\text{sint,max}}$  de hasta  $4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente para los RR comerciales. Por otro lado, se tiene una diferencia entre el flujo de calor promedio al exterior e interior de  $28.46\text{W/m}^2$  y  $0.64\text{W/m}^2$ . Al igual que en el caso anterior, se observa que la transferencia de calor al interior es poco significativa.

Tabla 5.16: Temperaturas superficiales máximas y flujo de calor promedio de los recubrimientos blancos para el día 3 de junio del 2014.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\text{sint,max}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [ $\text{W/m}^2$ ]
<b>IMPERPAL Am</b>	67.40	27.28	107.83	8.49
<b>IMPERPAL Bl</b>	68.92	27.40	114.07	8.71
<b>PNopal</b>	60.45	26.75	69.98	7.55
<b>Impac 3000</b>	59.62	26.69	66.88	7.42
<b>Thermotek</b>	57.75	26.55	57.44	7.16
<b>Fester</b>	55.85	26.48	51.06	7.07
<b>Sherwin</b>	56.61	26.46	51.13	7.01
<b>Comex</b>	55.07	26.35	41.68	6.11
<b>Impac Sokul</b>	54.82	26.33	38.42	6.78

En la Tabla 5.17 se muestran las temperaturas superficiales máximas y el flujo de calor promedio para el día más frío de Hermosillo en el 2014. Se tienen diferencias de temperaturas máximas exteriores e interiores para los RR comerciales de  $2.93$  y de  $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Como se puede notar, las diferencias son poco significativas entre estos RR.

Tabla 5.17: Temperaturas superficiales máximas de los recubrimientos blancos y su flujo de calor para el día 27 de diciembre del 2014.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{sint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
IMPERPAL BI	28.69	24.35	64.89	-7.16
IMPERPAL Am	29.71	24.43	67.90	-6.98
PNopal	24.24	24.01	46.23	-7.70
Impac 3000	23.64	23.98	44.76	-7.84
Thermotek	22.42	23.91	40.14	-8.01
Fester	22.39	23.20	11.03	47.14
Sherwin	21.76	23.88	37.01	-8.09
Comex	20.69	23.83	32.37	-8.24
Impac Sokul	<b>20.71</b>	23.83	30.64	-8.10

En general, las temperaturas superficiales y flujo de calor al interior para el día más cálido y frío dependen en gran medida de la temperatura constante del sistema de climatización que es de 24 °C. Para algunos casos la temperatura exterior del techo alcanza temperaturas inclusive más elevadas que las del techo sin aislamiento.

### Color

Los resultados del análisis de conducción de calor para el techo con la aplicación de los recubrimientos de color (azules y rojos) se presenta en la Figura 5.16, el día más cálido se presenta del lado izquierdo y el más frío del lado derecho, lado izquierdo y derecho. Las siglas Az y Ro antes del nombre de cada recubrimiento son para indicar el color del recubrimiento ya sea azul o rojo.

Como se aprecia en las temperaturas y flujos de calor, los RR rojos son los que alcanzan mayores temperaturas superficiales en el techo y por ende su transferencia de calor es mayor. En el caso del RR rojo Comex e Impac 3000 (I3000) la diferencia entre ellos es poco significativa (línea azul y morada, respectivamente). Por otro lado, al aplicar un RR azul en comparación con un rojo se tienen reducciones máximas de temperatura del orden de los 18 y 8.08 °C para el día más cálido y frío, respectivamente.

También, se puede apreciar que las temperaturas al interior tanto para el verano como el invierno, tienen poca oscilación térmica y por lo tanto la transferencia de calor es también muy baja como en el caso de los RR blancos y el techo sin RR. Por lo tanto no existe discomfort frío ni cálido.

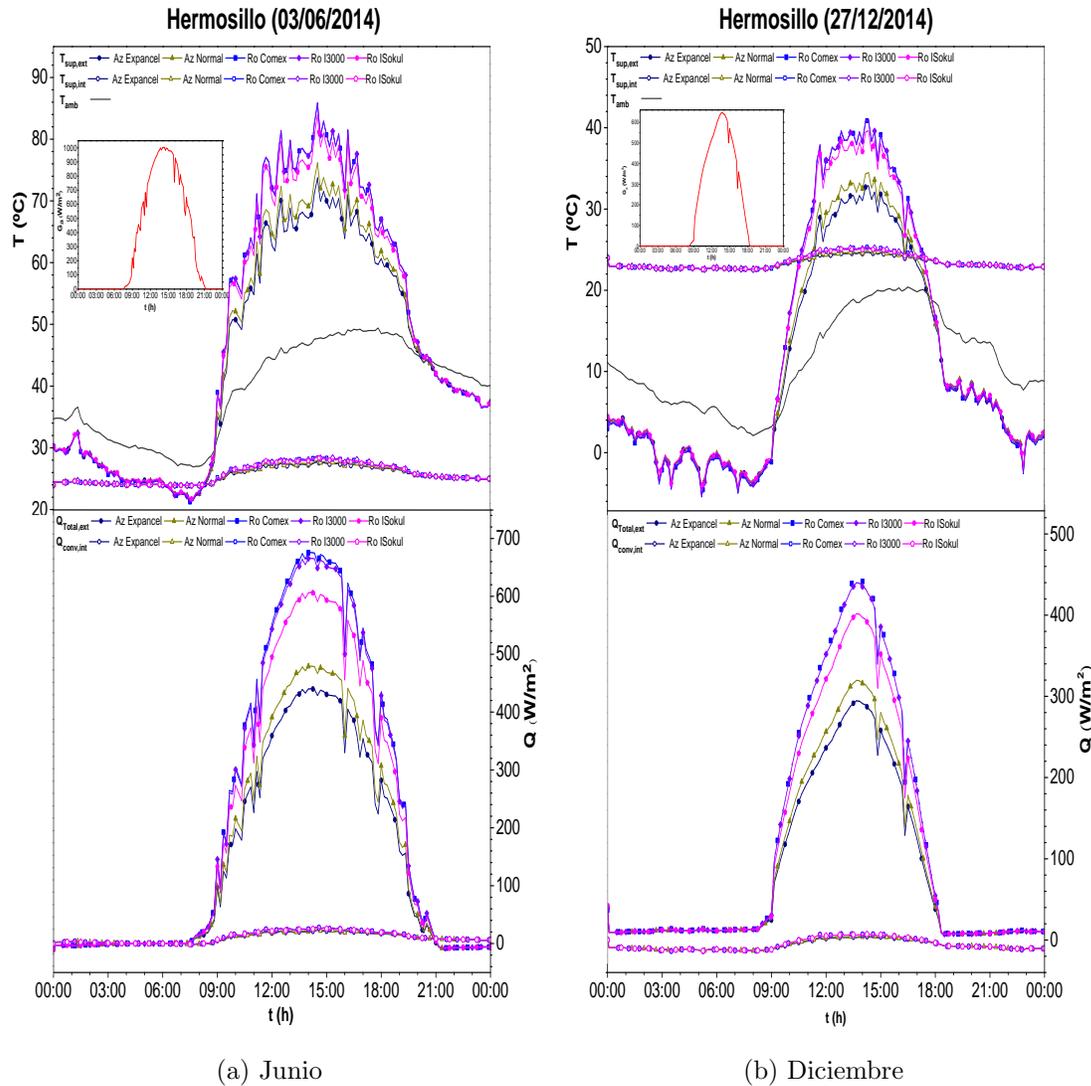


Figura 5.16: Temperatura y flujo de calor del techo con los RR de color (rojos y azules) para el día más cálido y más frío del año 2014 a) 3 de junio y b) 27 de diciembre.

En la Tabla 5.18 se presentan las  $T_{sext,max}$  y  $T_{sint,max}$ , así como el  $Q_{Total,prom}$  y  $Q_{cint,prom}$  para el día 3 de junio del 2014, para los RR de color. Al exterior del techo se alcanzan temperaturas de 85.85 y 73.74 °C para los RR rojos y azules, respectivamente. En cuanto a los flujos de calor se tiene una entrada

de calor promedio máxima de 215.17 W/m<sup>2</sup> al exterior para el RR Comex rojo. Sin embargo, en el interior el flujo de calor varía poco, tiene una variación máxima de 1.66 W/m<sup>2</sup> con una desviación estándar de  $\pm 0.79$ .

Tabla 5.18: Temperaturas superficiales exteriores e interiores máximas y el flujo de calor para los RR de color para el día 3 de junio del 2014.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{shint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Ro Comex</b>	85.85	28.68	215.17	11.04
<b>Ro I3000</b>	85.92	28.68	211.91	11.06
<b>Ro ISokul</b>	84.01	28.54	192.76	10.82
<b>Az Normal</b>	76.21	27.95	151.84	9.72
<b>Az Expancel</b>	73.74	27.76	139.26	9.38

En la Tabla 5.19 se presentan las temperaturas superficiales máximas y el flujo de calor de los RR de color para el 27 de diciembre del 2014. Las temperaturas superficiales al exterior tanto para los RR rojos y azules son elevadas. Sin embargo, en el interior existe poca oscilación térmica, por lo tanto en invierno las temperaturas permanecen dentro de un intervalo aceptable, es decir, no existe un discomfort térmico. El flujo de calor interior es negativo es decir que la transferencia de calor va del interior al exterior del techo.

Tabla 5.19: Temperaturas superficiales exteriores e interiores máximas y el flujo de calor para el día 27 de diciembre del 2014 para los RR de color.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{shint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Ro Comex</b>	40.94	25.28	117.76	-5.65
<b>Ro I3000</b>	40.94	25.28	116.10	-5.59
<b>Ro ISokul</b>	39.64	25.18	106.55	-5.62
<b>Az Normal</b>	34.49	24.79	86.45	-6.32
<b>Az Expancel</b>	32.86	24.67	80.28	-6.55

**Monterrey**

En la Figura 5.17 se presentan las temperaturas y flujos de calor para el techo compuesto con los RR seleccionados anteriormente en color blanco, azul y rojo (Bl, Az y Ro, respectivamente) y sin RR (concreto) para el día 27 de abril del 2014 de el clima Monterrey. Del lado izquierdo superior se presenta la gráfica de radiación para este día, se observa que sólo se presentan para este día dos fluctuaciones importantes una en el horario que va de las 11:09 a las 11:30 hrs aproximadamente y la segunda se presenta entre las 17:30 y las 17:51 hrs. Las temperaturas superficiales exteriores del techo son mayores que la temperatura ambiente (línea cyan) para todos los RR, el que se acerca más a estas temperturas es el RR blanco. En cuanto a las temperaturas superficiales interiores del techo, en general todas permanecen dentro del rango de los 24 °C con una desviación estándar de  $\pm 1.62$  °C.

En cuanto al flujo de calor se tiene transferencia de calor exteriorde hasta del orden de los 650 W/m<sup>2</sup> para el techo sin RR. Sin embargo, en el interior del techo el flujo de calor es poco significativo.

En la Tabla 5.20 se aprecian las temperaturas superficiales máximas, así como el flujo de calor promedio del exterior e interior del techo. Se observa que al exterior del techo se reducen las temperaturas hasta 20.44 °C del RR blanco con respecto al techo sin RR y el flujo de calor exterior hasta 164.45 W/m<sup>2</sup>. Estas reducciones son importantes, porque podrían contribuir de manera significativa a reducir el efecto de la isla de calor sobre todo en verano.

### Monterrey (27/04/2014)

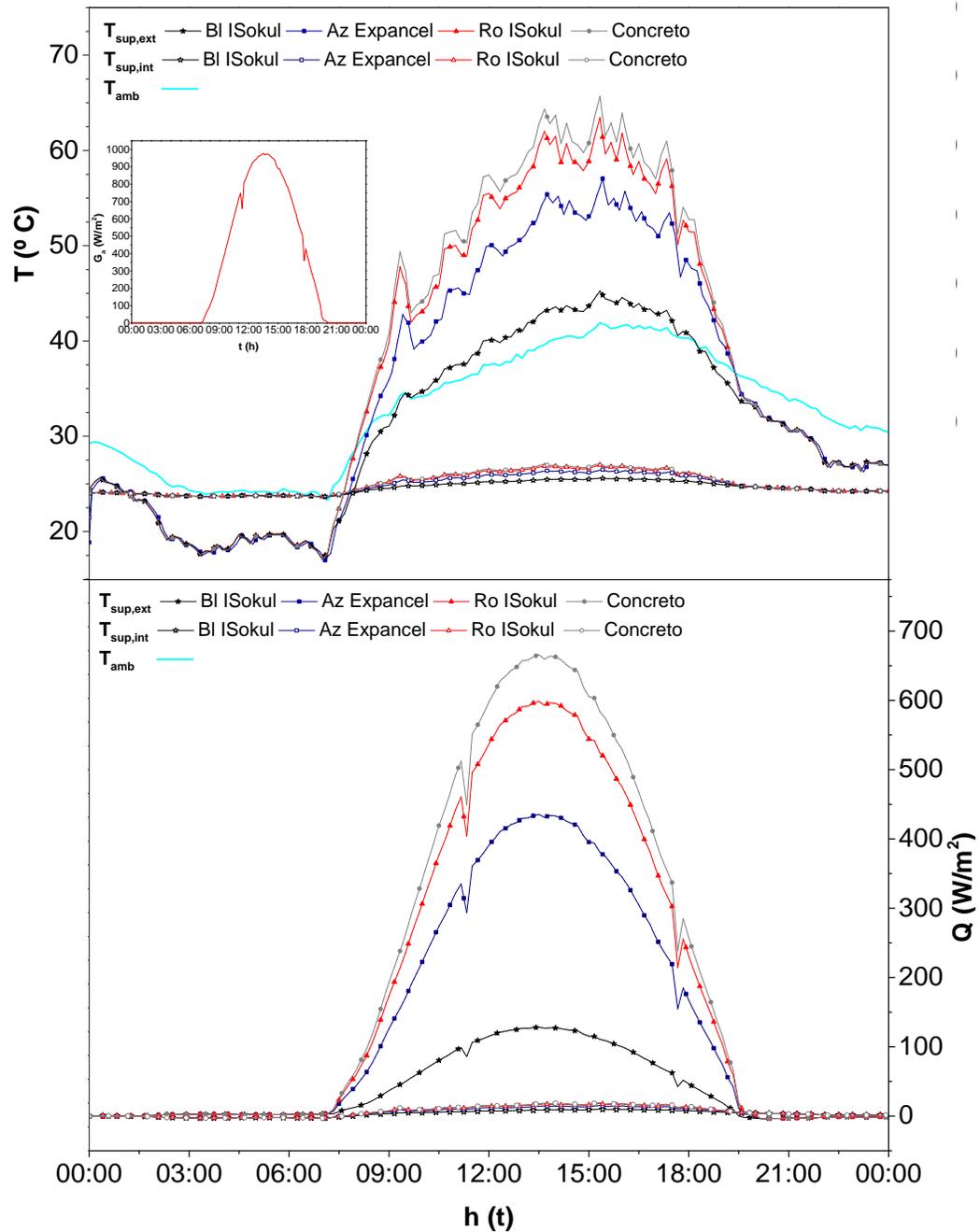


Figura 5.17: Temperatura y flujo de calor del techo compuesto con y sin RR para el 27 de abril del 2014.

Tabla 5.20: Temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores de los RR para el día 27 de abril del 2014 para Monterrey.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{sint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Bl ISokul</b>	45.25	24.56	38.62	3.25
<b>Az Expanel</b>	57.04	26.50	132.59	5.01
<b>Ro ISokul</b>	63.45	26.68	182.44	6.01
<b>Concreto</b>	65.69	27.15	203.07	6.31

Por otro lado, en la Figura 5.18 se presentan las temperaturas y flujos de calor para el techo compuesto para el día más frío de Monterrey. La radiación para este día se observa en la gráfica del lado superior izquierdo, cuyas fluctuaciones son bastante predominantes, las cuales pueden ser causadas por factores externos como la nubosidad. Los símbolos sólidos representan a las temperaturas y flujos de calor al exterior y los huecos al interior. Se observó que a pesar de que la temperatura ambiente tiene temperaturas por debajo de los 0 °C, no se ven afectadas las temperaturas superficiales interiores del techo, porque este se encuentra aislado y cuenta con un sistema de climatización. En cuanto al flujo de calor al interior del techo, se tiene una transferencia de calor poco significativa, sin embargo sus valores son negativos, esto significa que la transferencia va del interior al exterior.

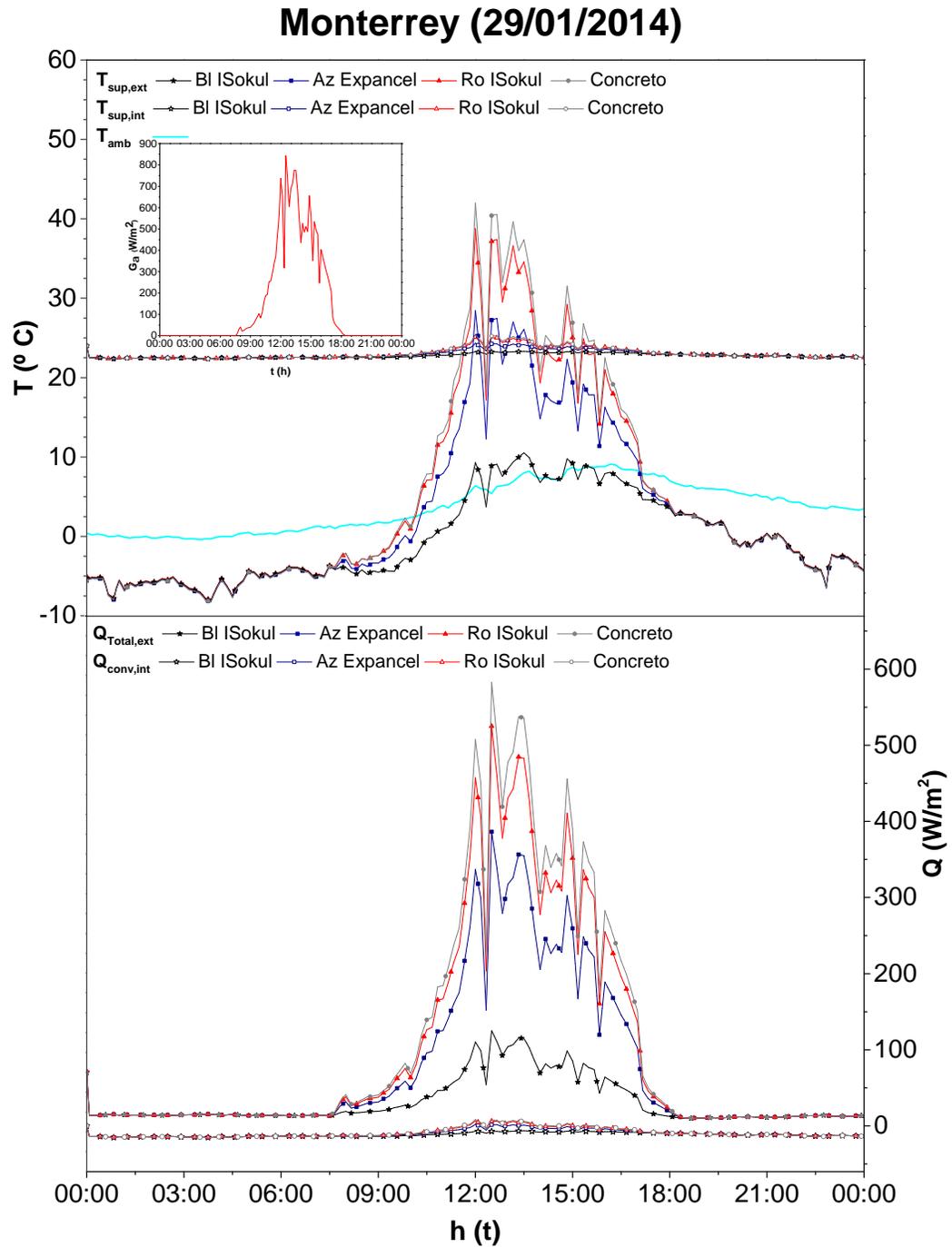


Figura 5.18: Temperatura y flujo de calor para el techo compuesto con y sin RR para el día el 29 de enero del 2014.

### Xalapa

En la Figura 5.19 se presentan las temperaturas y flujos de calor para el RR PROINSA expancel azul e Impac Sokul en blanco y rojo para el techo compuesto. para el día más cálido (28 de abril del 2014). En la gráfica que se encuentra del lado superior izquierdo se presenta la radiación y se observa que a partir de las 14:36 hrs las fluctuaciones son mayores lo que se ve reflejado en las temperaturas y flujos de calor. Por otro lado, al igual que en los casos anteriores las variaciones en las temperaturas y flujos de calor al interior del techo son pocas (símbolos huecos). Mientras que en las Temperaturas al exterior al implementar un RR blanco se pueden reducir las temperaturas hasta del orden de 40 °C. Por lo tanto en el interior se tienen temperaturas adecuadas con cualquier RR lo que causa que sería indistinto el RR que se utilice sin embargo si se utilizó un RR blanco en el exterior se podría disminuir el efecto de la ICU.

En la Tabla 5.21 se presentan las temperaturas y flujo de calor promedio para el día más frío. Al igual que en el caso anterior se observa que las temperaturas al interior máximas son del orden de los 24 °C, la variación de sus temperaturas interiores son poco significativas. Sin embargo al implementar un RR azul o blanco se podría reducir el efecto de la Isla de Calor Urbana.

Tabla 5.21: Temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores para el techo compuesto para el día 29 de enero del 2014 para Monterrey.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{shint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Bl ISokul</b>	10.53	23.30	31.37	-11.57
<b>Az Expancel</b>	28.43	24.33	74.65	-10.15
<b>Ro ISokul</b>	35.76	25.11	97.55	-9.29
<b>Concreto</b>	41.99	25.36	107.12	-9.09

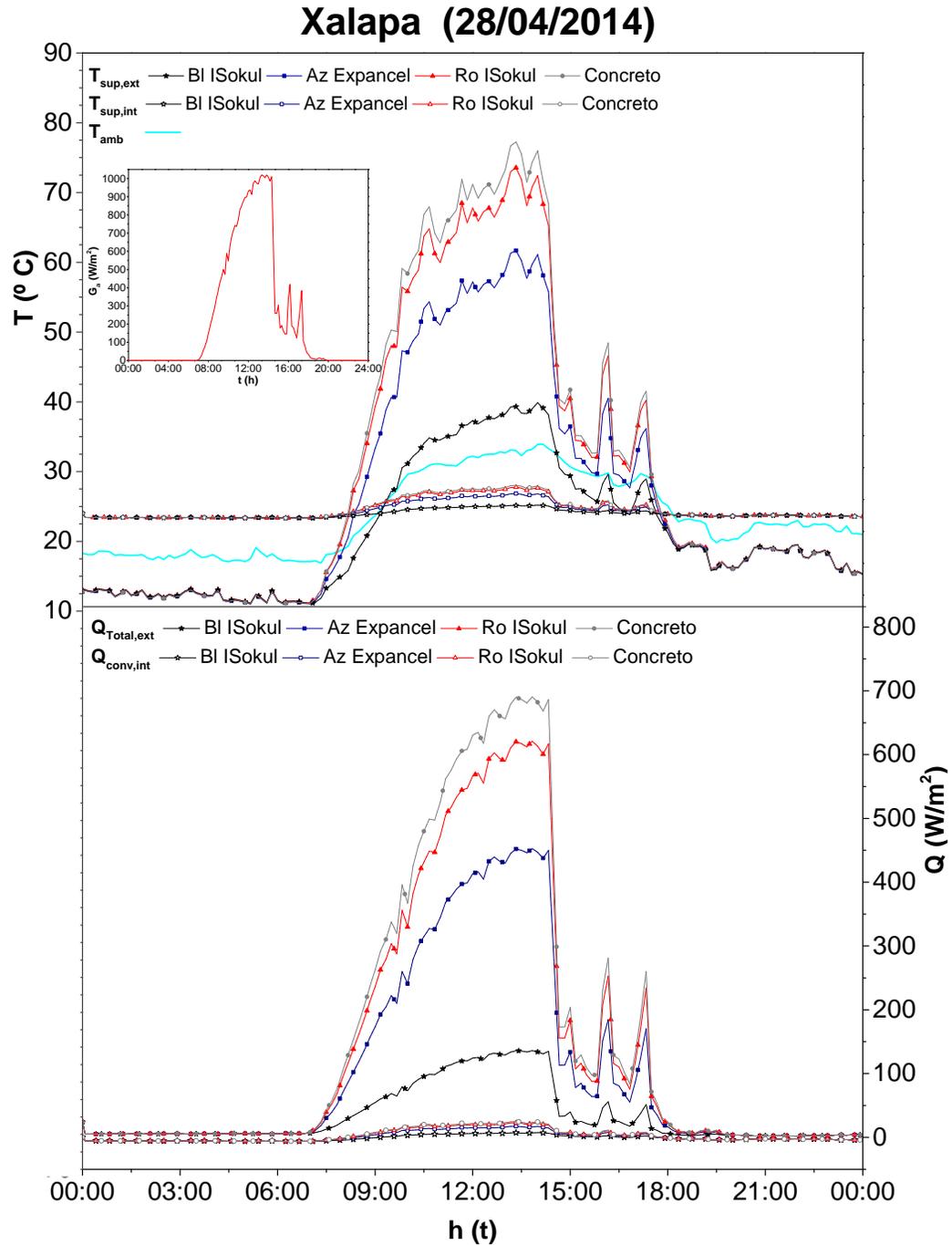


Figura 5.19: Temperatura y flujo de calor de los RR seleccionados para el techo compuesto con y sin RR para el día 28 de abril del 2014.

En la Tabla 5.22 se presentan las temperaturas máximas y flujos de calor promedio del techo compuesto con y sin RR para el día 28 de abril del 2014. En cuanto a la temperatura superficial exterior se tienen reducciones de hasta 37.37 °C al implementar un RR blanco. En cuanto a la  $T_{sint,max}$  se tienen reducciones de tan solo 2.83 °C. Por lo tanto, al tener poliestireno las condiciones al interior no se ven afectadas de manera significativa. En cuánto a las temperaturas exteriores e interiores se tienen reducciones de hasta 125.36 y 4.13 °C, respectivamente.

Tabla 5.22: Temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores y flujo de calor promedio del techo compuesto con y sin RR para el día 28 de abril del 2014 para Xalapa.

Recubrimiento	$T_{sext,max}$ [°C]	$T_{sint,max}$ [°C]	$Q_{Total,prom}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{cint,prom}$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Bl ISokul</b>	39.88	25.20	33.79	-1.34
<b>Az Expancel</b>	61.66	26.85	105.17	1.05
<b>Ro ISokul</b>	73.54	27.74	143.34	2.41
<b>Concreto</b>	77.25	28.03	159.15	2.79

En la Figura 5.20 se muestran las temperaturas superficiales y flujos de calor al exterior e interior del techo compuesto. En el lado superior izquierdo se presenta la gráfica de radiación solar, el clima de Xalapa en invierno es de los que presentan mayor cantidad de fluctiaciones en todo el periodo con radiación lo cuál se ve reflejado en las gráficas de temperatura y flujo de calor.

En este clima se tienen temperaturas máximas de 15.89 °C para la temperatura ambiente, sin embargo las temperaturas superficiales exteriores alcanzan valores de hasta 57 °C cuando para el techo con RR rojo o sin él. Por otro lado, al aplicar un RR blanco las temperaturas al exterior permanecen por debajo de los 20 °C, por lo cual si estas temperaturas lograran incidir dentro del edificio lograría temperaturas muy bajas por lo tanto se necesaria sistemas de climatización para calentar la habitación como es el caso de el techo sin poliestireno, pero sin embargo al interior del edificio se tienen flujos de calor con fluctuaciones muy poco significativas. Por lo que respecta

a los flujos de calor se tiene reducciones significativas con lo que respecta a la transferencia de calor al exterior por otro lado, en lo que respecta a los flujos de calor superficiales al interior no son significativos.

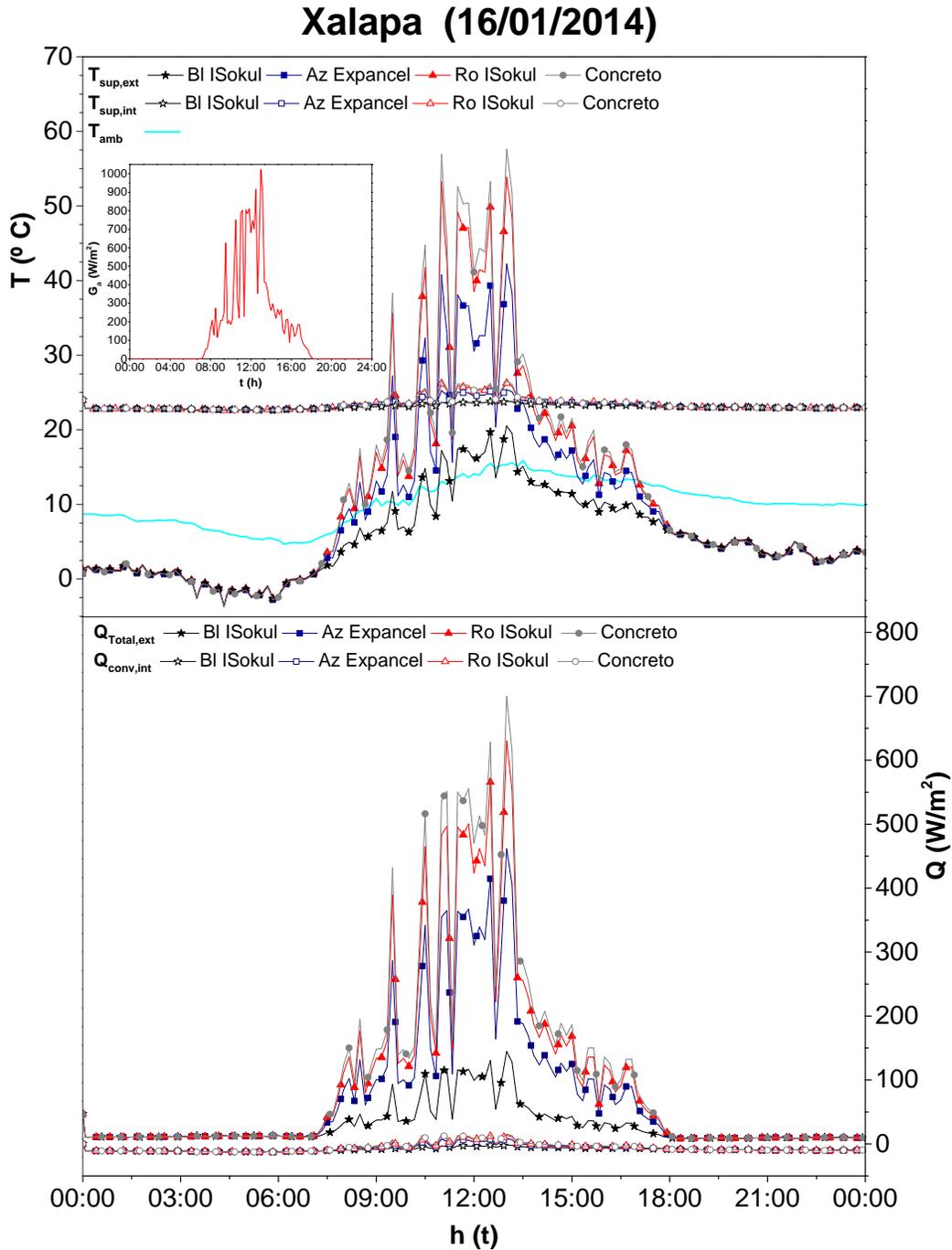


Figura 5.20: Temperatura y flujo de calor de los RR (Blanco, Azul y Rojo) del techo de concreto sin RR para el día 16 de enero del 2014.

En la Tabla 5.23 se presentan las temperaturas superficiales máximas y el flujo de calor promedio al exterior e interior del techo compuesto con una capa de concreto y poliestireno para el día 16 de enero del 2014. Al igual que en los casos anteriores la variación de las temperaturas superficiales al interior son mínimas del orden de los 2.72 °C

Tabla 5.23: Temperaturas superficiales máximas exteriores e interiores y flujo de calor promedio del techo compuesto con y sin RR para el día 16 de enero del 2014 para Xalapa.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{shint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Bl ISokul</b>	20.52	23.82	29.02	-8.64
<b>Az Expancel</b>	42.25	25.38	73.62	-7.14
<b>Ro ISokul</b>	53.85	26.25	97.21	6.21
<b>Concreto</b>	57.60	26.54	107.08	-6.01

## México

En la Figura 5.21 se presentan las temperaturas y flujos de calor para el techo con y sin RR para el clima de la Cd. de México, para el día 14 de abril del 2014, este clima se caracteriza por tener un clima templado húmedo. En el lado superior izquierdo se presenta la gráfica de la radiación, como se observa solo presenta una fluctuación importante en el horario de las 15:00 a las 15:40 hrs. Se puede observar que las temperaturas superficiales exteriores para el techo para el techo de concreto y con RR rojo son bastante elevadas del alcanzan temperaturas exteriores del orden de los 80 °C. Y en cuanto al flujo de calor al exterior se alcanzan valores hasta del orden de los 700 W/m<sup>2</sup>.

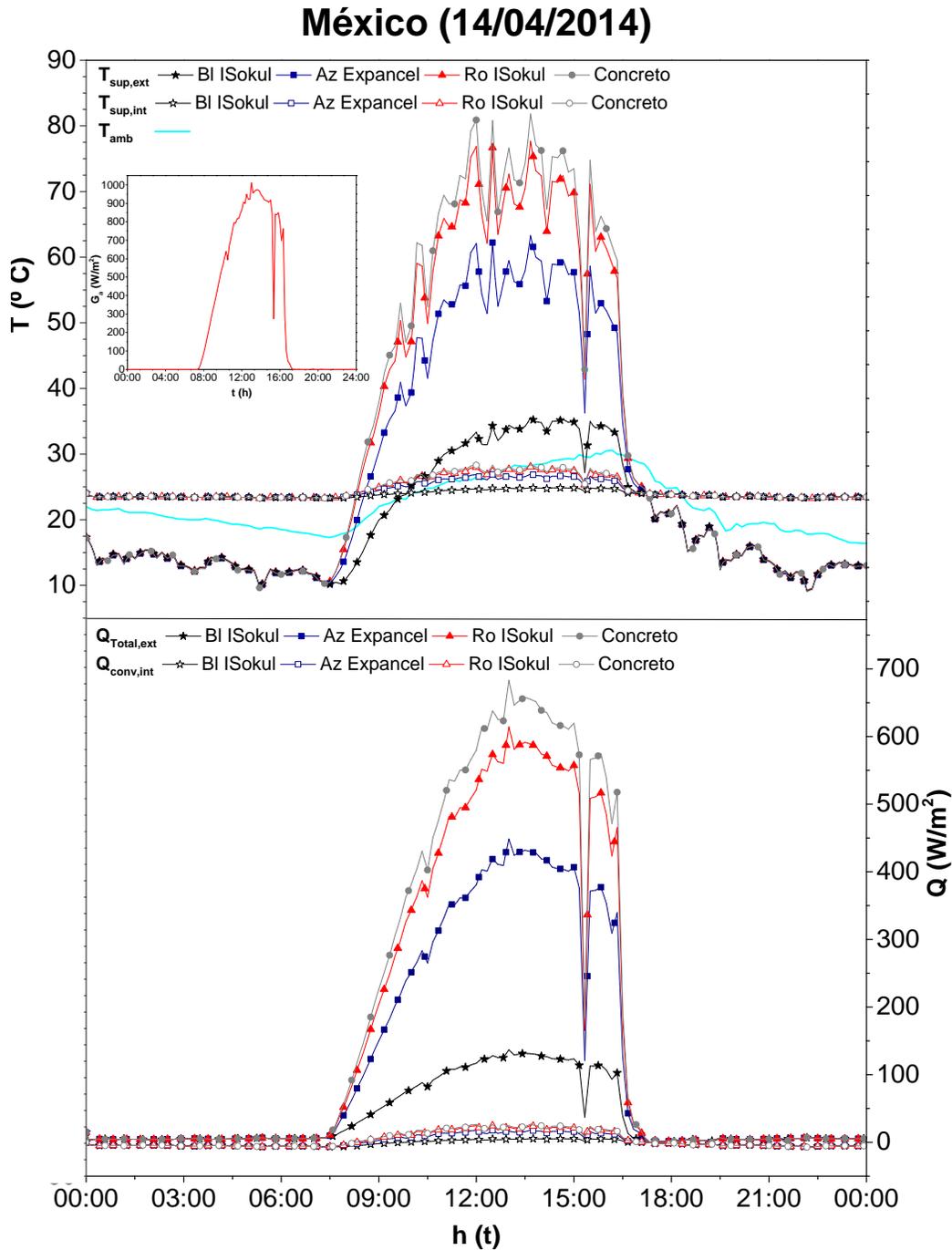


Figura 5.21: Temperatura y flujo de calor del techo con y sin RR el día 14 de abril del 2014.

En la Tabla 5.24 se presentan las temperaturas superficiales y flujos de calor promedio al exterior e interior del techo con y sin RR. Como se muestra las  $T_{\text{sext,max}}$  se pueden reducir hasta  $46.23\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con la aplicación de un RR blanco, en cuanto a la  $T_{\text{sint,max}}$  se tienen reducciones de sólo  $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Por lo que respecta a los  $Q_{\text{Total,prom}}$  y  $Q_{\text{cint,prom}}$  se tienen reducciones de  $136.34$  y  $5.31\text{ W/m}^2$ . Además se puede observar que en el RR blanco la dirección del flujo interior se invierte a diferencia de los otros.

Tabla 5.24: Temperaturas superficiales máximas y los flujos de calor promedio para el techo con y sin RR, para el día 14 de abril del 2014.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\text{sint,max}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [ $\text{W/m}^2$ ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [ $\text{W/m}^2$ ]
<b>Bl ISokul</b>	35.58	24.87	37.54	-2.08
<b>Az Expancel</b>	63.29	26.97	115.36	1.04
<b>Ro ISokul</b>	77.67	28.06	156.63	2.77
<b>Concreto</b>	81.81	28.37	173.88	3.23

En la Figura 5.22 se muestran las temperaturas y flujos de calor para el techo son y sin RR para el invierno del clima de México. En el lado superior izquierdo se presenta la radiación, en este clima en invierno es en el que se presentan menor cantidad de fluctuaciones. En el gráfico superior se presenta la temperatura y se observa que en general todos los RR al interior del techo tienen temperaturas superficiales cercanas a los  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , al interior la temperatura superficial del RR Bl ISokul es el que presenta las menores temperaturas, incluso menores que las temperaturas interiores.

Los flujos de calor (parte inferior) tienen un comportamiento uniforme, como es de esperarse el techo sin RR es el que presenta mayor transferencia de calor, al exterior se tiene flujo de calor hasta del orden de los  $550\text{ W/m}^2$ , mientras que los flujos al interior (símbolos huecos) muy poco significativas, esto se debe a la existencia del poliestireno como aislamiento.

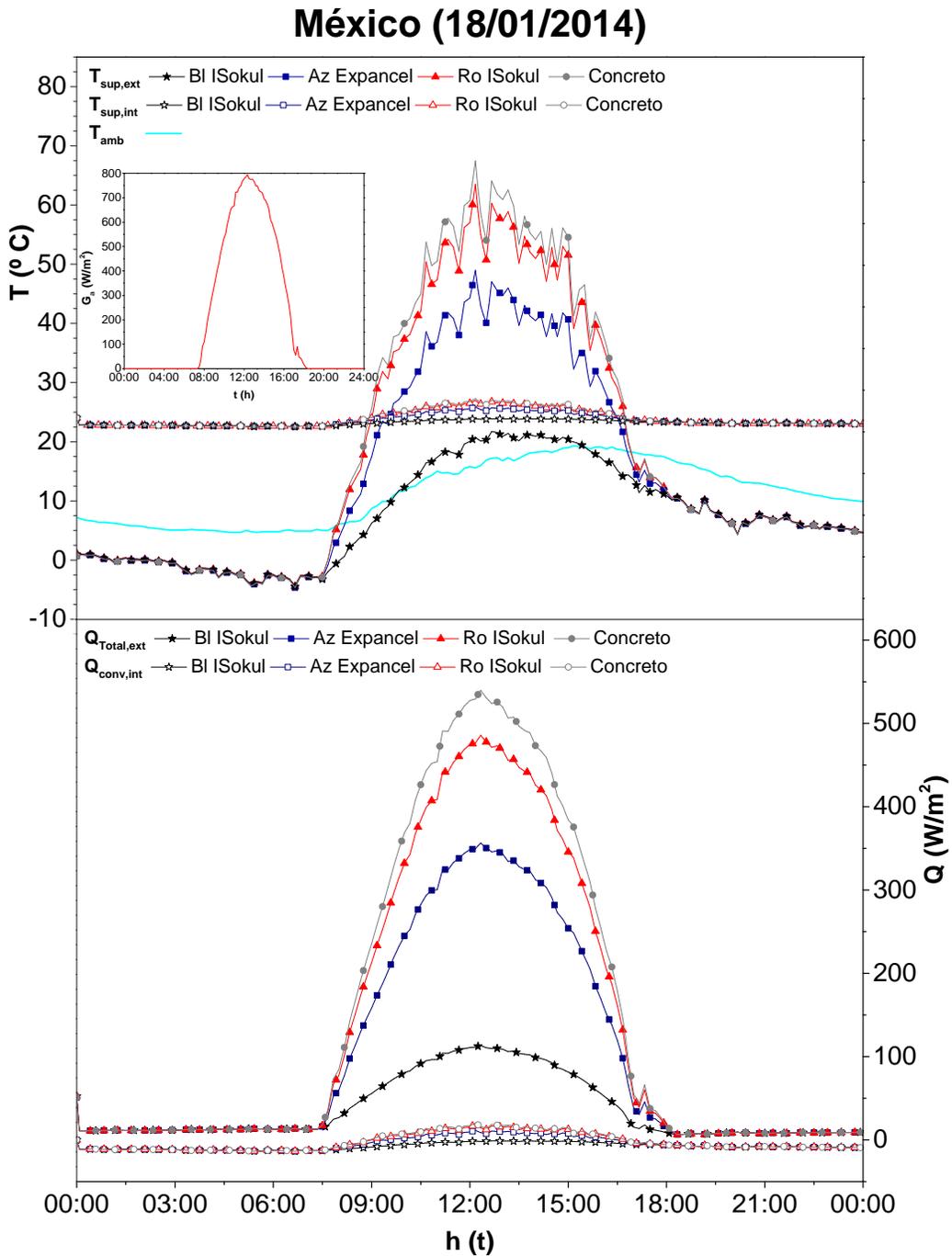


Figura 5.22: Temperatura y flujo de calor del techo con y sin RR para el día 18 de enero del 2014.

En la Tabla 5.25 se presentan las temperaturas superficiales máximas y los flujos de calor promedios para el día 18 de enero del 2014. Donde se puede observar que efectivamente las  $T_{\text{sext,max}}$  del RR Bl ISokul es menor que su  $T_{\text{sint,max}}$ , como se observó en la gráfica. Considerando sus temperatura superficial exterior este RR tiene una temperatura promedio de  $7.65\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo cual produciría un discomfort térmico al interior, sin embargo por la presencia del aislamiento las temperaturas al interior se asemejan a las condiciones de confort. Los flujos de calor al interior son negativos, es decir la transferencia de calor va del exterior al interior, en el caso de el RR blancos es mayor  $-7.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Tabla 5.25: Temperaturas superficiales máximas y flujos de calor promedios para el día 18 de enero del 2014.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_{\text{sint,max}}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
<b>Bl ISokul</b>	21.71	23.88	36.91	-7.74
<b>Az Expancel</b>	48.95	25.88	100.24	-4.80
<b>Ro ISokul</b>	63.48	26.98	133.80	-3.15
<b>Concreto</b>	67.45	27.28	147.88	-2.74

### Villahermosa

En la Figura 5.23 se presentan las temperaturas y flujos de calor para el techo sin y con los RR seleccionados anteriormente para el día 28 de abril del 2014, para el clima de Villahermosa. Se puede apreciar la mayor variación de temperaturas y flujo de calor en el periodo comprendido entre las 7:00 y 19:00 hrs, que son los períodos con mayor radiación. También se observa que el techo con el RR rojo y sin RR al interior presenta temperaturas del mismo orden (línea color roja y gris, respectivamente). Los flujos de calor al interior (símbolos huecos) al igual que en casos anteriores son poco significativos. También se observan reducciones máximas del flujo de calor exterior que van desde  $648.27$  a los  $125.69\text{ W}/\text{m}^2$  del techo sin RR con respecto al RR blanco.

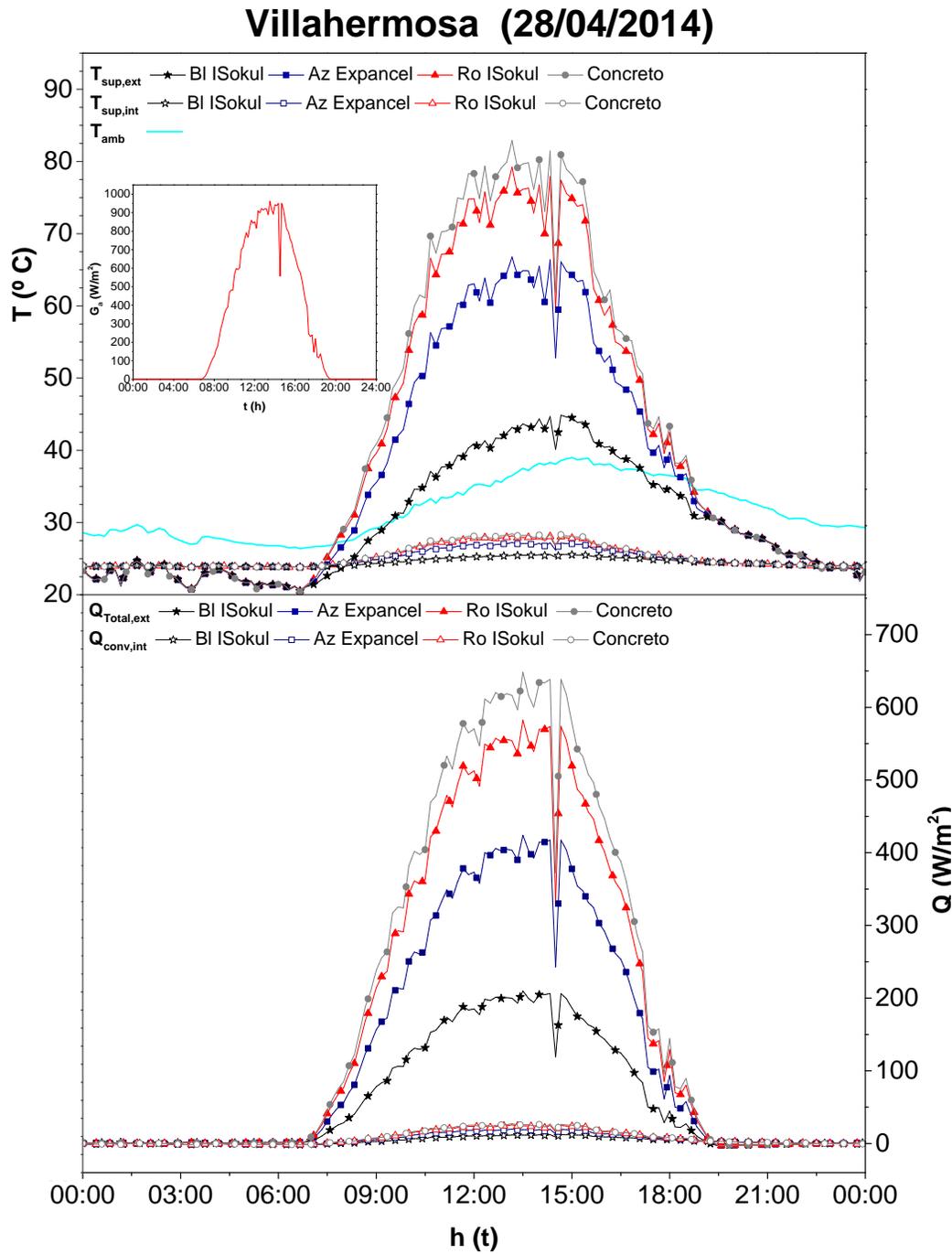


Figura 5.23: Temperatura y flujo de calor de los RR (Blanco, Azul y Rojo) del techo de concreto sin RR para el día 28 de abril del 2014.

En la Tabla 5.26 se presentan las temperaturas y flujos de calor del techo con y sin RR para el clima de Villahermosa en verano. Se pueden ver que las temperaturas superficiales interiores no tienen mucha variación con los diferentes RR, con una diferencia máxima de 2.88 °C. Mientras que para la  $T_{\text{sext,max}}$  se tienen diferencias de hasta 38.04 °C del techo de concreto en comparación del techo con el RR ISokul blanco. En cuanto al flujo de calor se tienen reducciones exteriores de hasta 148.04W/m<sup>2</sup>, lo cual puede contribuir significativamente en la reducción del ICU, sobre todo en climas como Villahermosa, cálidos.

Tabla 5.26: Temperaturas superficiales máximas y los flujos de calor promedio para el techo con y sin RR, para el día 28 de abril del 2014.

<b>Recubrimiento</b>	<b><math>T_{\text{sext,max}}</math> [°C]</b>	<b><math>T_{\text{sint,max}}</math> [°C]</b>	<b><math>Q_{\text{Total,prom}}</math> [W/m<sup>2</sup>]</b>	<b><math>Q_{\text{cint,prom}}</math> [W/m<sup>2</sup>]</b>
<b>Bl ISokul</b>	44.86	25.57	35.47	2.77
<b>Az Expancel</b>	66.77	27.23	120.01	5.65
<b>Ro ISokul</b>	79.21	28.17	164.85	7.24
<b>Concreto</b>	82.90	28.45	183.52	7.00

En la Figura 5.24 se presentan las temperaturas y flujos de calor para el invierno del día seleccionado para Villahermosa. En general, se puede observar que la radiación tiene una cantidad importante de fluctuaciones (gráfica superior izquierda) lo cual se ve reflejado en las temperaturas. Al igual que en todos los casos con aislamiento térmico, se observa que al interior del edificio las temperaturas dependen de la temperatura interior en gran medida. Mientras que en el exterior se tienen disminuciones significativas al igual que en flujo de calor, al aplicar un color blanco se tienen temperaturas relativamente bajas.

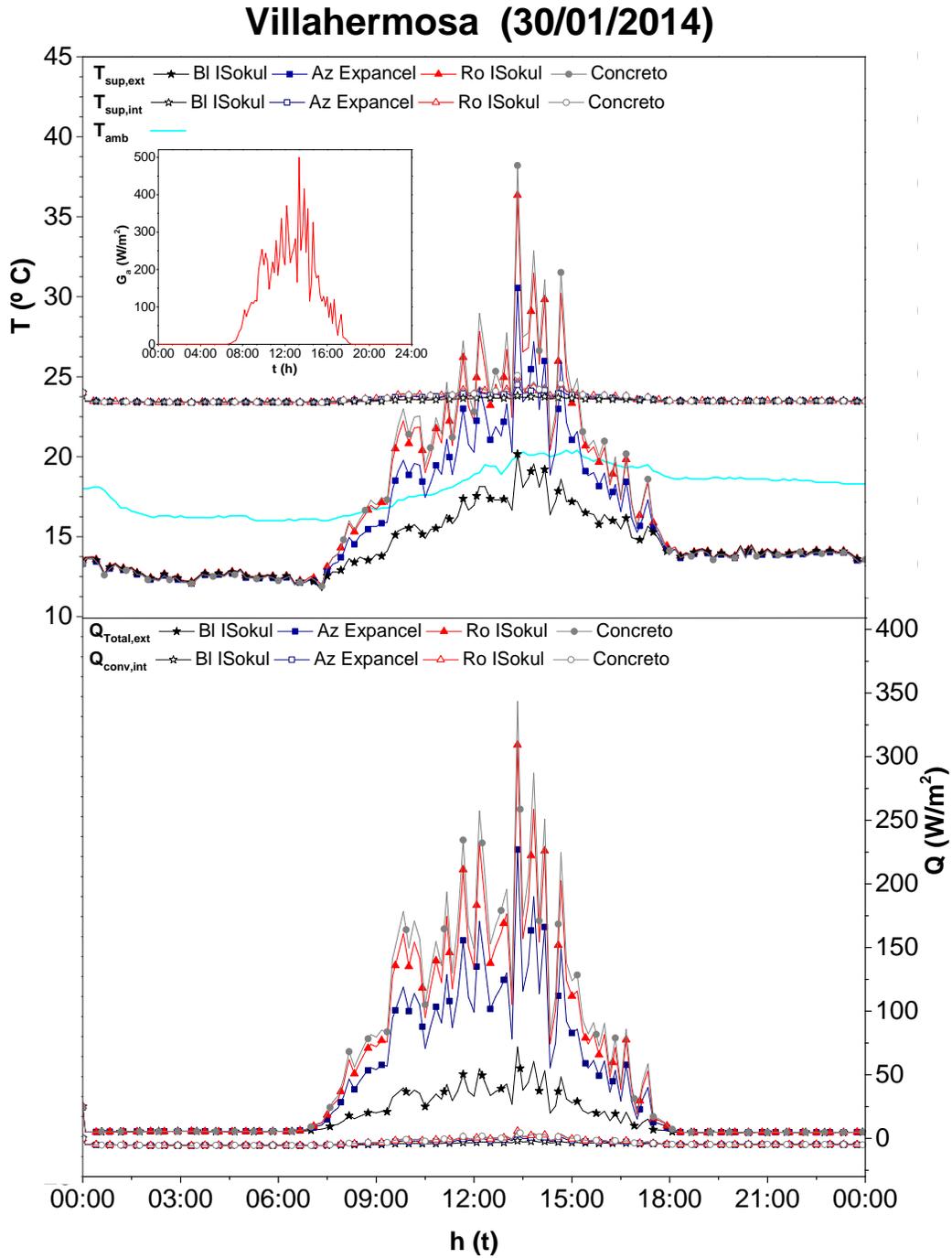


Figura 5.24: Temperatura y flujo de calor para el techo de concreto con y sin RR para el día 30 de enero del 2014.

En la Tabla 5.27 se muestran las temperaturas superficiales máximas así como el flujo de calor, para el techo con y sin RR. Como es de esperarse al interior se tienen temperaturas de confort para todos los casos, mientras que en el exterior se tienen reducciones de temperatura y flujo de calor máximos de 18.04 °C y 41.04 W/m<sup>2</sup>, respectivamente. Estas reducciones pueden ayudar a lograr disminuir el efecto de ICU sin comprometer las condiciones al interior del edificio y además adquirir los beneficios en verano.

Tabla 5.27: Temperaturas superficiales máximas y flujos de calor promedio para el techo con y sin RR para el día 30 de enero del 2014.

<b>Recubrimiento</b>	<b>T<sub>sext,max</sub></b> [°C]	<b>T<sub>sint,max</sub></b> [°C]	<b>Q<sub>Total,prom</sub></b> [W/m <sup>2</sup> ]	<b>Q<sub>cint,prom</sub></b> [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Bl ISokul</b>	20.16	23.80	15.13	-4.56
<b>Az Expancel</b>	30.55	24.47	38.61	-3.90
<b>Ro ISokul</b>	36.34	24.93	50.98	-3.48
<b>Concreto</b>	38.20	25.07	56.17	-3.41

### Mérida

En la Figura 5.25 se presentan las temperaturas y flujos de calor de Mérida en verano. La radiación de este clima presenta cuatro fluctuaciones importantes, producidas por factores externos (gráfico superior izquierdo). Se puede ver claramente reducciones importantes en temperaturas y flujos de calor al exterior, mientras que en el interior las variaciones son poco significativas.

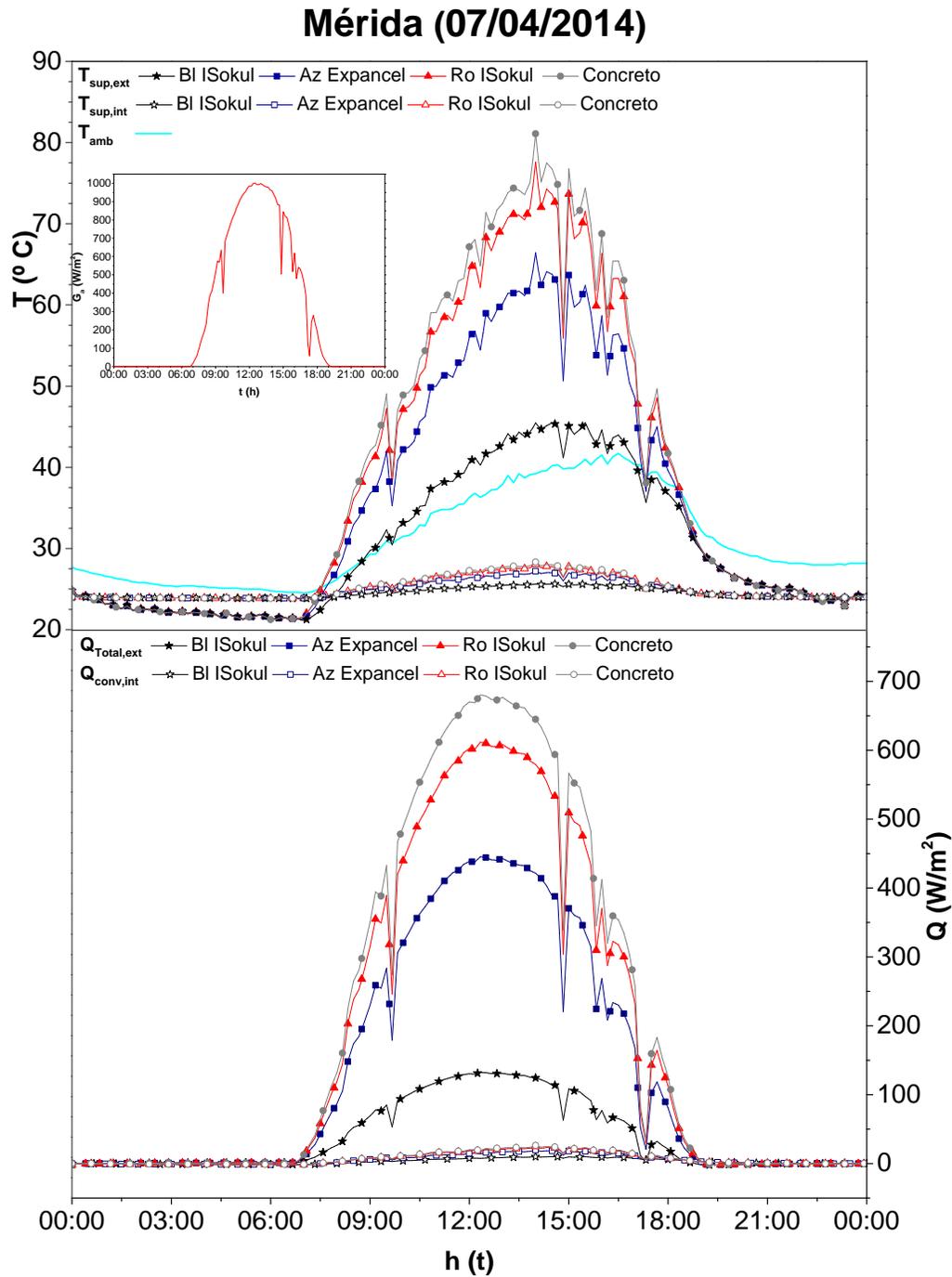


Figura 5.25: Temperatura y flujo de calor para el techo con y sin RR para el día 7 de abril del 2014.

En las Tablas 5.28 y 5.29 se presentan las temperaturas máximas y flujos de calor promedios para el día 7 de abril y 14 de enero del 2014, respectivamente. En general las temperaturas superficiales interiores tienen variaciones máximas para ambos días de hasta 1.45 °C del techo de concreto en verano en comparación con el de abril. Por lo tanto, las temperaturas al interior no se ven afectadas de manera considerable. En lo que respecta a los flujos de calor, se tienen reducciones importantes de la temperatura y flujo de calor al aplicar un RR blanco (Bl ISokul), sobre todo para el verano de hasta 35.59 °C y 161.38W/m<sup>2</sup>, respectivamente; en invierno de 32.30 °C y 99.08 W/m<sup>2</sup>.

Tabla 5.28: Temperaturas superficiales máximas y los flujos de calor promedio para el techo con y sin RR para el día 7 de abril del 2014.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{sint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Bl ISokul</b>	45.49	25.52	38.45	2.88
<b>Az Expanel</b>	66.43	27.21	131.10	5.20
<b>Ro ISokul</b>	77.60	28.05	180.19	6.49
<b>Concreto</b>	81.08	28.32	199.83	6.87

Tabla 5.29: Temperaturas superficiales máximas y los flujos de calor promedio para el techo con y sin RR para el día 17 de enero del 2014.

Recubrimiento	$T_{\text{sext,max}}$ [°C]	$T_{\text{sint,max}}$ [°C]	$Q_{\text{Total,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]	$Q_{\text{cint,prom}}$ [W/m <sup>2</sup> ]
<b>Bl ISokul</b>	29.64	24.42	30.88	-5.26
<b>Az Expanel</b>	47.99	25.81	87.50	-3.46
<b>Ro ISokul</b>	58.53	26.61	117.46	-2.41
<b>Concreto</b>	61.94	26.87	129.96	-2.14

En la Figura 5.26 se presentan los resultados del código numérico para las temperaturas y flujos de calor para el día 17 de enero del 2014. La radiación para este clima presente fluctuaciones importantes que se reflejan en el flujo de calor y temperaturas. En este clima la temperatura ambiente en invierno no es tan frío, como en otros casos.

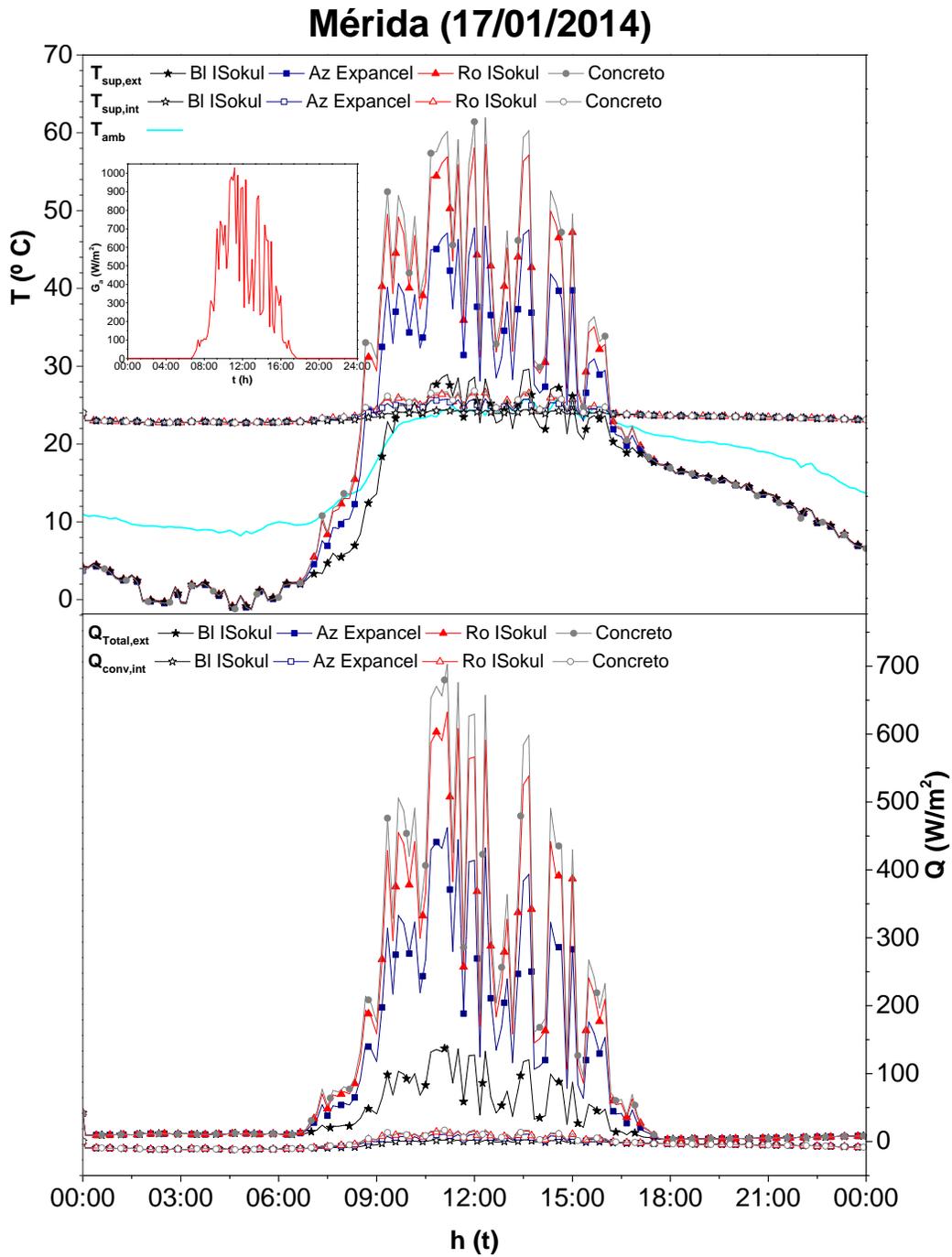


Figura 5.26: Temperatura y flujo de calor para el techo con y sin RR para el día 17 de enero del 2014.



# Capítulo 6

## Conclusiones

En este trabajo se realizó la medición de las propiedades superficiales de catorce recubrimientos reflectivos (RR) y para once de estos se midió su envejecimiento. Por otro lado se comparó el comportamiento térmico de dos configuraciones de un techo de concreto con y sin la aplicación de RR. Se evaluaron catorce RR en seis regiones climáticas representativas de la República Mexicana. Es un estudio pseudo-transitorio considerando conducción de calor en el techo para el día más cálido y frío de cada clima. El modelo matemático se resolvió con el método de volumen finito cada 5 minutos. De los resultados se llegaron a las siguientes conclusiones:

Se concluyó es importante medir la reflectancia y emisividad de los recubrimientos para elegir el RR más adecuado conforme a las condiciones climáticas, sobre todo porque en México se cuentan con pocas mediciones de los mismos reportadas. En lo que respecta al envejecimiento también es importante de considerar porque como se observó en un periodo de seis meses se tuvieron reducciones de máximas de hasta 22.5 % para el RR Thermotek color blanco; la reducción mínima fue de 9.75 % para el RR Fester. En cuanto a los RR de color las reducciones en la reflectancia a lo largo del tiempo son poco significativas.

Para climas cálidos como Mérida y Hermosillo es recomendable pintar el techo con un RR blanco, es una alternativa económica para reducir las ganancias de calor al interior del edificio. Por que los techos con RR blancos en estos climas fueron capaces de reducir la temperatura superficial hasta 28.41 °C al mediodía en comparación con el techo de concreto sin recubri-

miento. Además estos RR mantuvieron la temperatura superficial interior del techo entre 2 y 6 °C por encima de la temperatura del aire exterior durante las horas con mayor radiación solar. En lo que se refiere a la diferencia máxima de reducción de flujo de calor por esas dos configuraciones fue de 130.81 W/m<sup>2</sup> al exterior del techo. Por lo tanto, se consideró que pintar el techo puede ser más la técnica más económica para reducir las ganancias de energía en verano para esas ciudades.

Aparentemente la configuración del techo compuesto con el recubrimiento reflectivo es la mejor configuración en ciudades con climas cálidos como Hermosillo y Mérida porque tiene una mayor reducción en el flujo de calor que provienen del techo. Para climas templados como la Ciudad de México y Xalapa, aparentemente no es necesario utilizar recubrimiento reflectivo, sin embargo, utilizar un RR azul o agregando solo el aislamiento térmico podría ser buena alternativa con la finalidad de reducir las pérdidas de calor y contribuir a la reducción de la ICU.

En lo que respecta al techo compuesto aparentemente el aislamiento térmico no permite una transferencia de calor en verano ni en invierno desde el exterior al interior, todos los climas, para los diferentes RR tuvieron temperaturas interiores similares cercanas a la temperatura de control interior 24 °C. Esta alternativa podría ser efectiva para cualquier configuración, sin embargo sería necesario evaluar los costos en comparación con la aplicación de solo el RR.

## 6.1. Sugerencias a trabajos futuros

- Variar e identificar la relación adecuada de la  $T_{\text{sky}}$  con base en las condiciones climáticas y con la bóveda celeste con la finalidad de seleccionar la relación más adecuada para los diferentes climas, ya que esta variable puede ser analizada para cada clima en específico.
- Medir por un un tiempo más prolongado los RR, para observar el efecto de las condiciones climáticas.
- Analizar el efecto de los RR para diferentes configuraciones de techo.

- Variar el espesor del poliestireno y concreto para determinar una configuración más adecuada con base en las condiciones climáticas.
- Realizar corridas computacionales para el techo para cada mes del año, para elaborar un estudio más detallado del efecto de los recubrimientos a lo largo del tiempo en los climas representativos de la república mexicana, con la finalidad de determinar la configuración más adecuada para cada clima.
- El techo fue analizado como un componente, sin embargo se puede considerar la inercia térmica de todo el edificio para dar recomendaciones más viables. Este efecto puede ser analizado en trabajos futuros.
- Realizar corridas computacionales para otras ciudades de la República Mexicana.
- Medir la emisividad y reflectancia de otros recubrimientos reflectivos que no esten reportados en la literatura.
- Considerar el efecto de la rugosidad en el ensuciamiento de los materiales.
- Comparar estas mediciones con las realizadas en una maquina para medir el envejecimiento de los materiales.
- Realizar un estudio de los techos reflectivos con sus diferentes configuraciones de manera experimental.

Las sugerencias mencionadas anteriormente no se realizaron en el presente trabajo porque el realizarlas demanda mayor tiempo del establecido para la terminación del presente trabajo de tesis. Sin embargo se recomienda para continuar con el estudio más detallado de estos sistemas.



# Bibliografía

- [1] Lisa Gartland. *Heat Islands*. London Sterling, 2008.
- [2] Liliana Campos. Cubiertas y superficies reflectivas en México . Technical report, La Asociación de Empresas para el Ahorro de Energía en la Edificación (AEEAE), México, 2012.
- [3] OECD/IEA. *Key world energy statistics, Tech report, International Energy Agency, 9 rue de la Federation*, volume 75739. Paris Cedex 12, France, 2012.
- [4] Comisión Federal de Electricidad CFE. <http://www.cfe.gob.mx/QuienesSomos/estadisticas/Paginas/Clientes.aspx>, 2014. Recuperado el 07/05/2014.
- [5] V. Fuentes J. García H. Girón L. Guerrero S. Gutierrez N. Olivares H. Romero C. Romo. R. Lacomba, J.J. Ambriz y T. Aznar. *Arquitectura Solar y Sustentabilidad*. 2012.
- [6] Censos de Población y Vivienda 1970 a 2010 INEGI. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/tabuladosbasicos/default.aspx?c=27302s=est>, 2014. Recuperado el 08/06/2014.
- [7] N M Nahar, P Sharma, and M M Purohit. Performance of different passive techniques for cooling of buildings in arid regions. 38:109–116, 2003.
- [8] E.S. Cozza, M. Alloisio, a. Comite, G. Di Tanna, and S. Vicini. NIR-reflecting properties of new paints for energy-efficient buildings. *Solar Energy*, 116:108–116, June 2015.

- [9] United States Environmental Protection Agency. Archivo situacionista hispano. url<http://www.epa.gov/heatisland/>, 2014. Accedido 20-02-2014.
- [10] Lawrence Berkeley National Laboratory LBNL. [www.colormatters.com/color-and-science/color-and-energy-matters](http://www.colormatters.com/color-and-science/color-and-energy-matters), 2015. Recuperado el 08/08/2015.
- [11] I Hernández-pérez, G Álvarez, H Gilbert, J Xamán, Y Chávez, and B Shah. 2013 ISES Solar World Congress Thermal performance of a concrete cool roof under different climatic conditions of Mexico. *Energy Procedia*, 57, 2014.
- [12] H. Akbari, R. Levison, a. Comite, W. Miller, and P. Berdahl. Cool colored roofs to save energy and improve air quality. *LBNL*, 58265:108–116, 2005.
- [13] Pignatta Cotana y Franco Pisello, Castaldo. and cool pavement. 2014.
- [14] Bin-feng Yan, Soen-han Lee, and Yu-hsin Lin. Reflectance of Gray and White Compressed Concrete Paving Units with Different Surfaces. (1):31–35, 2015.
- [15] M. Doya E. Bozonnet and F. Allard. Cool roofs impact on building thermal response: A French case study. *Energy and Building*, (43):3006–3012, 2011.
- [16] C. Balaji. *Essentials of Radiation Heat Transfer*. 2014.
- [17] F. P. Incropera y D. P. DeWith. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. 1999.
- [18] Measuring Performance, Near Infrared Spectrophotom, Air Mass, Zero Solar, Irradiance Tables, Sheet Materials, and Using Sunlight. Standard Test Method for Solar Absorptance , Reflectance , and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres 1. 03:1–9, 1996.
- [19] Shimadzu Corporation. *Instruction Manual ISR-3100 UV-VIS-NIR Integrating Sphere Attachment for UV-3600/3100 Series*. London Sterling, 1997.

- 
- [20] Sitio web de Thermotek. [www.grupothermotek.com/?cat=8](http://www.grupothermotek.com/?cat=8); consultado el 18 de octubre de 2014.
- [21] Sitio web de Shimadzu. <http://www.shimadzu.com/an/spectro/uv/accessory/solid/sample/solid.html>; consultado el 20 de Noviembre de 2014.
- [22] Secretaria de Medio Ambiente. Guía de Ecotecnias, 2008.
- [23] ASTM C 1549. Standard Test Method for Determination of Solar Reflectance Near Ambient Temperature Using a Portable Solar Reflectometer 1. pages 4–7, 2005.
- [24] ASHRAE. *Fundamentals handbook SI*. 2001.
- [25] Payne UJ Chang KC. Analytical solution for heat conduction in two material layer slab with linerly temperature dependent conductivity. *Heat Transer*, (113):237–239, 1991.