

TESIS DOCTORAL

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.

Repercusión energética en el edificio.

Autor:

Jefferson Eloy Torres Quezada

Director: Helena Coch Roura

Co-director: Antonio Isalgué

Universidad Politécnica de Catalunya_UPC

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona_ETSAAB

Barcelona, Septiembre 2018

Agradecimientos

Esta tesis ha sido posible a la ayuda del gobierno del Ecuador a través de la beca de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación.

Quiero dar las gracias a todos quienes han formado parte de este camino de aprendizaje, a mis amigos (Elena, Jaume, Judit, Isabel, Anna, Yu), y por supuesto, a mi familia por su constante e incondicional apoyo.

Y especialmente a Helena Coch, Antonio Isalgué y Toshiharu Ikaga por enseñarme a ver los diferentes azules del cielo.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

RESUMEN

El eje central de esta tesis es el elemento arquitectónico CUBIERTA contextualizado en regiones con climas cálido húmedo cercanas al Ecuador. El aumento de la población urbana en el mundo se ha reflejado, en estas regiones, en una expansión horizontal de la ciudad, donde la tipología urbana predominante son las edificaciones de baja altura. Este hecho sumado a la alta y constante radiación solar determina que la cubierta es la principal fuente de ganancias de calor en el interior de las viviendas.

En las últimas décadas la Región Costa del Ecuador ha experimentado un cambio significativo en el uso de los materiales de cubiertas, con una tendencia general al aumento de las cubiertas pesadas de hormigón en detrimento de las cubiertas ligeras metálicas.

Existe una creencia general de que las cubiertas de hormigón, dadas sus características materiales, ofrecen mejores condiciones ambientales que las cubiertas metálicas, y por ende una menor demanda energética. Por lo tanto, el incremento del uso de las cubiertas pesadas de hormigón “parece tener” un propósito térmico. Sin embargo, estas cubiertas tienen un mayor costo de inversión para el usuario, y además, y muy importante, tienen una mayor energía incorporada.

En base a lo expuesto, el objetivo general de esta investigación es analizar y comparar el comportamiento térmico de estas dos cubiertas, a través de mediciones y simulaciones, con el fin de responder a la pregunta: ¿QUÉ TIPOLOGÍA DE CUBIERTA OFRECE UN MENOR SOBRECALENTAMIENTO DEL ESPACIO INTERIOR EN EL CLIMA DE ESTA REGIÓN, LA CUBIERTA LIGERA METÁLICA O LA CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN?

Tras las mediciones de las condiciones climáticas de esta región realizadas *in situ*, se ha determinado que la NUBOSIDAD DEL CIELO juega un papel fundamental en la cantidad y tipo de radiación solar recibida en las cubiertas, así como en la capacidad de enfriamiento del cielo.

En consecuencia, la nubosidad del cielo es el factor climático que tiene mayor influencia en desempeño térmico de las cubiertas en esta región. La consideración de dicho aspecto en el análisis energético de las cubiertas ha dado como resultado que variables que en otros climas tienen repercusión en el comportamiento térmico de las cubiertas, como la inclinación, la orientación o la resistencia térmica, puedan llegar a quedar anuladas en este clima.

Por otra parte, este análisis resalta la importancia que tienen las propiedades radiativas sobre la reducción de la temperatura superficial interior de las cubiertas analizadas, la emisividad al infrarrojo térmico en el caso de la cubierta ligera metálica y la reflectividad al visible para la cubierta pesada de hormigón.

La temperatura superficial interior de la cubierta ligera desciende más que la de la pesada durante el periodo nocturno pero, a pesar de lo que comúnmente se cree, durante el día la temperatura interior de la cubierta metálica mantiene un desempeño térmico casi igual al de la cubierta de hormigón, dado el incremento de reflectividad al visible y en especial al incremento de emisividad al infrarrojo térmico aportado por el uso de pinturas adecuadas.

Por lo tanto una cubierta ligera metálica con valores de emisividad al infrarrojo térmico y reflectividad al visible por arriba de 0.70 tiene un mejor desempeño térmico que la cubierta pesada de hormigón con las mismas propiedades radiativas y con una mayor resistencia térmica.

Palabras claves: Ecuador, cubierta metálica, cubierta de hormigón, emisividad y reflectividad.

ABSTRACT

The central scope of this thesis is the architectonic element THE ROOF within the context of regions with warm and humid climates near the equator. The constant population growth in the world has been reflected, in these regions, with a high horizontal expansion of the city, where the low height buildings are the most extended urban typology. This fact added to the high and constant solar radiation determines that the roof is the main source of heat gains inside the residential buildings.

In the last decades, the Coast Region of Ecuador has experienced a significant change in the use of roofing materials, with a general tendency to increase heavy concrete roofs to the detriment of light metal roofs.

There is a general belief that concrete roofs, given their material characteristics, offer better environmental conditions than metal roofs, and consequently a lower energy demand. Therefore, the increased use of heavy concrete roofs "seems to have" a thermal purpose. However, these covers have a higher investment cost for the user, and in addition, and very important, they have a higher embodied energy.

Based on the above, the general objective of this research is to analyse and compare the thermal behaviour of these two covers, through measurements and simulations, in order to answer the question: WHAT ROOF TYPOLOGY OFFERS A LOWER OVERHEATING OF THE INTERIOR SPACE IN THE CLIMATE OF THIS REGION, THE LIGHT METAL ROOF OR THE HEAVY CONCRETE ROOF?

After the measurements of the climatic conditions of this region made *in situ*, it has been determined that the CLOUDINESS plays a fundamental role in the amount and type of solar radiation received in the roofs, as well as in the cooling capacity of the sky.

Consequently, the cloudiness is the climatic factor that has the greatest influence on the thermal performance of the roofs in this region. The consideration of this aspect in the energy analysis of the roofs has resulted in variables that in other climates have a high impact on the roof thermal behaviour, such as inclination, orientation or thermal resistance, can be cancelled in this climate.

The interior surface temperature of the light metal roof drops more than that of the heavy one during the night period but, despite what is commonly believed, during the day the interior temperature of the metal roof maintains a thermal performance almost equal to the concrete roof, given the increase of reflectivity to the visible and in particular to the increase of thermal infrared emissivity contributed by the use of suitable paints.

Therefore a light metal roof with values of thermal infrared emissivity and visible reflectivity above 0.70 has a better thermal performance than the heavy concrete roof with the same radiative properties and with a higher thermal resistance.

Keywords: Ecuador, metal roof, concrete roof, emissivity y reflectivity.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

ÍNDICE

RESUMEN	5
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	13
<hr/>	
INTRODUCCIÓN	15
JUSTIFICACIÓN.....	17
OBJETIVOS	21
INTRODUCTION	23
<hr/>	
INTRODUCTION	25
JUSTIFICATION.....	27
OBJECTIVES.....	31
CAPITULO 1.	
LA CUBIERTA EN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO-ECUADOR	33
<hr/>	
1.1 LA REGIÓN COSTA DEL ECUADOR: CLIMA.....	37
1.2 LA REGIÓN COSTA DEL ECUADOR: CONTEXTO URBANO	44
1.3 EL CONSUMO ENERGÉTICO EN EL ECUADOR	46
1.4 EL IMPACTO DE LA CUBIERTA EN EL AMBIENTE INTERIOR.	49
1.5 LA CUBIERTA EN LA REGIÓN COSTA DEL ECUADOR	51
1.5.1 LAS NORMATIVAS O REGULACIONES TÉRMICAS.....	55
1.6 RESUMEN DEL CAPÍTULO	56

CAPITULO 2.

VARIABLES DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA CUBIERTA 57

2.1	COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA.....	60
2.2	VARIABLES DE LA CUBIERTA ORIENTADAS A LA REDUCCIÓN DEL CALENTAMIENTO INTERIOR: LITERATURA PREVIA	65
2.2.1	<i>INCLINACIÓN Y ORIENTACIÓN</i>	66
2.2.2	<i>PROPIEDADES RADIATIVAS: REFLECTIVIDAD Y EMISIVIDAD</i>	68
2.2.3	<i>MASA Y AISLAMIENTO</i>	78
2.2.4	<i>DOBLE CAPA</i>	84
2.3	RESUMEN DEL CAPÍTULO.....	91

CAPITULO 3.

CUBIERTA LIGERA METÁLICA Y CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN 93

3.1	DESCRIPCIÓN DE LA CUBIERTA LIGERA Y LA CUBIERTA PESADA.....	97
3.2	ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN	103
3.3	CONFIGURACIÓN DE LAS SIMULACIONES.....	105
3.3.1	<i>FACTORES CLIMÁTICOS</i>	106
3.3.2	<i>PARÁMETROS DE LA CUBIERTA</i>	116
3.4	VALIDACIÓN DE LA SIMULACIONES	125
3.5	RESUMEN DEL CAPÍTULO.....	129

CAPITULO 4.

RESULTADOS 131

4.1	RESULTADOS BASE DE LA CUBIERTA LIGERA Y LA CUBIERTA PESADA.....	134
4.2	INFLUENCIA DE LAS VARIABLES SOBRE LA CUBIERTA LIGERA Y LA CUBIERTA PESADA ...	139
4.2.1	<i>INCLINACIÓN Y ORIENTACIÓN</i>	139
4.2.2	<i>REFLECTIVIDAD AL VISIBLE</i>	144
4.2.3	<i>EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO</i>	148
4.2.4	<i>DOBLE CAPA</i>	151
4.2.5	<i>RESULTADOS GENERALES</i>	155
4.3	COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE LA CL Y CP	160
4.3.1	<i>PARAMETRIZACIÓN DE LA REFLECTIVIDAD Y DE LA EMISIVIDAD</i>	164
4.3.2	<i>DESEMPEÑO TÉRMICO DE LAS MUESTRAS MEDIDAS DE LA CL Y LA CP</i>	170
4.4	SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS	176

CAPITULO 5.
CONCLUSIONES **181**

5.1 CONCLUSIONES FINALES	184
5.2 INVESTIGACIONES FUTURAS.	186

CHAPTER 5.
CONCLUSIONS **187**

5.3 FINAL CONCLUSIONS	190
5.4 FUTURE INVESTIGATIONS.....	192

ANEXOS **193**

ANEXO 1: <u>LA CUBIERTA EN ECUADOR</u>	195
A1.1 <i>LA CUBIERTA EN EL CONTEXTO URBANO DE ECUADOR</i>	197
A1.2 <i>CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS Y ENERGÉTICAS DE LA CL Y LA CP</i>	200
ANEXO 2: <u>MEDICIONES</u>	205
A2.1 <i>FACTORES CLIMÁTICOS</i>	207
A2.2 <i>PARÁMETROS DE LA CUBIERTA</i>	232
A2.3 <i>REGISTRO FOTOGRÁFICO</i>	262
A2.4 <i>INSTRUMENTACIÓN</i>	268
ANEXO 3: <u>SIMULACIONES</u>	277
A3.1 <i>SOFTWARE DE SIMULACIÓN: Design Builder & Energy Plus</i>	279
A3.2 <i>VALIDACIÓN DE LAS SIMULACIONES</i>	287
ANEXO 4: <u>RESULTADOS</u>	299
A4.1 <i>RESULTADOS BASE CL Y CP</i>	301
A4.2 <i>INCLINACIÓN Y ORIENTACIÓN</i>	304
A4.3 <i>REFLECTIVIDAD AL VISIBLE</i>	316
A4.4 <i>EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO</i>	318
A4.5 <i>DOBLE CAPA</i>	320

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	323
LISTA DE FIGURAS	335
LISTA DE TABLAS	343

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

INTRODUCCIÓN



COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

INTRODUCCIÓN

Desde los inicios de la arquitectura, la envolvente y todos sus elementos han tenido como objetivo primordial la protección del usuario, en especial de las inclemencias climáticas de su entorno. Con este propósito, la envolvente ha estado condicionada de manera primordial por el clima donde se emplaza.

Este vínculo entre arquitectura y clima se hace evidente en las tipologías de edificaciones y morfologías urbanas vernáculas de cada región. Los sistemas constructivos, morfología, implantación de las viviendas y hasta de las mismas ciudades de la arquitectura popular responden a sus propias condicionantes climáticas [Coch and Serra, 1995][Coch, 1998][Kumar, Mahapatra and Atreya, 2009] [Beckers, 2012] [Tong *et al.*, 2014].

Uno de los elementos arquitectónicos que en gran medida ha estado influenciado por los factores climáticos de cada región es **LA CUBIERTA** [Konya, Swanepoel and Fontes, 1981].

Este elemento se define como la superficie de la envolvente del edificio que cubre la parte superior de esta, y su objetivo principal es la protección de las inclemencias climáticas como la lluvia o la nieve, así como de otros factores de igual o mayor importancia como los vientos y la radiación solar [Whitney and Smith, 1901].

La relación de la cubierta con estos factores climáticos ha sido esencial para definir su morfología y materialidad en cada región. De manera que, las características de las cubiertas pueden variar enormemente en función de su situación geográfica [Golany, 1996] , **Figura 1**.

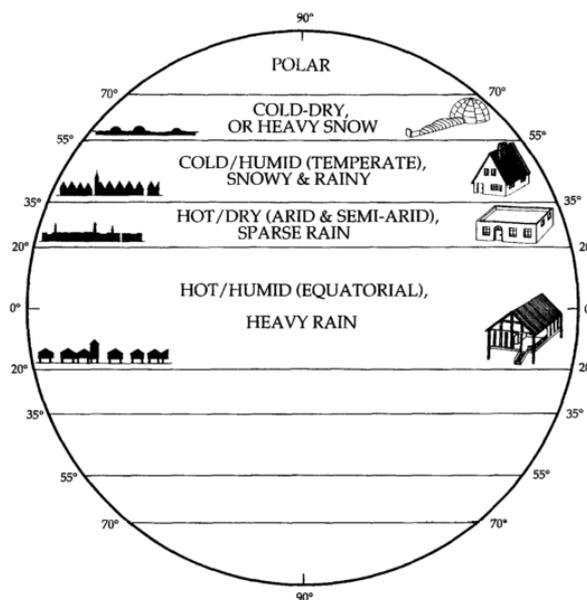


Figura 1 Tipologías de cubiertas y edificaciones de la arquitectura popular de acuerdo a la latitud.
Imagen tomada de [Golany, 1996]

Las zonas de LATITUD 0° o cercanas al ecuador están caracterizadas por los climas cálido-húmedos. Aquí predominan las cubiertas inclinadas, con el propósito de desahogar el agua de lluvia y ralentizar el viento para aprovechar las pérdidas por convección.

Las LATITUDES MEDIAS cercanas a los trópicos se dividen en clima cálido-húmedo (las zonas cercanas al mar) y en clima cálido-árido (zonas en el continente). En los trópicos húmedos, se repiten las cubiertas inclinadas con aleros extendidos, para proteger a las ventanas de la radiación. En cambio, en los trópicos secos, donde se extienden la mayoría de los desiertos, se distinguen las cubiertas pesadas planas para resistir la gran radiación solar y la amplia oscilación diaria de temperatura. Otras cubiertas típicas en estas regiones son las cúpulas, que al ofrecer una mayor superficie tienen un mayor intercambio de calor con el cielo.

EN LATITUDES ALTAS, donde es usual la nieve, se repiten las cubiertas inclinadas pero con una inclinación mayor al 60% [Koenigsberger *et al.*, 1975] [Konya, Swanepoel and Fontes, 1981] [Beckers, 2012]

De igual manera, los parámetros de forma y material de la cubierta han sido condicionados en gran medida por los recursos disponibles de cada zona. No obstante, estos recursos a su vez dependen de las características climáticas de cada región.

En esencia, la arquitectura en general, de manera conjunta con los parámetros morfológicos y de materiales que la definen, nace como una respuesta a las preexistencias climáticas del lugar o la región donde se emplazan; y por tanto, el vínculo entre ARQUITECTURA-CLIMA resulta esencial en el arte proyectar.

No obstante, estudios muestran que sólo hasta final del siglo XIX las tipologías de los edificios han sido guiadas primordialmente por el clima local y la búsqueda de protección o confort del usuario [Dollfus, 1954].

El avance de los procesos de construcción y la tecnología del siglo XX, como el concreto, el metal, sistemas de refrigeración, el elevador, el vidrio, han llevado a la globalización de la arquitectura. Los mismos procesos y tecnologías son usados para todos los climas, mientras que el confort de las personas se asegura por el uso de sistemas activos energéticos, lo que ha tenido un gran impacto sobre la demanda energética del edificio.

La ruptura de esta relación no sólo ha tenido consecuencias a nivel energético, sino también a nivel climático, económico y de salud; esto ha repercutido a diferentes escalas, desde los usuarios de las viviendas hasta los gobiernos locales y globales.

JUSTIFICACIÓN.

En climas con alta radiación solar, en especial en lugares cercanos a la latitud 0° donde los rayos solares son muy perpendiculares al plano horizontal durante todo el año, **la CUBIERTA** es la superficie de la envolvente más expuesta a este flujo [Atkinson, 1950] [Koenigsberger *et al.*, 1975] [Edmonds and Greenup, 2002].

Con frecuencia el flujo de calor a través de las superficies opacas es considerado como pérdidas para la edificación. Sin embargo, las altas temperaturas y la alta radiación solar en regiones de latitudes bajas repercuten en gran medida sobre la dirección de este flujo, convirtiéndose en una ganancia hacia el interior del espacio.

La influencia de este elemento sobre las condiciones interiores puede intensificarse o disminuir dependiendo de las características urbanas de la ciudad donde se sitúe. El constante y apresurado crecimiento de la población urbana mundial en las últimas décadas [United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2015], ha traído como consecuencia que la demanda residencial de las ciudades se incremente sustancialmente. Lo que a su vez ha repercutido en el incremento del consumo energético de los edificios, especialmente en los países en vías de desarrollo [Levine *et al.*, 2007] [Liu, Meyer and Hogan, 2010].

Con esta necesidad, las grandes urbes han afrontado este fenómeno a través de diferentes estrategias urbanas. Por un lado, varias regiones han optado por densificar su territorio a través del crecimiento vertical, resultando en lo que se conoce como *Ciudad Compacta*, donde predomina la edificación en altura [Downs A, 1999].

Por el contrario, otras regiones han satisfecho estos requerimientos urbanos a través de la expansión horizontal de su territorio. Esto ha dado como resultado las ciudades dispersas o el llamado *Urban Sprawl*, donde la edificación de baja altura es la tipología urbana predominante [Downs A, 1999] [Arellano and Roca, 2015].

Bajo este contexto, la cubierta tiene un impacto más relevante en las ciudades dispersas que en las ciudades compactas, tanto a nivel de edificio como a nivel urbano [Stone, Hess and Frumkin, 2010].

El crecimiento horizontal de las ciudades o *Urban Sprawl* se puede relacionar como un modelo de ciudad americano, y con urbes de países en desarrollo. De acuerdo con [United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2015], desde 1950 hasta 2014 los países de Latinoamérica y el Caribe son las regiones que han experimentado el mayor crecimiento de población urbana, **Figura 2**.

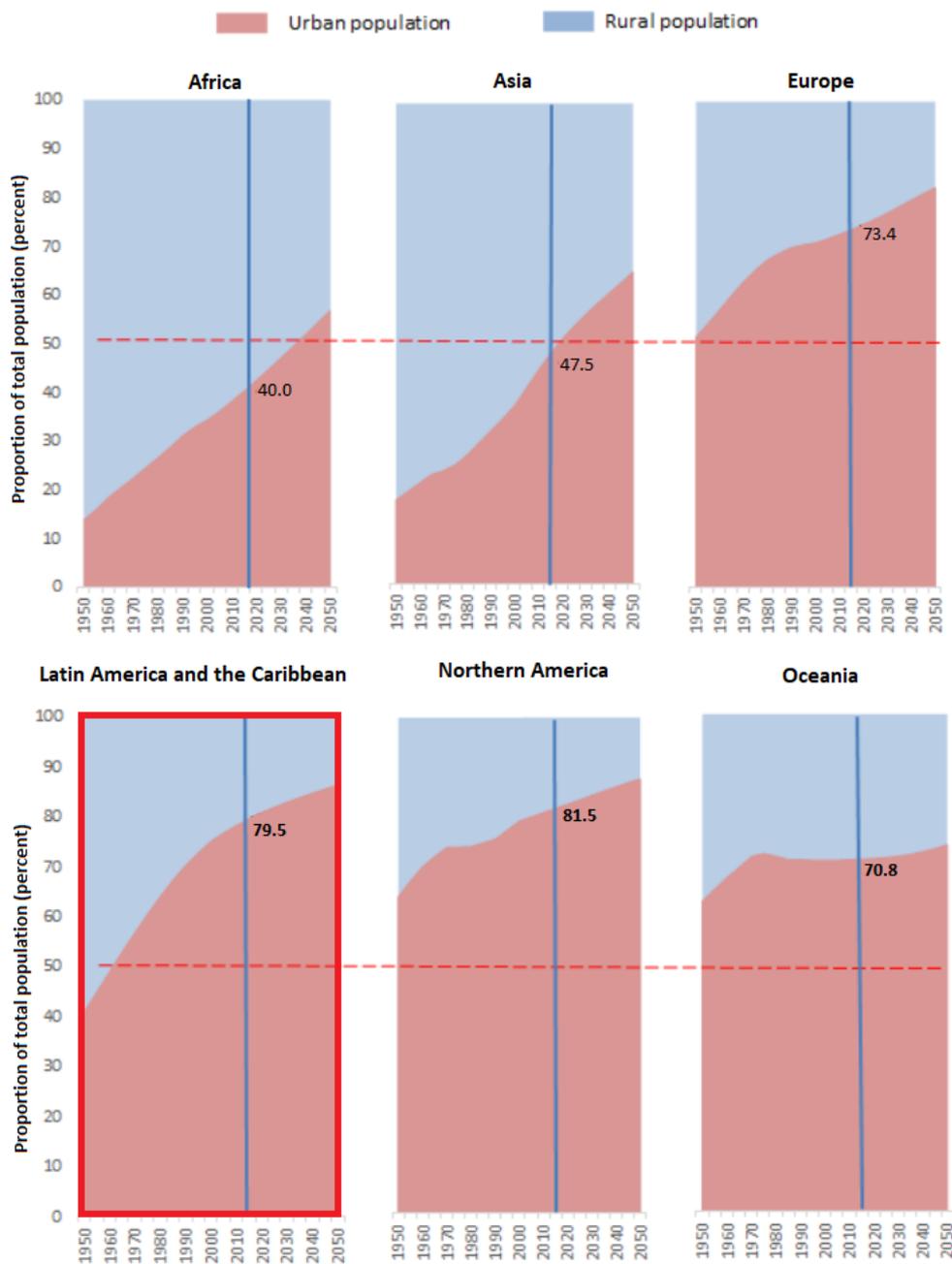


Figura 2 Urban and rural population as a proportion of total population, by major area, 1950-2050. Imagen obtenida de [United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2015]

La gran parte de los países de estas regiones se caracterizan por sus climas cálidos, y principalmente por su alta radiación solar debido a su ubicación geográfica (cercasas al Ecuador).

En consecuencia, **la suma de estos dos condicionantes, los factores climáticos y las características urbanas de las regiones de latitudes bajas, determinan la relevancia de la cubierta sobre el comportamiento térmico interior de los edificios.**

En un país como Ecuador, donde la mayoría de las ciudades se enmarcan dentro de este contexto climático y urbano, el estudio de estrategias enfocadas a mejorar el comportamiento térmico de la cubierta será determinante para reducir el sobrecalentamiento interior en las edificaciones de este país.

De acuerdo con el reporte IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) las emisiones de CO₂ de los edificios alcanzará los 16 Gt para el 2030, principalmente como resultado del incremento del consumo energético de los países en desarrollo, [Levine *et al.*, 2007].

En estos países, la principal fuente de producción de energía proviene de combustibles fósiles [Derpetrossian and Johansson, 2001], tal es el caso de Ecuador, donde la mayor parte de la energía producida deriva del petróleo y más del 50% del consumo es importada [MCSE, 2015].

Uno de los principales responsables del consumo de esta energía es el sector residencial [ARCONEL, 2014], y de acuerdo con varios estudios, la principal fuente de consumo energético en estos climas son los sistemas de refrigeración activos [Bertoldi and Atanasiu, 2009][Jayasinghe, Attalage and Jayawardena, 2003][Kua and Wong, 2012].

Por lo tanto, las estrategias aplicadas a reducir el sobrecalentamiento de la cubierta tienen un gran impacto en el confort del usuario y además, en consecuencia, en la reducción de la demanda energética de las viviendas.

Por último, tras la globalización de materiales y la inserción de nuevas tecnologías, en Ecuador el uso de materiales naturales y propios de las zonas se ha descartado casi en su totalidad, en especial en las áreas urbanas.

Desde varias décadas atrás, la tipología de cubierta más utilizada en este país ha sido la **CUBIERTA METÁLICA**, al igual que en otros países de estas regiones como: Indonesia [Lauber *et al.*, 2005], Malasia [Allen, Elias and Lim, 2008], República Dominicana [Oficina Nacional de Estadística (ONE), 2010], Costa Rica [INEC, 2011], etc.

Aunque en regiones con climas cálidos húmedos, los materiales ligeros destacan como los más usados, en Ecuador se han popularizado los materiales de mayor masa y resistencia térmica, como el uso de la **CUBIERTA DE LOSA DE HORMIGÓN**.

El costo de construcción de la Cubierta de losa de hormigón es mucho más alto que otras técnicas o materiales como las cubiertas metálicas, sin embargo, el uso de esta cubierta presenta la mayor tasa de crecimiento, 400%, en los últimos 20 años. Lo que en la actualidad la ha convertido en la segunda cubierta más utilizada en este país [INEC, 1990][INEC, 2010].

Existe una creencia general que la cubierta de losa de hormigón por su espesor y mayor resistencia térmica restringe más el paso del calor, y por lo tanto ofrece mejores condiciones ambientales que la cubierta metálica.

Conforme a esto, el incremento de las cubiertas pesadas de hormigón en esta región “parece tener” un PROPÓSITO TÉRMICO: reducir el flujo de calor hacia el interior. No obstante, para evaluar el desempeño de estas cubiertas en esta región es indispensable considerar varios aspectos térmicos más, a parte de la resistencia térmica.

En base a todo lo expuesto, surgen varios cuestionamientos que esta investigación pretende abordar. En primer lugar ¿Cuál de estas dos cubiertas, la Cubierta Metálica o Cubierta de losa de hormigón tiene un mejor desempeño térmico en este clima? ¿Qué estrategias se pueden aplicar para reducir el sobrecalentamiento de cada cubierta?

En conclusión, la presente tesis doctoral se enmarca en el análisis del funcionamiento térmico de la cubierta en las regiones con un clima cálido-húmedo, de manera específica en el Ecuador caracterizado por su alta y constante radiación solar a lo largo del año.

Este estudio pretende, por un lado, analizar los sistemas de cubierta más adecuados al clima del Ecuador, y por otro lado mostrar estrategias aplicables a dichas cubiertas. El propósito es evitar el sobrecalentamiento interior de las viviendas de esta región.

Esta investigación, además de proveer una mejora a nivel del confort de los usuarios de los edificios, tiene una repercusión a nivel energético por lo que permite reducir la demanda. Esto, en última instancia, supone una aportación positiva en los ámbitos ecológico y económico del país.

OBJETIVOS

La presente investigación se centra en el comportamiento térmico de las dos tipologías de cubiertas más utilizadas en la región costa del Ecuador: LA CUBIERTA LIGERA METÁLICA y LA CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN. El objetivo general de esta tesis es:

DETERMINAR QUÉ TIPOLOGÍA DE CUBIERTA TIENE UN MEJOR DESEMPEÑO TÉRMICO EN EL CLIMA DE LA REGIÓN COSTA DEL ECUADOR, LA LIGERA METÁLICA O LA PESADA DE HORMIGÓN.

Dentro de este objetivo general se enmarcan dos objetivos específicos de esta tesis:

- En primer lugar, analizar y definir las **preexistencias climáticas** más influyentes en el comportamiento térmico de la cubierta en esta región.
- Por último, este estudio se plantea determinar **los parámetros de diseño** de la cubierta (morfológico o material) con mayor influencia sobre la reducción del calentamiento de este elemento, y por ende sobre el confort interior.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

INTRODUCTION



COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

INTRODUCTION

Since the beginning of architecture, the envelope and all its elements have had as their main objective the protection of the user, especially the inclement weather of their environment. For this purpose, the envelope has been conditioned primarily by the climate where it is located.

This bond between architecture and climate is evident in the typologies of buildings and urban vernacular morphologies of each region. The constructive systems, morphology, implantation of houses and even of the cities of popular architecture respond to their own climatic conditions [Coch and Serra, 1995][Coch, 1998][Kumar, Mahapatra and Atreya, 2009] [Beckers, 2012] [Tong *et al.*, 2014].

One of the architectural elements that has been influenced to a large extent by the climatic factors of each region is **THE ROOF** [Konya, Swanepoel and Fontes, 1981].

This element is defined as the surface of the building envelope that covers the upper part of it, and its main objective is the protection of inclement weather such as rain or snow, as well as other factors of equal or greater importance such as winds and solar radiation [Whitney and Smith, 1901].

The relationship of the roof with these climatic factors has been essential to define its morphology and materiality in each region. So, the characteristics of this element can vary largely depending on their geographical situation [Golany, 1996] , **Figure 1**.

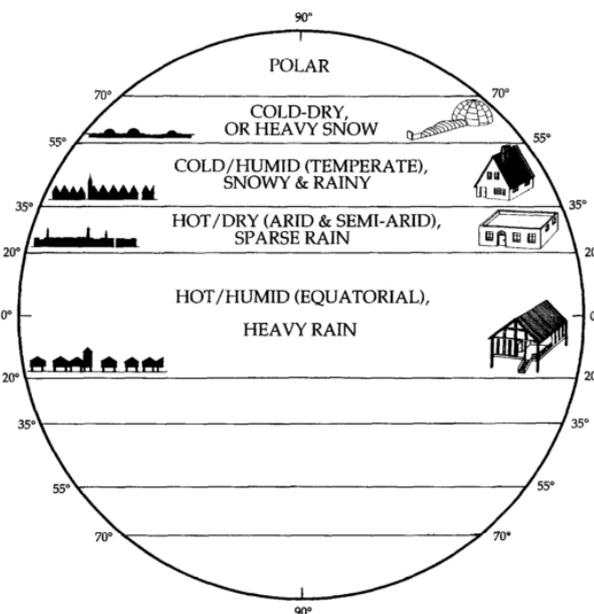


Figure 1 Roofs and buildings typologies of popular architecture according to the latitude.
Image retrieved from [Golany, 1996]

The LATITUDE 0 ° zones or near the Equator are characterized by warm-humid climates. In these zones, the sloped roofs are the typology predominant, with the purpose of venting rainwater and slowing the wind to take advantage of convection losses.

MIDDLE LATITUDES near the tropics are divided into warm-humid climate (areas near the sea) and warm-arid climate (areas on the continent). In the humid tropics, sloped roofs with extended eaves are repeated, to protect the windows from radiation. On the other hand, in the dry tropics, where most of the deserts extend, flat heavy roofs are distinguished, to resist the great solar radiation and the wide daily oscillation of temperature. Other typical roofs in these regions are the domes, having a greater surface area have a greater heat exchange with the sky.

IN HIGH LATITUDES, where snow is usual, the sloped roofs are repeated but with an inclination greater than 60% [Koenigsberger *et al.*, 1975] [Konya, Swanepoel and Fontes, 1981] [Beckers, 2012]

Similarly, the shape and material parameters of the roof have been conditioned to a large extent by the resources available in each area, however, these resources in turn depend on the climatic characteristics of each region.

In essence, the architecture in general, together with the morphological parameters and materials that define it, was born as a response to the climatic pre-existences of the place or region where they are located; and therefore, the link between ARCHITECTURE-CLIMATE is essential in the art project.

However, studies show that only until the end of the 19th century did the typologies of the buildings have been guided primarily by the local climate and the search for user protection or comfort [Dollfus, 1954].

The progress of construction processes and twentieth century technology, such as concrete, metal, cooling systems, the elevator, glass, have led to the architecture globalization. The same processes and technologies are used for all climates, while the comfort of people is ensured by the use of active energy systems, which has had a great impact on the energy demand of the building.

The breakdown of this relationship has not only had consequences at the energy level, but also at the climatic, economic and health levels; what has impacted at different scales: from the user of a house to local and global governments.

JUSTIFICATION.

In climates with high solar radiation, especially in regions close to latitude 0 ° where the sun's rays are very perpendicular throughout the year, **the ROOF** is the surface of the building envelope most exposed to this flux [Atkinson, 1950] [Koenigsberger *et al.*, 1975] [Edmonds and Greenup, 2002].

Frequently heat flux through opaque surfaces is considered as losses for buildings. However, high temperatures and high solar radiation in low latitudes regions greatly affect the direction of this flux, becoming gains into the interior of space.

The influence of this element on the interior conditions can intensify or decrease depending on the urban characteristics of the city where it is located. The constant and hasty growth of the world urban population in recent decades [United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2015], has brought as a consequence that the residential demand of the cities increases substantially. This, in turn, has had an impact on the increase in energy consumption of buildings, especially in developing countries [Levine *et al.*, 2007] [Liu, Meyer and Hogan, 2010].

With this need, large cities have faced this phenomenon through different urban strategies. On the one hand, several regions have opted to densify their territory through vertical growth, resulting in what is known as *Compact City*, where high-rise buildings predominates. [Downs A, 1999].

On the contrary, other regions have met these urban requirements through the horizontal expansion of their territory. This has resulted in dispersed cities or the so-called *Urban Sprawl*, where low-rise constructions is the predominant urban typology [Downs A, 1999][Arellano and Roca, 2015].

In this context, the roof is most impact on dispersed cities than on compact cities, both at the building level and at the urban level [Stone, Hess and Frumkin, 2010].

The horizontal growth of cities or Urban Sprawl can be related as a model of American city, and with cities of developing countries. According to [United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2015], from 1950 to 2014, the countries of Latin America and the Caribbean are the regions that have experienced the greatest growth in urban population, **Figure 2**.

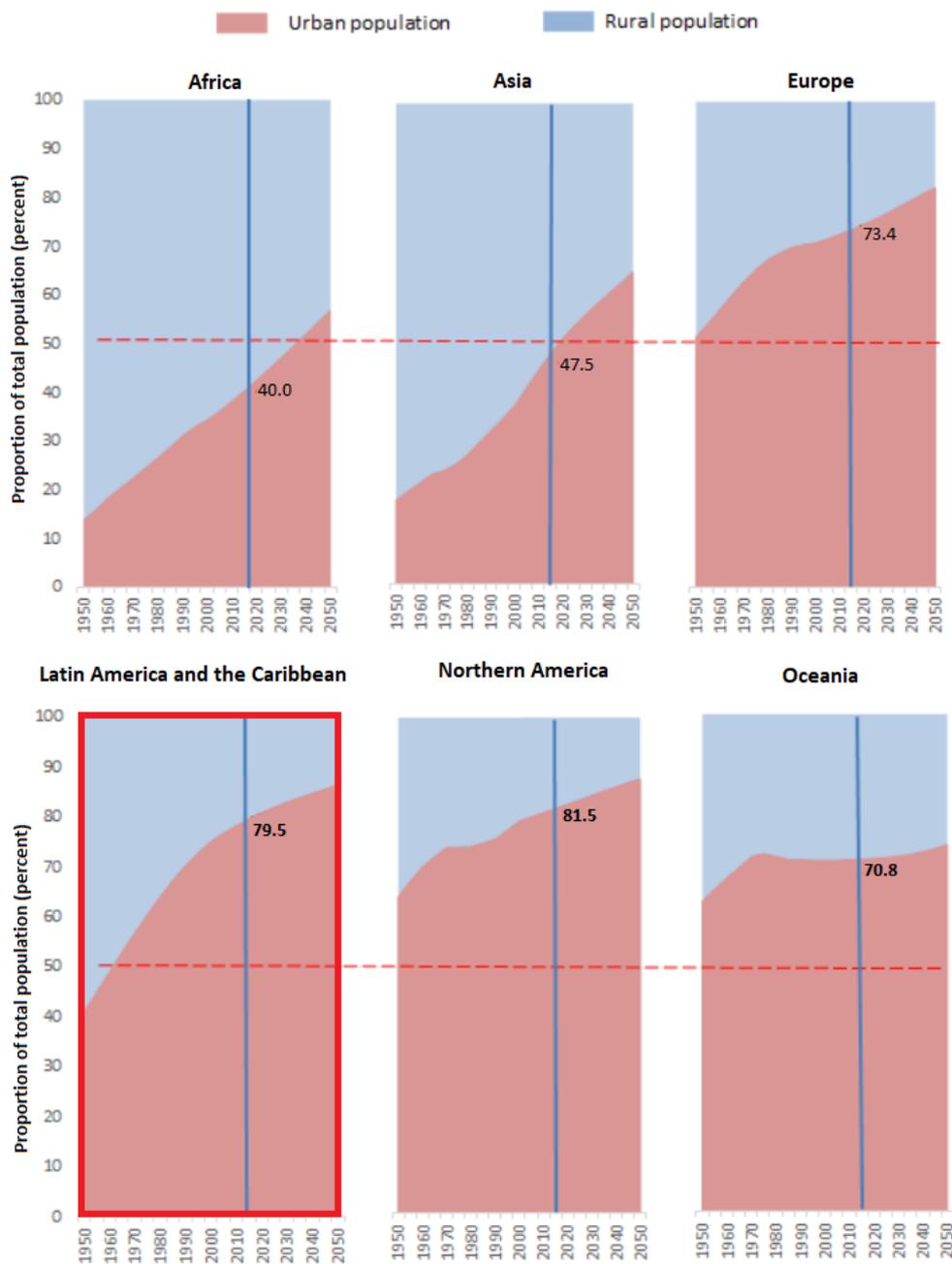


Figure 2 Urban and rural population as a proportion of total population, by major area, 1950-2050. Image retrieved from [United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2015]

The great part of the countries of these regions are characterized by their warm climates, and mainly by their high solar radiation due to their geographical location (near the Equator).

Consequently, **the sum of these two conditions, the climatic factors and the urban characteristics of the low latitudes regions, determine the relevance of the roof on the thermal behaviour inside the buildings.**

In a country like Ecuador, where most of the cities are framed within this climate and urban context, the study of strategies focused on improving the thermal behavior of the roof will be decisive to reduce the internal overheating in the buildings of this country.

According to the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) report, CO₂ emissions from buildings will reach 16 Gt by 2030, mainly as a result of the increase in energy consumption in developing countries, [Levine *et al.*, 2007].

In these countries, the main source of energy production comes from fossil fuels [Der-petrossian and Johansson, 2001], such as Ecuador, where most of the energy produced is derived from oil and more than 50% of the consumption is imported. [MCSE, 2015].

One of the main responsible for the consumption of this energy is the residential sector [ARCONEL, 2014], and according to several studies, the main source of energy consumption in these climates are active cooling systems [Bertoldi and Atanasiu, 2009] [Jayasinghe, Attalage and Jayawardena, 2003] [Kua and Wong, 2012].

Therefore, the strategies applied to reduce overheating of the roof, not only have a great impact on user comfort but also in reducing the energy demand of houses. This energy reduction can be reflected not only at the user level but at the country level, which in turn can bring benefits in the ecological and economic field of Ecuador.

Finally, after the globalization of materials and the insertion of new technologies, in Ecuador the use of natural materials and those of the zones has been discarded almost in its entirety.

Since several decades ago, the roof typology most used in this country has been the **METAL ROOF**, as in other countries of these regions such as: Indonesia [Lauber *et al.*, 2005], Malaysia [Allen, Elias and Lim, 2008], Dominican Republic [Oficina Nacional de Estadística (ONE), 2010], Costa Rica [INEC, 2011], etc.

Although in regions with warm and humid climates light materials stand out as the most used, in Ecuador materials of greater mass and thermal resistance have been popularized, such as the use of **CONCRETE SLAB ROOF**.

The construction cost of the concrete slab roof is much higher than other techniques or materials such as metal roofs, however, the use of this roof has the highest growth rate, 400%, in the last 20 years. What currently has become the second most used cover in this country [INEC, 1990][INEC, 2010].

There is a general belief that the concrete slab roof due to its thickness and higher thermal resistance restricts more the passage of heat, and therefore offers better environmental conditions than the metal roof.

According to this, the increase of the heavy concrete roofs in this region "seems to have" a **THERMAL PURPOSE**: to reduce the flux of heat towards the interior. However, to evaluate the performance of these roofs in this region it is essential to consider another thermal aspects, apart from the thermal resistance.

Based on the above, several questions arise that this research aims to address: which of these two roofs has the better thermal performance in this climate, the METAL ROOF or the CONCRETE ROOF? What strategies can be applied to reduce the overheating of each roof?

In conclusion, the present doctoral thesis is part of the analysis of thermal performance of the roof in regions with a hot and humid climate, specifically in Ecuador characterized by its high and constant solar radiation throughout the year.

This study intends, on the one hand, to analyse the roof systems most suited to the climate of Ecuador, and on the other hand to show strategies applicable to these roofs. The purpose is to avoid the internal overheating of the houses in this region.

This research, in addition to providing an improvement to the level of comfort of the users of the buildings, has an impact at the energy level so it allows to reduce the demand. This, in the last analysis, supposes a positive contribution in the ecological and economic fields of the country.

OBJECTIVES

This research focuses on the thermal behaviour of the two types of roofs most used in the Coast Region of Ecuador: THE LIGHT METAL ROOF and the HEAVY CONCRETE ROOF. The general objective of this thesis is:

TO DETERMINE WHAT ROOF TIPOLOGY HAS A BETTER THERMAL PERFORMANCE IN THE CLIMATE OF THE COAST REGION OF ECUADOR, THE LIGHT METAL ROOF OR THE HEAVY CONCRETE ROOF.

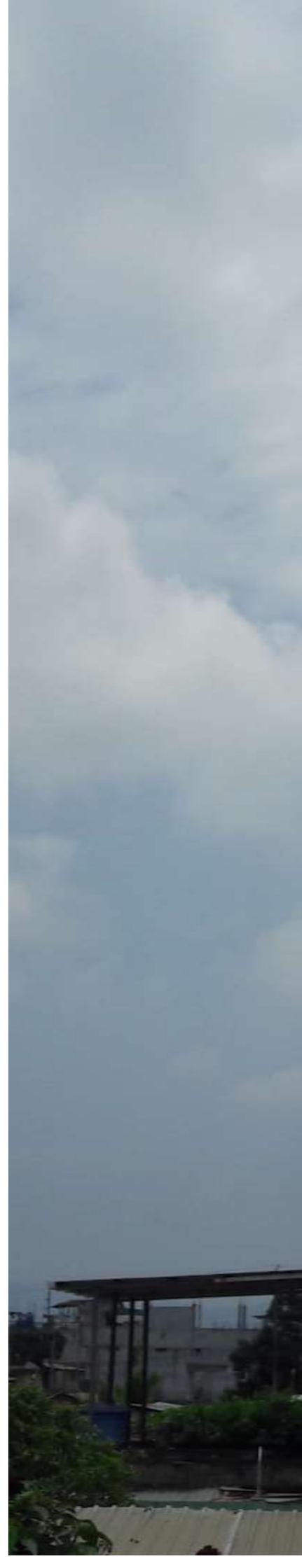
Within this general objective are framed two specific objectives of this thesis:

- First, analyse and define the most influential **climatic pre-existences** in the thermal behaviour of the roof in this region.
- Finally, this study aims to determine **the design parameters of the roof** (morphological or material) with greater influence on the reduction of the overheating of this element, and therefore on the interior comfort.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

Capítulo 1

LA CUBIERTA EN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO-ECUADOR



COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

Ecuador es un país de América del Sur ubicado en la costa del Océano Pacífico, y atravesado por la Línea Ecuatorial o el paralelo 0°, **Figura 3**. Cuenta con una superficie territorial de 283.561 km² y una población de 16 millones de habitantes aproximadamente.

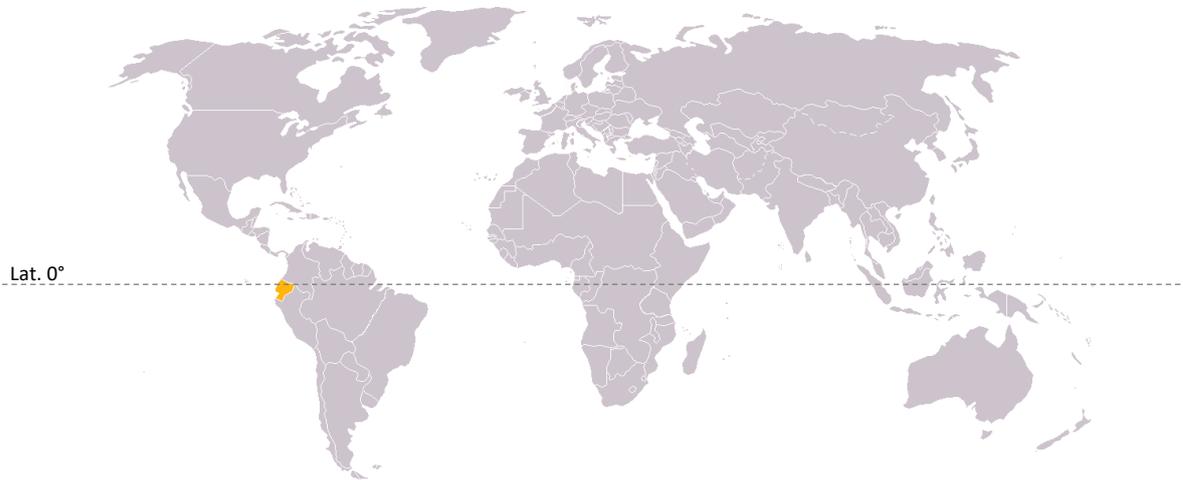


Figura 3 Ubicación del Ecuador (sombreado Amarillo) en el mapa mundial.

Debido a su ubicación geográfica, latitud 0°, todo su territorio podría tener un clima uniformemente cálido, sin embargo debido a otros factores, principalmente por estar atravesado por la cordillera de los Andes, posee toda una gama de climas desde cálido húmedo de la costa, hasta el frío intenso de las montañas. A causa de esta diversidad de microclimas, el Ecuador es un país multiétnico y pluricultural dentro de un territorio relativamente pequeño.

En términos generales se definen 4 regiones naturales: la Costa, la Sierra, la Amazonía y la Región Insular [Arias, 2015] **Figura 4**.



Figura 4 Las regiones del Ecuador. Imagen tomada de <https://miaarias99.files.wordpress.com/2015/05/regiones-del-ecuador.jpg>

La **Región Costa** se desarrolla como una franja alargada entre la latitud $1^{\circ}26'N$ y $3^{\circ}51'S$, y situada en términos de altitud entre los 0 hasta 500 msnm, desde el océano Pacífico hasta las estribaciones occidentales de la cordillera de los Andes.

La **Región Sierra** se encuentra localizada entre $1^{\circ}N$ y $4^{\circ}30'S$, y a una altitud desde 750 hasta 6.000 msnm.

La **Región Amazónica**, también llamada Oriente, corresponde a los territorios por debajo de los 1000 msnm, en las estribaciones orientales de los Andes y se desarrolla entre las latitudes $0^{\circ}26'N$ y $4^{\circ}50'S$.

La **Región Insular** o el archipiélago de Galápagos, es un conjunto de islas ubicadas entre las latitudes $1^{\circ}N$ y $1^{\circ}S$, y su gradiente altitudinal va desde 0 hasta 1.689 msnm.



Figura 5 Imágenes de las 4 regiones del Ecuador. Imagen tomada de <https://www.turismo.gob.ec/>

Con el propósito de alcanzar el objetivo de esta tesis, que se centra en el sobrecalentamiento de los espacios interiores, se ha escogido **EL CLIMA DE LA REGIÓN COSTA DEL ECUADOR** como caso de análisis para esta investigación.

Además, el mayor consumo energético de este país se registra en la región Costa, aunque su población no supera por mucho a la de la Región Sierra [ONU, 2000] [INEC, 2010] [ARCONEL, 2013]. Lo que, de acuerdo a varios estudios, se debe principalmente al consumo energético de los sistemas de refrigeración activos.

Por lo tanto, el enfoque de esta tesis, sobre la Región Costa del Ecuador, puede ofrecer un mayor impacto en el ámbito energético y económico a nivel país.

1.1 LA REGIÓN COSTA DEL ECUADOR: CLIMA

Para detallar el clima de la Región Costa del Ecuador se han tomado los datos de una ciudad en concreto (Santa Rosa). Esta ciudad pertenece a la provincia de El Oro y se localiza al sur de la línea costera del Océano Pacífico, a una latitud 3°27'S y una altitud de 14 msnm, **Figura 6**.



Figura 6 Ubicación de la ciudad de Santa Rosa en el territorio del Ecuador.

Santa Rosa posee un clima que puede describir de manera general las características climáticas de esta región. De acuerdo a el mapa de Köpen-Geiger esta ciudad se clasifica como un clima Húmedo Tropical (Aw), y en el mapa del INAMHI de sub-climas del Ecuador como un clima Sub-húmedo [Inamhi, 2013]. Este tipo de clima se caracteriza por una variabilidad de temperaturas anual muy reducida, y altos niveles de humedad a lo largo de todo el año. El régimen de viento es bajo, influenciado en su mayoría por la brisa marina. Los niveles de precipitación en la región superan los 1500 mm al año y se concentran en los meses de febrero, marzo y abril, **Tabla 1**.

Tabla 1 Promedios mensuales de los datos climáticos de la ciudad de Santa Rosa (2016). Valor máximo (rojo) y mínimo (azul) anual. Información obtenida de la estación meteorológica del aeropuerto Víctor Larrea

	TEMPERATURA (°C)			HUMEDAD RELATIVA (%)			PRECIPITACIONES (mm)
	T.mean_max	T.mean	T.mean_min	RH_Max	RH mean	RH_Min	
Ene	30,1	27,1	24,1	96,7	84,5	72,5	122,0
Feb	30,7	27,4	24,1	98,3	87,0	75,3	247,3
Mar	31,0	27,9	24,9	98,1	87,2	75,9	481,0
Abr	31,1	27,7	24,6	98,4	83,0	67,1	426,8
May	31,0	27,1	23,8	94,8	84,6	71,2	80,0
Jun	29,0	25,7	22,5	95,9	81,8	69,5	34,0
Jul	27,4	24,6	22,1	96,2	84,9	74,5	70,2
Ago	27,3	24,3	21,8	94,9	84,6	73,8	58,0
Sep	27,1	24,5	22,0	95,7	85,0	74,8	36,3
Oct	27,2	24,3	21,5	95,5	85,0	75,1	34,5
Nov	27,3	24,4	21,8	95,9	84,6	73,6	35,2
Dic	29,0	26,1	23,0	94,1	80,7	67,9	20,6
Anual	29,0	25,9	23,0	96,2	84,4	72,6	1645,9

La temperatura media anual en esta región es de 26°C, con una oscilación anual de 3.6°C, y una oscilación diaria promedio de 6°C. En cuanto a los niveles de humedad, el valor promedio anual es del 84%, con un mínimo promedio anual del 81% en diciembre y un máximo promedio anual del 87% en marzo, coincidiendo con los meses de menor y mayor precipitación respectivamente. Los valores mínimos mensuales no bajan de 67% y los máximos llegan hasta el 98%, **Figura 7**.

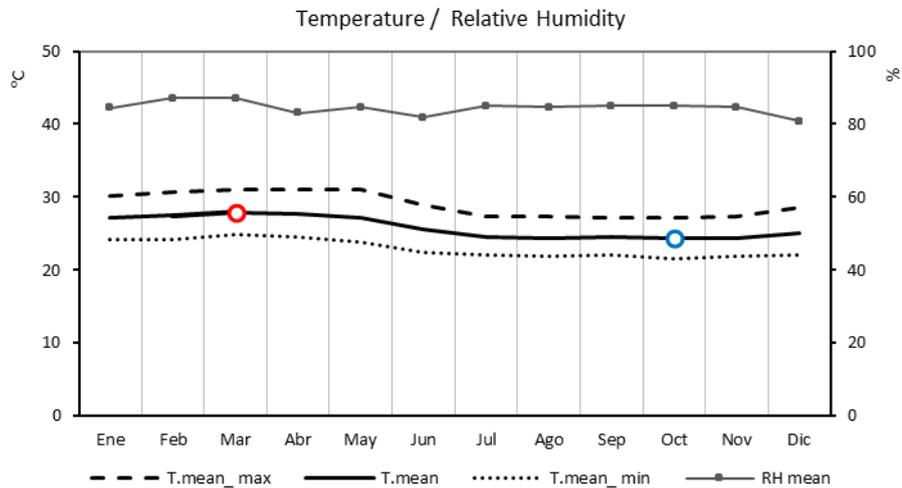


Figura 7 Promedio mensual de la temperatura del aire (máxima, mínima y media) y la Humedad Relativa media (2016) _Santa Rosa. Fuente: Estación Meteorológica Aeropuerto Víctor Larrea

Debido a la cercanía de esta ciudad con el mar, al igual que todas las ciudades de esta región, la dirección del viento predominante es desde el Noroeste, con una velocidad que no supera los 12 km/h durante todo el año, **Figura 8**.

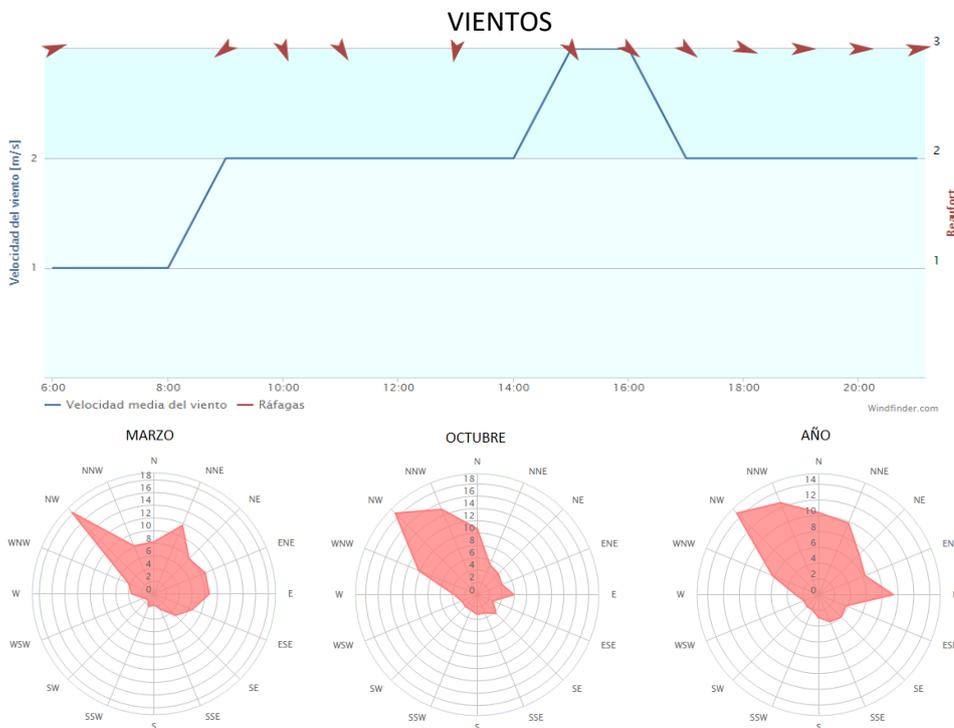


Figura 8 Velocidad (arriba), dirección y frecuencia (abajo) del viento. Imagen tomada de http://www.winfinder.com/windstatistics/santa_rosa_aeropuerto

Otra característica climática de fundamental importancia en esta región es el **ALTO PORCENTAJE DE CIELO CUBIERTO POR NUBES**.

Este parámetro es usado para describir el estado del cielo, también llamado NUBOSIDAD DEL CIELO (cloud cover, cloud amount, cloud frequency, nubosity), y se define como la fracción de la bóveda celeste cubierta por nubes [Wilson and Jetz, 2016].

La nubosidad del cielo, de manera general, está condicionada por la latitud de cada región, alto en latitudes cercanas al Ecuador, y bajo en latitudes medias , **Figura 9** [Beckers, 2012].

MAPA MUNDIAL DE NUBOSIDAD

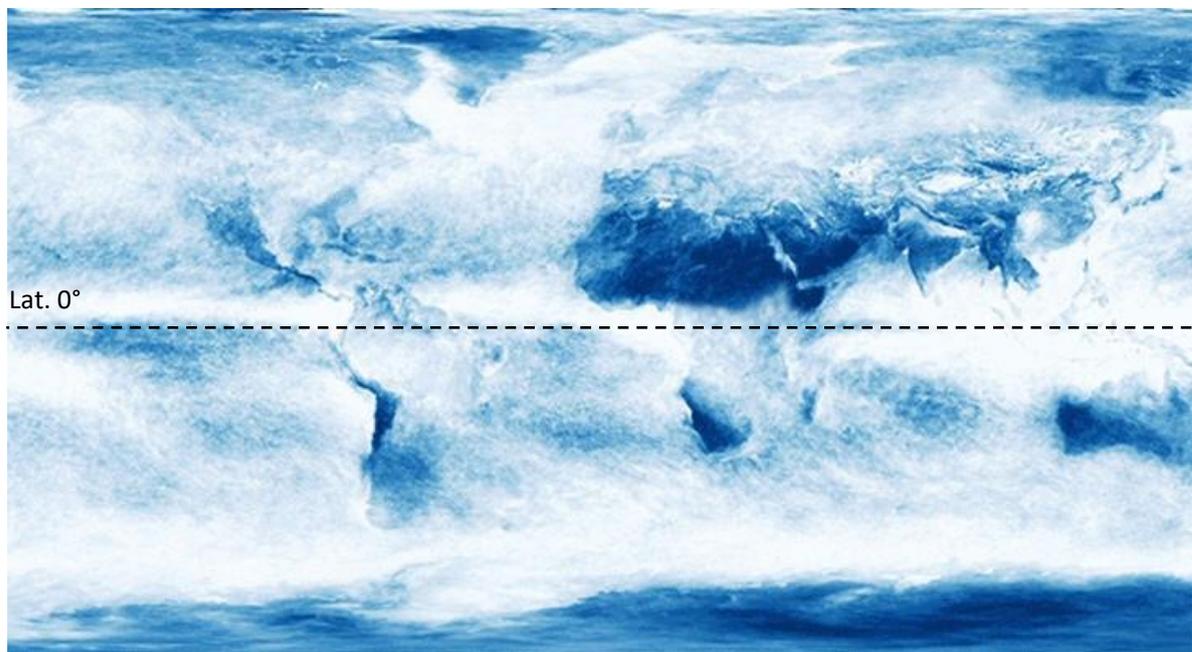


Figura 9 Mapa de nubosidad de la tierra. Imagen tomada de https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=85843&eocon=home&eoci=iotd_previous

El porcentaje de cielo cubierto tiene una relación directa con la alta y constante humedad de estas regiones. Además, al igual que otras variables climáticas, este factor se intensifica por su cercanía con el mar.

Los niveles de nubosidad del cielo, en términos generales, se pueden relacionar con la intensidad del azul del cielo, que varía en función del contenido de humedad de la atmósfera.

Los cielos de un azul más intenso, tienen un menor contenido de humedad, y por tanto una menor obstrucción al paso de la radiación solar y una alta capacidad de enfriamiento radiativo (latitudes medias). Por el contrario, los cielos de un azul menos intenso tienen un mayor contenido de humedad, y por tanto una mayor obstrucción al paso de la radiación solar y una baja capacidad de enfriamiento radiativo, (latitudes bajas), **Figura 10**.



Figura 10 Imágenes de la nubosidad del cielo de ciudades en diferentes latitudes: Monserrat-España, Sevilla-España, Roma-Italia, Tokyo-Japón y Santa Rosa-Ecuador (de izquierda a derecha). Imágenes tomadas por el autor.

La relevancia de la nubosidad en esta región, es de tal importancia que tiene una fuerte influencia sobre otros factores que determinan este clima, como la oscilación de la temperatura del aire, las precipitaciones, el flujo y la dirección de la radiación solar, y la DISIPACIÓN DE CALOR.

Aunque es un factor fundamental sobre el balance energético de cualquier elemento de la envolvente y en especial de la cubierta, con frecuencia no es considerado en la evaluación térmica de los edificios. La omisión de este factor puede resultar en errores de gran magnitud, especialmente en regiones de latitudes bajas donde los niveles de nubosidad son tan altos y permanentes a lo largo de todo el año, como es el caso de la Región Costa de Ecuador.

Por lo tanto, este factor climático será estudiado con más detalle en apartados posteriores.

Por último, el factor climático de mayor importancia en esta ciudad y en esta región, **LA RADIACIÓN SOLAR**. Debido a la ubicación geográfica de esta ciudad, cercana a la latitud 0° , los rayos solares son casi perpendiculares al plano horizontal durante todo el año.

Si se toma como referencia una ubicación geográfica de latitud 0° , el ángulo de incidencia solar con respecto al plano horizontal varía desde $+66^\circ 33'$ el 21 de junio, pasando por 90° en los equinoccios, hasta $-66^\circ 33'$ el 21 de diciembre, **Figura 11**.

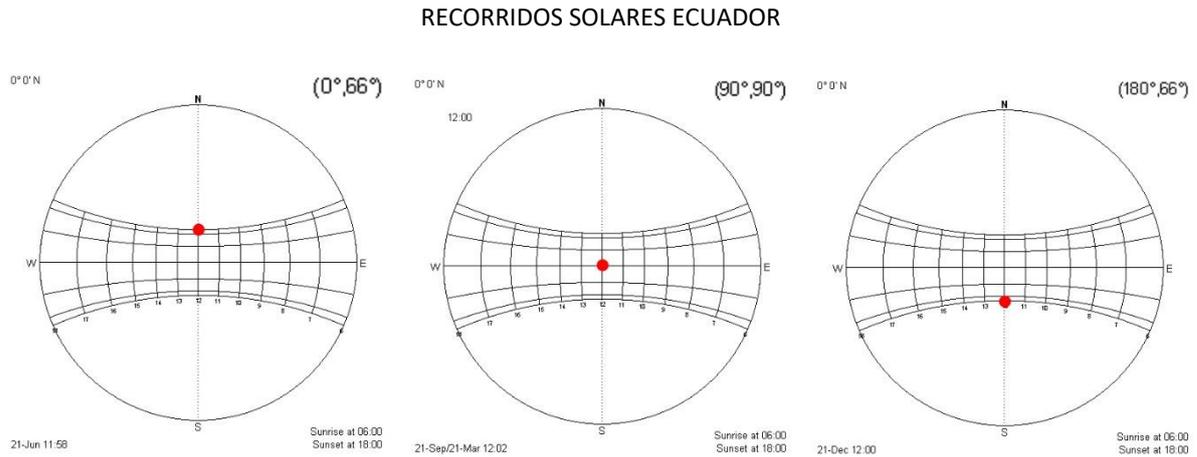


Figura 11 Variación de la posición del sol en los solsticios y equinoccios en una ubicación geográfica de latitud 0° . Gráfico obtenido con el uso del software Heliodon [Beckers and Masset, 2003]

A continuación se muestran los valores promedio mensuales del flujo de radiación solar de esta ciudad ($3^\circ 27' S$), obtenidos a través de un software de simulación (Heliodon) [Beckers and Masset, 2003], y de una base de datos del atlas solar del Ecuador [Conelec, 2008], **Figura 12**.

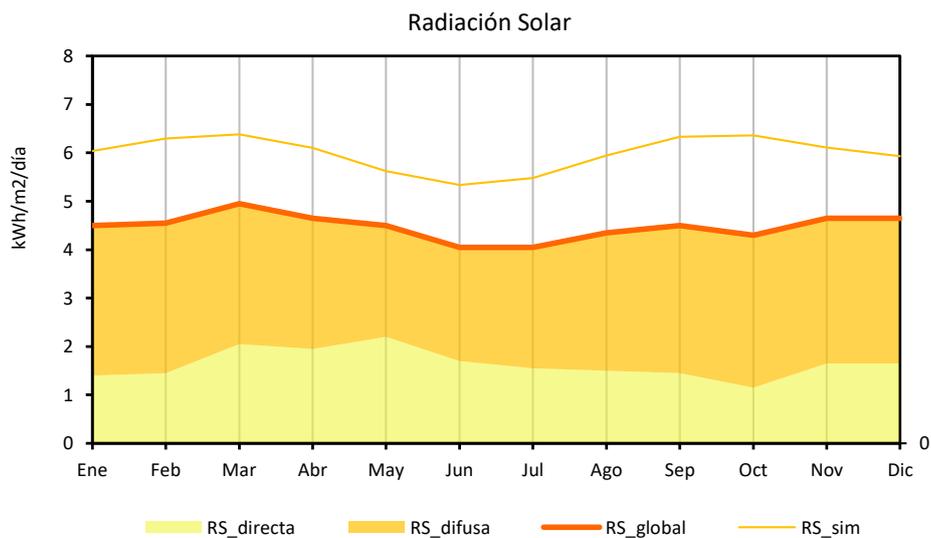


Figura 12 Comparación entre la radiación solar simulada (RS_{sim}) y la radiación solar global (RS_{global}), directa ($RS_{directa}$) y difusa (RS_{difusa}) obtenida del atlas solar del Ecuador.

Los valores de simulación (RS_sim) usan un proceso de cálculo que considera un modelo de cielo totalmente despejado y supone un porcentaje de disminución por la atmosfera del 30%. En cambio, los valores del atlas solar (RS_global, RS_difusa, RS_directa) consideran un modelo de cielo corregido que analiza la nubosidad del cielo basado en información de tasa de gases, vapor de agua atmosférico, etc [George and Maxwell, 1999].

La información que provee el atlas solar corresponde a los datos de radiación global, directa y difusa calculada sobre el plano horizontal en una malla de 40x40 km, **Figura 13**.

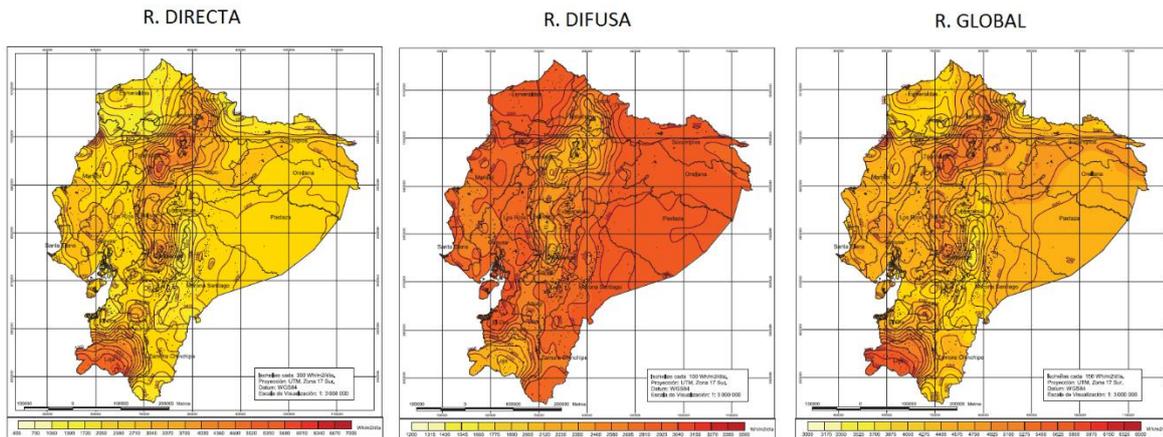


Figura 13 Promedio anual de la radiación solar directa (izquierda), difusa (medio) y global (derecha). Imagen tomada del atlas solar del Ecuador.

Si nos referimos a los valores simulados (RS_sim), **Figura 12**, debido a que este modelo no considera la nubosidad del cielo se muestra una curva de radiación definida y simétrica a lo largo del año, donde todos los valores obtenidos son superiores a 5kWh/m^2 . Por su ubicación geográfica, cercana a la latitud 0° , los valores máximos están en marzo y octubre (6.4kWh/m^2), el mínimo en junio (5.34kWh/m^2), y un valor similar en diciembre.

La radiación global (RS_global), tomada del atlas solar, muestra una curva menos definida y una reducción del 25% con respecto a los valores simulados. Esta reducción se debe a la corrección de la nubosidad que considera este modelo. Conforme a esta información, la radiación máxima es de 5kWh/m^2 en marzo, la radiación mínima 4kWh/m^2 en junio, y un promedio anual de 4.5kWh/m^2 .

Aunque las reducciones de radiación solar son diferentes cada mes, las tendencias de las dos curvas son similares. Los máximos y mínimos (marzo y junio) coinciden con los resultados simulados. No obstante, en octubre se observa la reducción más representativa del 32%, pasando de ser uno de los meses con mayor radiación a uno de los meses con los mínimos valores.

Además, los valores obtenidos del atlas resaltan la predominancia de la componente difusa (RS_difusa) sobre la componente directa, **Figura 12**. La radiación difusa representa el 63% de la radiación global en promedio anual, y hasta el 75% en el mes de octubre. La importancia de esta componente en este mes coincide con la más alta reducción del flujo solar. Además, estos resultados se pueden asociar con el grado de nubosidad de cada mes.

En busca de relacionar estos dos parámetros, la radiación solar y la cobertura del cielo, la **Figura 14** compara los resultados anteriores de radiación solar global (RS_sim, RS_atlas) con los promedios mensuales de nubosidad. Estos datos de nubosidad fueron obtenidos de un simulador web EarthEnv [Wilson and Jetz, 2016] que calcula esta variable en función de una base de datos de varios factores climáticos, conjuntamente con el uso de imágenes satelitales. Los meses con mayor nubosidad enero, febrero y octubre coinciden con los meses de mayor reducción del flujo solar y mayor radiación difusa.

En base a estos datos se evidencia la fuerte influencia de la nubosidad del cielo sobre la radiación solar global, en cuanto a la reducción de la cantidad de flujo y sobre sus componentes: la directa y difusa.

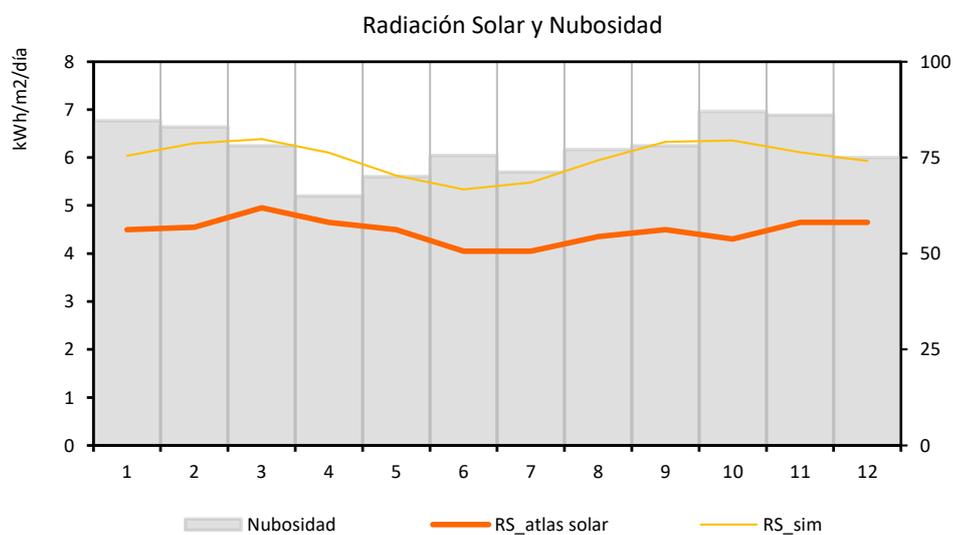


Figura 14 Promedio mensual de la nubosidad del cielo (nubosidad), radiación solar global del atlas solar (RS_atlas solar) y radiación solar global simulada (RS_sim).

Aunque la información analizada en este apartado, ya muestra **LA RELEVANCIA DE LA NUBOSIDAD SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR**, estos valores corresponden a aproximaciones realizadas por cálculo en base a imágenes satelitales. Por tanto, la determinación de valores más precisos de estos dos factores climáticos en esta región será esencial para el desarrollo de la presente tesis.

1.2 LA REGIÓN COSTA DEL ECUADOR: CONTEXTO URBANO

El Ecuador, al igual que otros países de Latinoamérica, ha experimentado un fuerte crecimiento de la población urbana en las últimas décadas. Esta población se incrementó en un 68%, en el periodo de 1990 a 2010, pasando de 5,3 millones a 9 millones de habitantes. Este crecimiento ha repercutido de manera sustancial sobre la demanda de vivienda en las ciudades, con una tasa de crecimiento del 125%, no proporcional a la de la población [INEC, 1990][INEC, 2010][CONELEC, 1999][ARCONEL, 2013].

Las ciudades de este país, para satisfacer las necesidades del crecimiento residencial, han adoptado un modelo de expansión horizontal o *urban sprawl*. Numerosas desventajas sobre la demanda energética y consecuencias a nivel global se asocian a este modelo urbano. Una de las más importantes es la expansión del espacio construido. A mayor expansión, mayor uso del transporte debido al aumento de las distancias, lo que consecuentemente eleva el consumo energético del principal demandante de energía en la mayoría de países [Celis *et al.*, 2012][Real-Estate-Research-Corporation, 1974].

De acuerdo a una base de datos fotográfica, la mancha urbana de varias ciudades costeras del Ecuador, como Guayaquil, Manta, Machala o Santa Rosa, ha crecido en un promedio del 150% en el periodo de 1980 a 2014. La **Figura 15** muestra el caso de la ciudad de Santa Rosa en la provincia de El Oro, la cual tuvo un crecimiento del espacio construido del 250%, de 1.9 km² a 6.5 km².

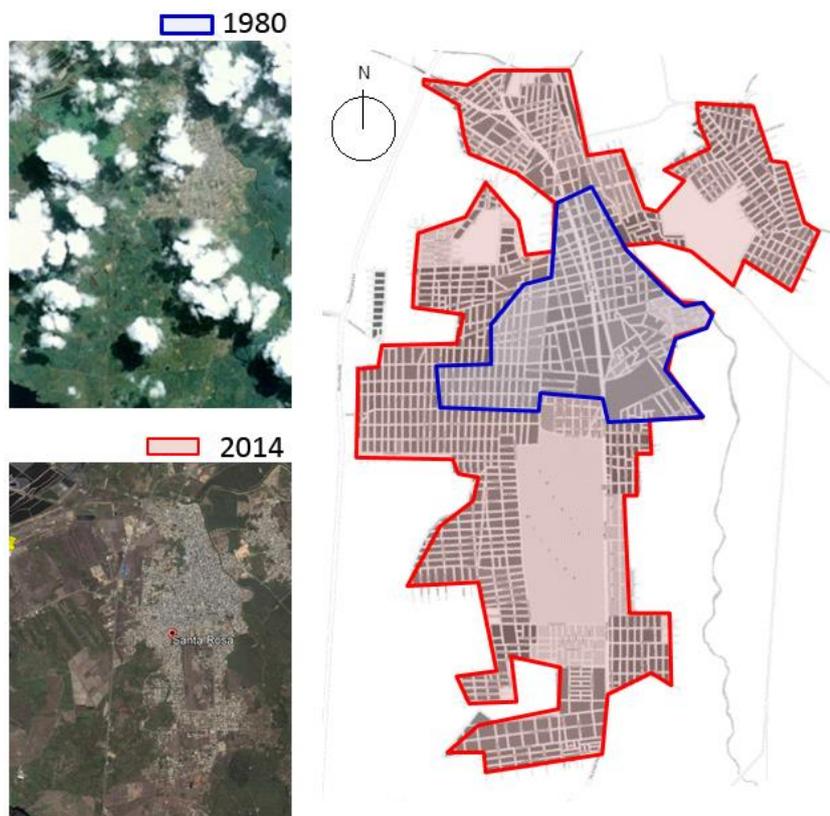


Figura 15 Superficie urbana de la ciudad de Santa Rosa-El Oro en 1980 (azul) y en 2014 (rojo). Imágenes tomadas de: google earth Pro y plano tomado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ciudad_de_Santa_Rosa-Ecuador.png.

Otra característica del *urban sprawl* es la baja densidad y la predominancia de las edificaciones de baja altura [Downs A, 1999]. En el caso de la ciudad de Santa Rosa, aunque no se tiene un dato preciso, la densidad aproximada es de **2500 hab/km²**. Por otra parte, **el 75% de las edificaciones de esta ciudad son de 1 planta**, y solo el 10% de las viviendas de esta ciudad tienen más de tres pisos de altura [INEC, 2010].

De acuerdo a las características descritas, esta ciudad se define como **poco compacta y poco densa**, al igual que el resto de las ciudades de esta región y del Ecuador en general, **Figura 16**.



Figura 16 Tejido urbano (arriba) y cañón urbano (abajo) de la ciudad de Santa Rosa-El Oro. Imagen tomada de google earth Pro, 2017.

1.3 EL CONSUMO ENERGÉTICO EN EL ECUADOR

Además de repercutir sobre la demanda residencial, el crecimiento demográfico de las zonas urbanas de la región Costa del Ecuador ha tenido un gran impacto sobre el consumo energético del sector residencial, con una **tasa de crecimiento del 200%** de 1990 a 2010 que se incrementó hasta el 240% en el 2014 [CONELEC, 1999][ARCONEL, 2013] [ARCONEL, 2014].

La tasa de crecimiento del consumo energético no es proporcional al crecimiento poblacional ni a la demanda residencial de esta región, **Figura 17**.

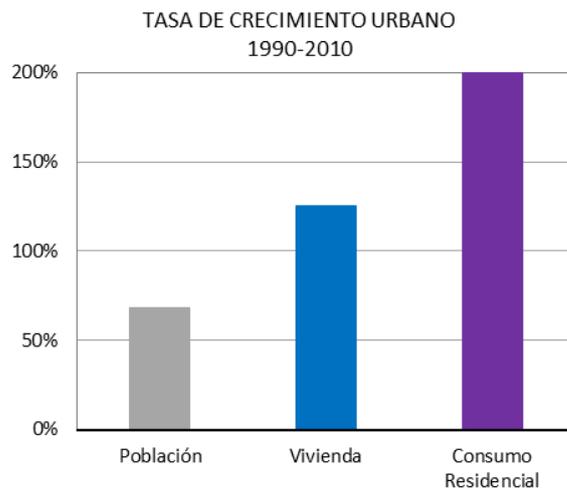


Figura 17 Tasa de crecimiento de 1990 a 2010: Población, Vivienda y consumo energético residencial de la Región Costa del Ecuador. Fuente: datos del Censo de Población y Vivienda, y el Boletín estadístico ARCONEL, 1990/2010.

De acuerdo a datos de ARCONEL del año 2014, el sector residencial en todo el Ecuador es el primer responsable (**35%**) del total de energía consumida por servicios públicos (18.000 GWh), **Figura 18**. De esta, el 45% es generado por fuentes no renovables, y el 55% principalmente por fuentes hidroeléctricas [ARCONEL, 2014].

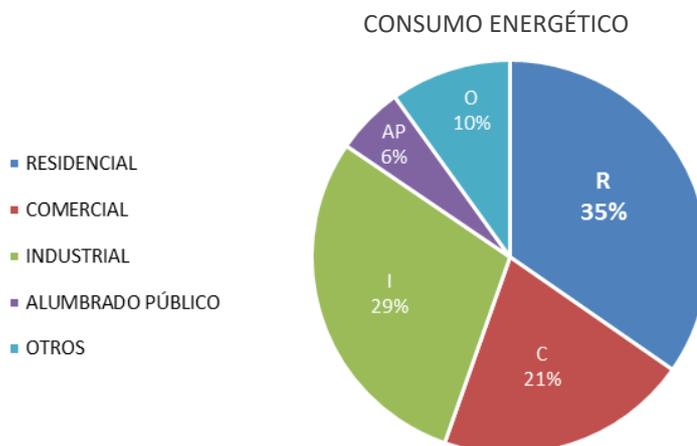


Figura 18 Distribución por sectores del consumo energético para servicio público. Fuente: elaboración propia de los datos de ARCONEL 2014.

No obstante, se debe tomar en cuenta que para satisfacer la demanda total de energía, este país siempre ha tenido como principal fuente al petróleo.

Al año 2014, el petróleo es responsable del 89% del total de la energía producida por este país, y sólo el 6% proviene de energía renovable (hidro-energía, leña y productos de caña) [MCSE, 2015].

Es fundamental considerar que el total de producción de energía (54257 KBEP - *Barril Equivalente de Petróleo*) **representa sólo el 57% de la energía consumida** (95448 kBEP), por lo que la diferencia entre la demanda y la producción debe ser importada (41191 kBEP), **Figura 19**.

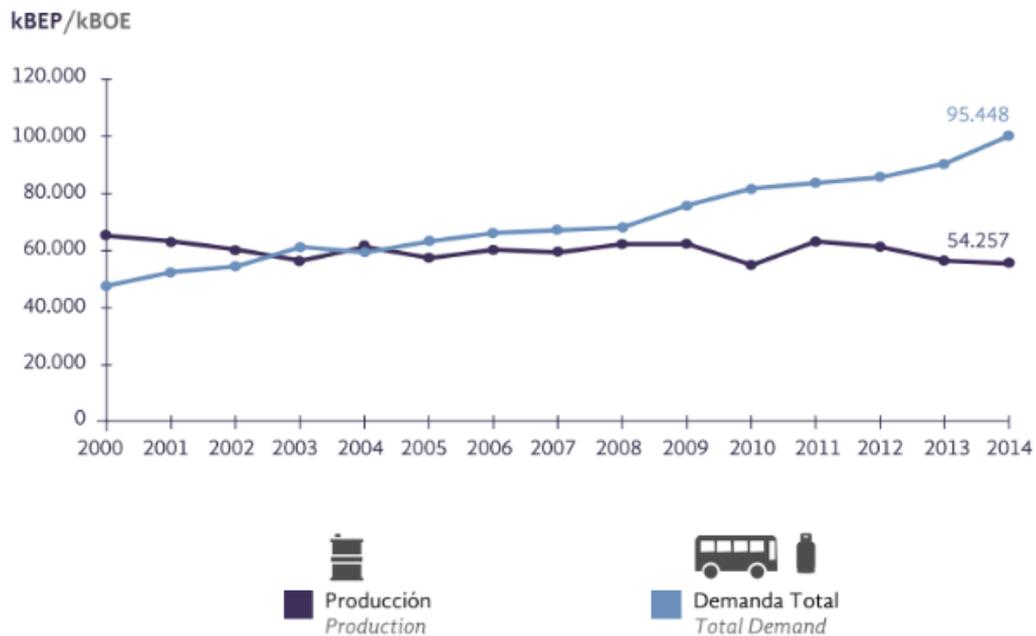


Figura 19 Producción y demanda de la energía del Ecuador. Imagen tomada del Balance energético Nacional 2015, [MCSE, 2015].

Al igual que otros países, en Ecuador el principal responsable del total de la demanda de energía (95448 kBEP), si tomamos datos del año 2014, es el transporte. Sin embargo, el 16% y 12% están destinados al sector de la construcción y el sector residencial respectivamente, **Figura 20**.

El consumo energético residencial ha crecido en un 70%, del 2000 al 2014. Este incremento se intensifica a partir del 2009, con una aceleración inclusive mayor que el transporte, por lo cual toma gran importancia en la actualidad.

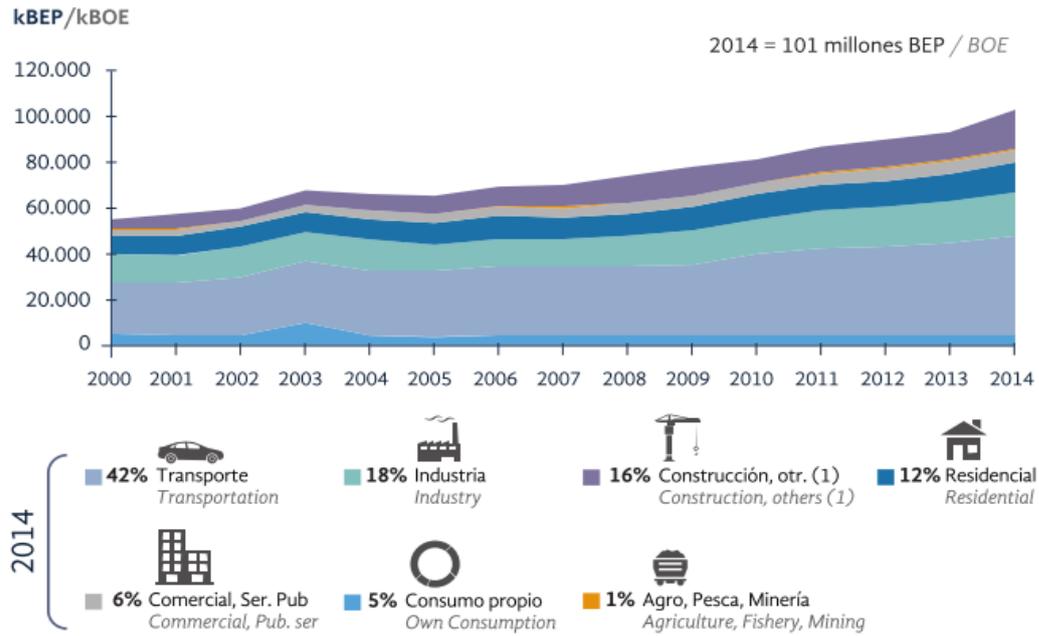


Figura 20 Distribución por sector de Consumo energético total del Ecuador. Imagen tomada de Balance energético Nacional 2015, [MCSE, 2015].

Conforme a varios estudios realizados en climas similares al de esta región, **los sistemas activos de refrigeración son los principales responsables (60%-75%) del consumo residencial** [Jayasinghe, Attalage and Jayawardena, 2003][Bertoldi and Atanasiu, 2009] [Kua and Wong, 2012].

Dado que gran parte de la energía consumida en el Ecuador tiene que ser importada y no proviene de fuentes renovables las estrategias aplicadas a evitar el sobrecalentamiento interior, repercutirán sustancialmente sobre el consumo energético de este sector, lo que se puede traducir en ventajas ambientales y económicas a escala del usuario y del país.

1.4 EL IMPACTO DE LA CUBIERTA EN EL AMBIENTE INTERIOR.

De acuerdo a lo descrito hasta ahora, los condicionantes climáticas y urbanas del Ecuador ponen en relevancia el papel de la cubierta sobre el funcionamiento térmico de la vivienda.

Por un lado, debido al constante flujo solar durante todo el año y a la perpendicularidad de los rayos solares, la cubierta es la parte de la envolvente que mayor radiación recibe. Y Por otra parte, debido a las características urbanas de estas ciudades, la superficie de este elemento tiene una gran relevancia, en términos de área, tanto a nivel urbano como de edificio.

Los datos de simulaciones (modelo de cielo teórico despejado) obtenidos según los recorridos solares en la latitud $3^{\circ}27'S$, correspondientes a la ciudad de análisis, arrojan un valor de radiación promedio anual sobre la cubierta de $6 \text{ kWh/m}^2.\text{día}$, mientras que las paredes orientadas hacia este y oeste reciben $2 \text{ kWh/m}^2.\text{día}$, y las paredes orientadas hacia norte y sur $1 \text{ kWh/m}^2.\text{día}$ aproximadamente.

En otras palabras, la cubierta recibe entre 3 y 6 veces más radiación que las paredes con orientación este-oeste y norte-sur, respectivamente, **Figura 21**.

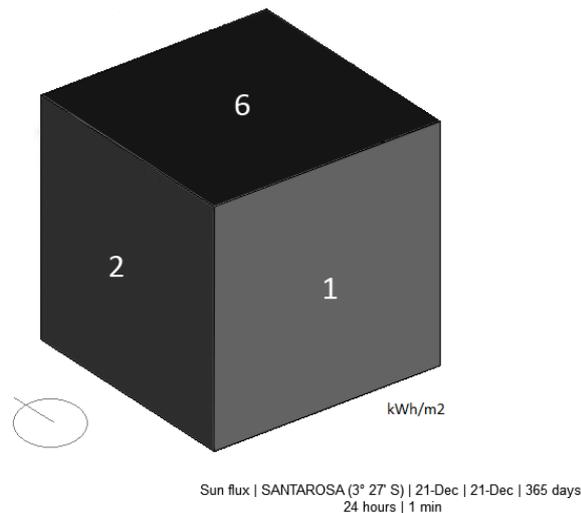


Figura 21 Promedio de radiación anual ($\text{kWh/m}^2.\text{día}$) recibida sobre el plano horizontal y las 4 orientaciones en la latitud de la ciudad de referencia ($3^{\circ}27'$). Datos obtenidos del software Heliodón.

La relación de la cubierta con las características urbanas de estas ciudades tiene dos particularidades en estas regiones. La tipología predominante son las viviendas de baja altura, donde la superficie de cubierta representa la mayor proporción respecto al resto de superficies de la envolvente.

De igual manera, a causa de la expansión horizontal de estas ciudades, la cubierta representa un gran porcentaje de la superficie total del tejido urbano.

De acuerdo a las características urbanas de la ciudad analizada (Santa Rosa – El Oro, *ver anexo A1.1 LA CUBIERTA EN EL CONTEXTO URBANO DE ECUADOR*) la cubierta en promedio representa el 35% de la envolvente del edificio, y el 37% de la superficie total urbana, **Figura 22**.

PROPORCIÓN DE LA CUBIERTA A NIVEL EDIFICIO Y URBANO

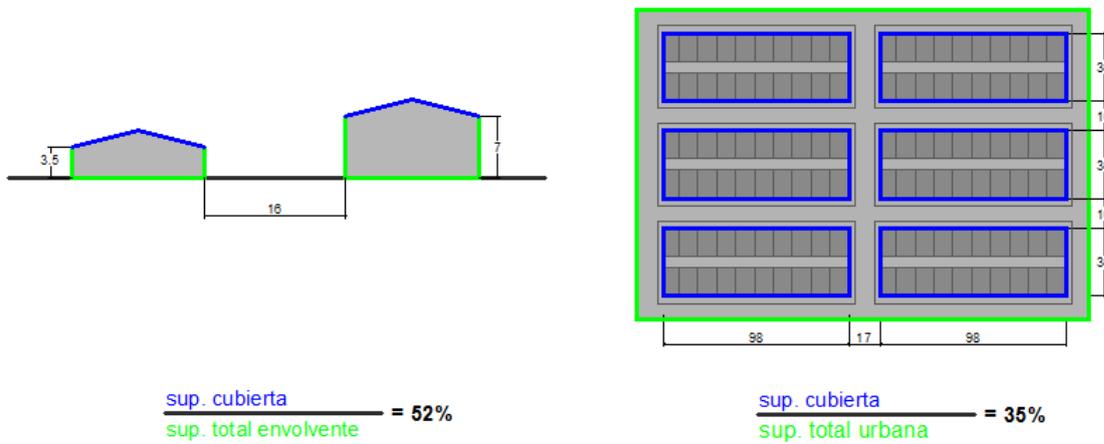


Figura 22 Proporción de la cubierta a nivel edilicio (izquierda), y a nivel urbano (derecha) de acuerdo a las características urbanas de la ciudad de Santa Rosa-El Oro-Ecuador.

Tomando como condicionantes estos dos contextos, climático y urbano, la cubierta no sólo es la superficie que mayor radiación solar recibe, sino también la que mayor intercambio térmico tiene con el exterior y el interior de la edificación. Además, debido a su posición con respecto a su entorno, esta superficie es la que mayor intercambio tiene por radiación con el cielo. El porcentaje de cielo visto de la cubierta puede alcanzar el 100% dependiendo de su inclinación, a diferencia de los paramentos verticales que pueden tener un factor de vista del cielo máximo del 50%, dependiendo de su entorno.

De acuerdo a un estudio realizado por el autor, conforme a las características edilicias y urbanas típicas de la ciudad de referencia, **el flujo a través de la cubierta es el principal responsable de la ganancias totales interiores (56%)**. Este valor es incluso mayor que los aportes solares a través de las ventanas [Torres-Quezada *et al.*, 2018], **Figura 23**.

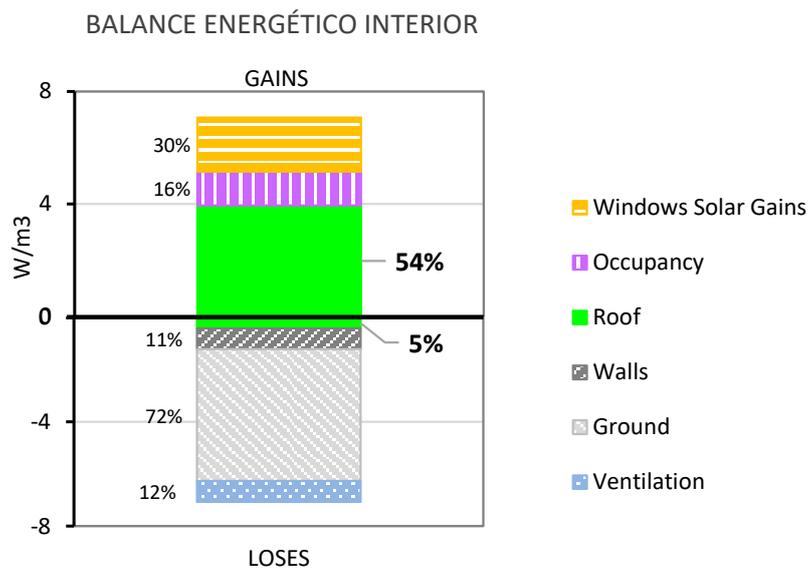


Figura 23 Balance energético de una vivienda de 1 planta en Ecuador. Imagen tomada de [Torres-Quezada *et al.*, 2018]

1.5 LA CUBIERTA EN LA REGIÓN COSTA DEL ECUADOR

La vivienda vernácula de la Región Costa desde siempre se ha caracterizado por sus MATERIALES LIGEROS, paredes de pambil o caña picada, y hojas de palma para la cubierta [Ubidia, Ruiz and Navarrete, 1987].

Ligeras diferencias morfológicas existían entre las diferentes ciudades de esta región, **Figura 24**, sin embargo, se destacaba el uso común las cubiertas inclinadas con grandes aleros, viviendas separadas del suelo, y de los materiales descritos [Nurnberg, Ycaza and Holm, 1982].

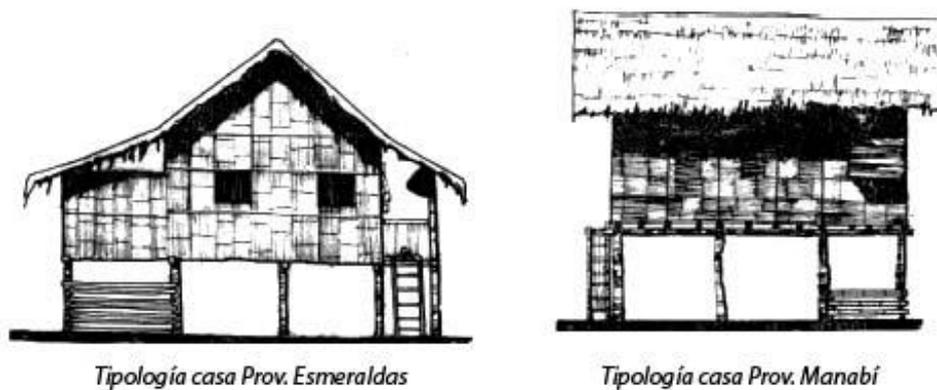


Figura 24 Arquitectura vernácula de diferentes provincias de la Región Costa de Ecuador. Imagen tomada de [Nurnberg, Ycaza and Holm, 1982]

Aunque estos sistemas constructivos han desaparecido casi en su totalidad, aún quedan algunos ejemplos en zonas rurales, **Figura 25**.



Figura 25 Viviendas de zonas rurales de la Región Costa de Ecuador, en la actualidad. Imagen tomada de [de Diego, 2017]

A partir de mediados del siglo XX, tras la globalización de materiales y la inserción de nuevas tecnologías, el uso de materiales naturales propios de la zona empezó a reducirse hasta desaparecer casi en su totalidad en la actualidad. Debido al constante mantenimiento que necesitaban estos sistemas constructivos, especialmente los materiales de la cubierta, se reemplazó la hoja de palma por láminas de acero con un recubrimiento de zinc [Tambaco, 2012].

La **Figura 26** muestra imágenes antiguas de una ciudad de la Costa Ecuatoriana (Santa Rosa-El Oro-Ecuador), donde se puede apreciar ya la predominancia de los nuevos materiales, como la cubierta metálica, sobre los materiales naturales de la arquitectura vernácula.



Figura 26 Imágenes de viviendas de la Costa de Ecuador (Santa Rosa-El Oro) de 1940-1960. Imágenes tomadas de <https://santarosa-digital.blogspot.com.es/>

En las últimas décadas, la lámina metálica sigue siendo el material más usado en las cubiertas de la Región Costa del Ecuador, sin embargo, otros materiales como el hormigón han empezado a utilizarse con una gran popularidad en las edificaciones residenciales.

De acuerdo a los datos censales del Instituto Nacional de Censos y Estadísticas de Ecuador (INEC), las dos tipologías de cubiertas más utilizadas en la región Costa del Ecuador son **la Cubierta metálica y la Cubierta de Hormigón, Figura 27.**

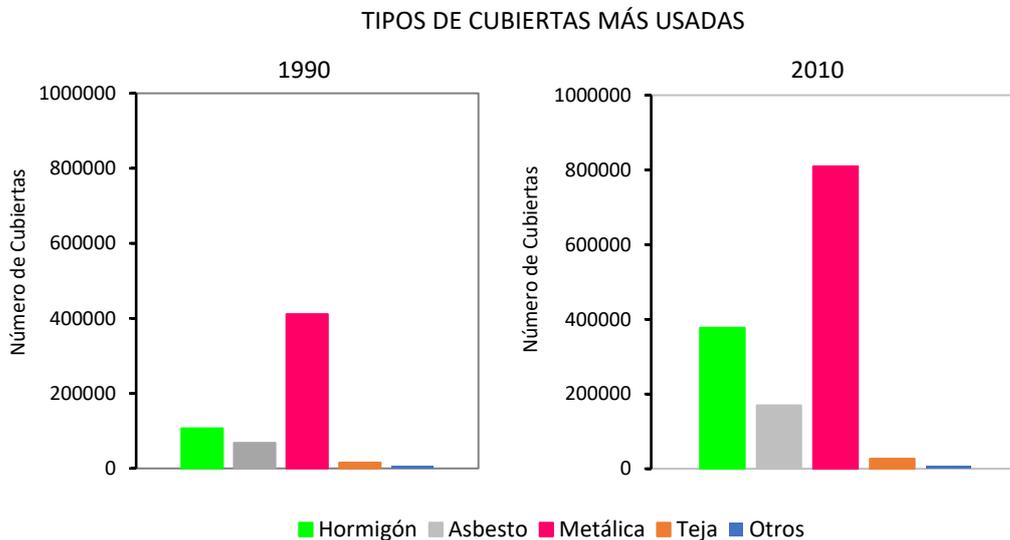


Figura 27 Tipos de cubiertas más usadas en la Región Costa del Ecuador en el año 1990 y 2010. Elaboración propia a partir de los datos de INEC 1990 y 2010 [INEC, 1990][INEC, 2010]

Según estos datos, en el año 1990, 10.000 viviendas poseían una cubierta de hormigón (verde), mientras que 40.000 poseían cubierta metálica (magenta), una relación hormigón/zinc de 0.25. Sin embargo, en 2010 esta proporción se incrementó a 0.5, con 40.000 viviendas con losa de hormigón y 80.000 con cubierta de metal [INEC, 1990][INEC, 2010].

Aun cuando el uso de la cubierta metálica es predominante en los dos años de censo, el uso de la cubierta de hormigón tiene un mayor crecimiento en este periodo. De 1990 a 2010, la losa de hormigón creció un 350%, mientras que la cubierta metálica aumentó 190%, **Figura 28**.

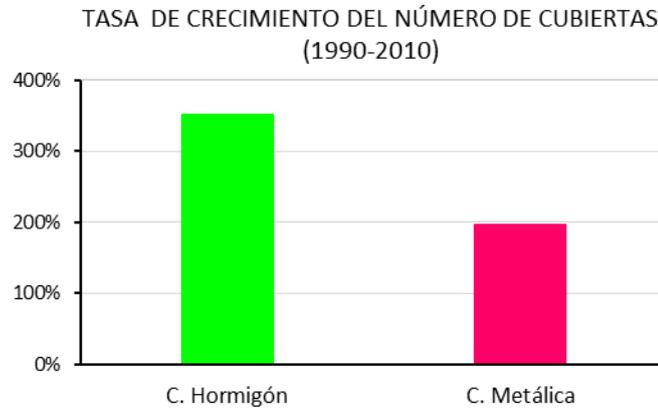


Figura 28 Tasa de crecimiento de la cubierta de hormigón y metálica en la Región Costa en el periodo 1990-2010.

La **Figura 29** muestra dos viviendas con cada una de las tipologías de cubierta. La cubierta metálica posee un recubrimiento de zinc o una aleación de aluminio y zinc sobre lámina de acero. La cubierta de hormigón es una losa de hormigón armado con doble nervadura, aligerada con bloque de piedra pómez.



Figura 29 CUBIERTA METÁLICA (arriba) y CUBIERTA DE HORMIGÓN (abajo). Imágenes tomadas de google earth Pro.

La **Figura 30** muestra el tejido urbano de dos sectores de la ciudad de Santa Rosa, que se han urbanizado en dos diferentes épocas, antes y después del año 2000, de acuerdo al catastro de esta ciudad [GAD_SANTAROSA, 2016]. En el sector construido antes del año 2000 (izquierda) se puede apreciar una predominancia de las cubiertas metálicas (gris claro) sobre las cubiertas de hormigón (gris oscuro), mientras que en el sector urbano conformado después del 2000 (derecha), estas dos tipologías tienen porciones similares.



Figura 30 Viviendas construidas antes del 2000 (izquierda) y después del 2000 (derecha). Imágenes tomadas de google earth Pro.

Este análisis gráfico ratifica la tendencia obtenida con los datos censales, donde el uso de la cubierta de hormigón ha tomado mayor relevancia en los últimos años en la región Costa del Ecuador.

Aun cuando el costo de construcción de las cubiertas pesadas es más elevado que el de las cubiertas ligeras, esta tipología cada vez toma más relevancia en las viviendas de esta región. Bajo este contexto, se ha tratado de explicar esta tendencia desde diferentes puntos de vista.

Kennedy en su artículo *“permanently unfinished”* explica que el uso de este material no tiene el objetivo final de ser una cubierta, **Figura 31**. [Kennedy, 2017].

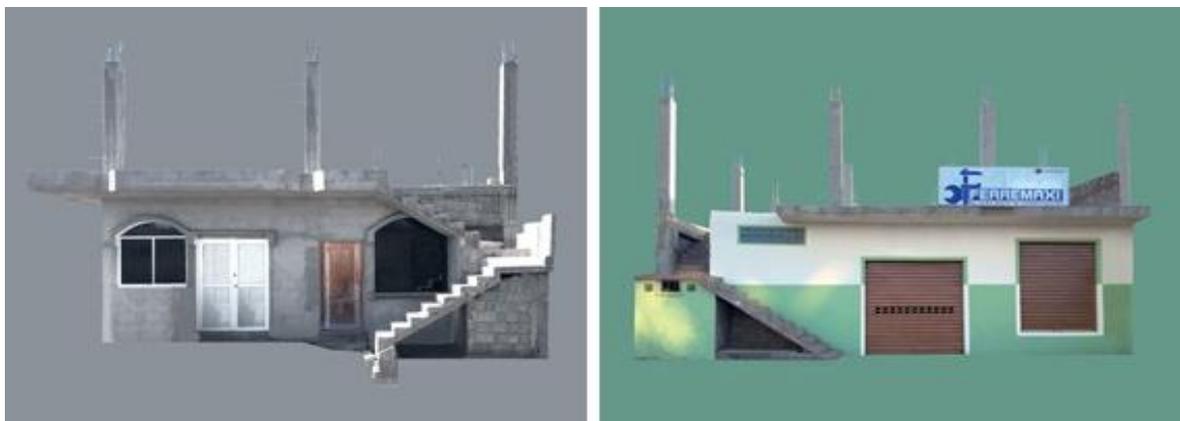


Figura 31 Vivienda tipo en San Cristóbal-Galápagos, Ecuador. Imagen tomada de: <http://www.archdaily.com/>

De acuerdo con este autor, debido a un optimismo común de la población por el crecimiento vertical de sus viviendas, la losa de hormigón forma parte de una primera fase de la construcción. Además, Kennedy sostiene que la inconclusión de las viviendas se respalda en un motivo relacionado al ámbito económico. Debido a que existe una norma de pago de impuestos, donde se estipula que las viviendas en fase de construcción tienen una menor tasa predial, los propietarios optan por dejar sus viviendas inconclusas, y aunque son viviendas de bajo costo y de una sola planta, todas poseen cubiertas de losa de hormigón.

Por otro lado, se tiene una creencia general que la cubierta pesada de hormigón, por sus características materiales, ofrece mejores condiciones térmicas en el interior que la cubierta ligera metálica. Por lo que se puede suponer que el incremento del uso de las cubiertas pesadas de hormigón en esta región tiene un PROPÓSITO TÉRMICO.

Dado que la cubierta ligera metálica y la cubierta pesada de hormigón son las dos tipologías de cubiertas más usadas en esta región, serán estas las que sirvan como CASOS DE ESTUDIO para esta investigación.

1.5.1 LAS NORMATIVAS O REGULACIONES TÉRMICAS.

Las ciudades del Ecuador en general carecen de una normativa específica que regule las consideraciones térmicas de la edificación. Sin embargo existe la Norma Ecuatoriana de la Construcción elaborada en conjunto por la cámara de la construcción y el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda en el año 2011.

Esta norma cuenta con un capítulo dedicado a la Eficiencia Energética, donde se establecen las especificaciones y características técnicas mínimas a ser tomadas en cuenta en el diseño, construcción, uso y mantenimiento de las edificaciones en el país, con el objetivo de reducir el consumo de energía [CCE, 2011].

Es necesario recalcar que este documento toma como base normativas o publicaciones de otros países como: el Código técnico de España, Ordenanza de Chile, Código de Construcción de Bogotá, Regulaciones de eficiencia del Estado de California, etc.

De acuerdo a este documento, las cubiertas de la región Costa, clasificada como zona climática ZT6, deben tener un valor máximo de **transmitancia térmica (U) de $0.75\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$** , tanto para edificaciones que usen o no climatización activa [CCE, 2011]. Por lo cual, para alcanzar estos valores se recomienda el uso de materiales aislantes.

1.6 RESUMEN DEL CAPÍTULO

El clima CÁLIDO-HÚMEDO de la REGIÓN COSTA DEL ECUADOR se caracteriza por las altas temperaturas y los altos niveles de humedad presentes a lo largo de todo el año. Además, debido a su ubicación geográfica, los altos niveles de radiación solar son un factor constante en esta región. Por último, en este capítulo se resalta otra condicionante climática de total relevancia en estas latitudes: la alta nubosidad del cielo, que con frecuencia no es considerada en análisis térmicos o energéticos.

Además, este capítulo destaca al elemento arquitectónico LA CUBIERTA como la superficie de la envolvente que determina las condiciones ambientales interiores de las edificaciones. La importancia de esta superficie se debe a su relación con las características climáticas y urbanas propias de estas regiones.

Primero, por su relación con los recorridos solares, la cubierta es la superficie de la envolvente más expuesta a la radiación solar. Y segundo, por su relación con las características edilicias de estas ciudades, donde prevalecen las viviendas de baja altura y la baja densidad, esta superficie tiene una gran proporción sobre el espacio interior.

Dentro de este contexto, la cubierta es responsable del 55% del total de ganancias de calor en el interior del edificio, incluso por encima de los aportes directos solares a través de las ventanas, y por ende juega un papel determinante en la demanda energética por refrigeración de las viviendas.

Dado que el Ecuador es un país dependiente de energía no renovable, específicamente del petróleo, y el 50% de la demanda nacional se satisface por importación de energía, las estrategias enfocadas a reducir el sobrecalentamiento de la cubierta tendrán un gran impacto no sólo a nivel del confort del usuario sino también en el ámbito energético y económico a nivel país.

Por último, en este capítulo se determina que la cubierta más utilizada en las viviendas de esta región es la CUBIERTA LIGERA METÁLICA (CL). Sin embargo, en las últimas décadas, el uso de la CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN cada vez toma mayor importancia.

En base lo descrito en este capítulo, esta tesis se centra en el COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA, y toma como casos de estudio a las dos cubiertas más utilizadas en esta región.

Capítulo 2

VARIABLES DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO DE LA CUBIERTA



COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

De acuerdo a lo descrito en el primer capítulo, el COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA es fundamental sobre las condiciones ambientales interiores, y además, es una preocupación latente tanto para la población como para los entes reguladores de este país.

Por una parte, las estadísticas censales sugieren que los usuarios en general están optando por materiales de la cubierta con mayor masa térmica para reducir el flujo de calor hacia el interior. Y por otra parte, las entidades reguladoras estipulan que el incremento de la resistencia térmica de la cubierta es la estrategia adecuada en esta región.

No obstante, antes de implementar cualquier estrategia es necesario conocer ¿CUÁLES SON LAS VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA?, tanto las morfológicas (inclinación, orientación, forma) como las de material (reflectividad, emisividad, transmitancia térmica, masa térmica).

Entre estas variables resaltan: la inclinación-orientación, la reflectividad al visible, la emisividad al infrarrojo térmico, masa térmica y una de las más conocidas y utilizadas como estrategia para controlar el flujo de calor: la transmitancia térmica (U) o su inverso la resistencia térmica.

Dadas las condiciones climáticas del Ecuador, nos centraremos en las VARIABLES QUE REDUCEN EL CALENTAMIENTO INTERIOR.

Para entender la influencia de estas variables sobre el comportamiento térmico de la cubierta es necesario comprender el comportamiento físico de estas.

Por lo tanto, la primera parte de este capítulo aborda los flujos de calor y las variables que influyen en el comportamiento térmico de la cubierta, y en consecuencia en el espacio interior.

En la segunda parte se realiza una revisión bibliográfica de estudios previos orientados a reducir el calentamiento interior a través de estrategias enfocadas en las variables de la cubierta.

2.1 COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA.

El comportamiento térmico de la cubierta, al igual que cualquier cuerpo, está determinado por los intercambios de calor que suceden en esta. La transferencia de calor se produce por la diferencia de temperaturas entre dos cuerpos. Este intercambio térmico se clasifica en 3 tipos, de acuerdo a la forma en que se transporta el calor: Convección, Conducción y Radiación.

Por CONVECCIÓN: es el flujo de calor transmitido entre una superficie sólida y un fluido adyacente como el aire o el agua [Holman, 1997].

Por CONDUCCIÓN: es el calor transmitido entre dos cuerpos sólidos en contacto físico. [Holman, 1997].

Por RADIACIÓN: es la energía emitida por la materia como consecuencia de cambios en las configuraciones de los átomos y las moléculas de un cuerpo. Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética, siendo su intensidad dependiente de la temperatura y de la longitud de onda considerada [Holman, 1997].

En términos generales podemos dividir al intercambio por radiación en: RADIACION DE ONDA CORTA con longitudes de onda menor a 4 μm (del cual el 50% corresponde al espectro visible 0.4-0.7 μm , 49% el infrarrojo cercano 0.7- 4 μm , y 1% radiación ultravioleta <0.4 μm), y RADIACIÓN DE ONDA LARGA o radiación térmica con longitudes de onda superiores a 4 μm [Beckers, 2012]. La **Figura 32** muestra el espectro electromagnético con los diferentes rangos de longitud de onda: radiación visible, térmica, infrarroja, etc.

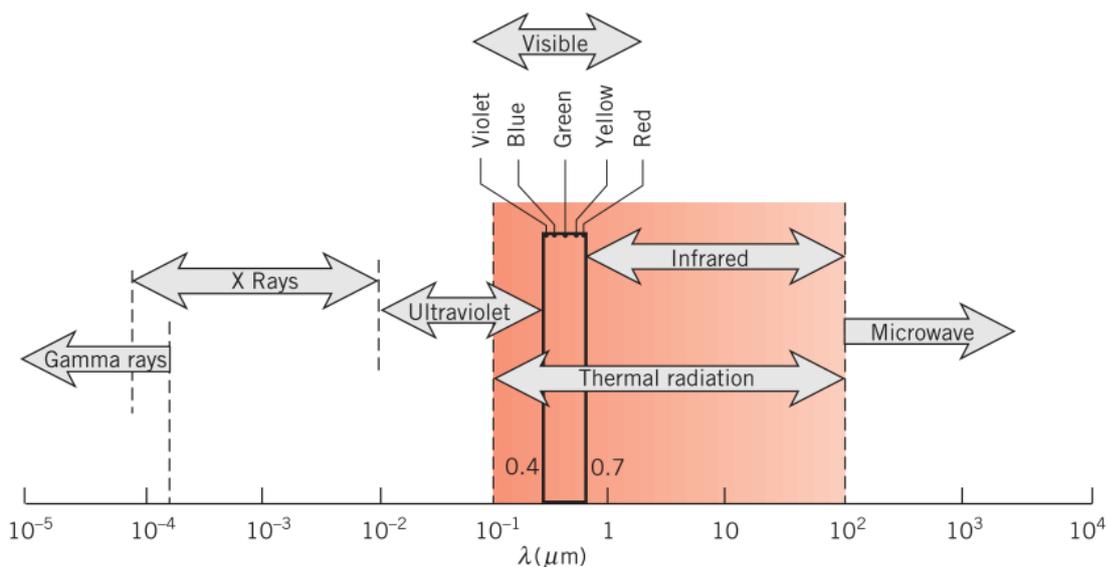


Figura 32 Espectro de la radiación electromagnética. Imagen tomada de [Bergman *et al.*, 2011]

Al igual que otro cuerpo o elemento de la envolvente, la cubierta transmite calor por estos 3 medios de transporte de energía. A continuación se realiza una caracterización de estos intercambios térmicos en la cubierta. La magnitud de estos flujos de calor está condicionada por los factores climáticos de cada región, y modificada por las variables, morfológicas o material, propias de la cubierta.

Los flujos de calor que influyen en el comportamiento térmico de la cubierta se pueden dividir, y simplificar por cada capa de este elemento. En la superficie exterior: radiación solar, radiación de onda larga, y convección, en la capa intermedia: conducción, y en la capa interior: radiación de onda larga y convección, **Figura 33**.

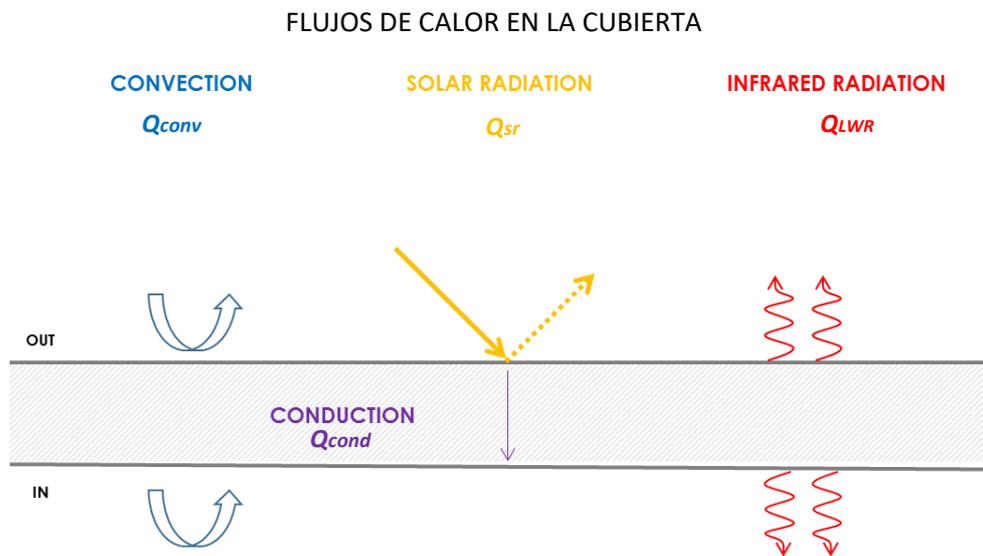


Figura 33 Esquema de los flujos de calor entre el exterior e interior a través de la cubierta.

Los tres intercambios térmicos que suceden en la capa exterior: el flujo de radiación solar (Q_{SR}), el flujo por radiación de onda larga (Q_{LWR}), y el intercambio por convección (Q_{conv}), definen el flujo por conducción (Q_{cond}) hacia el interior, tal como se muestra en Eq. 1.

$$Q_{SR} + Q_{LWR} + Q_{conv} = Q_{cond} \quad \text{Eq. 1}$$

Cada uno de estos intercambios térmicos está definidos por otros parámetros como se indica en Eq 2 [Muscio and Akbari, 2017].

$$I \cdot \alpha + \varepsilon \cdot \sigma (T_s^4 - T_{sky}^4) + h_c (T_s - T_{air}) = Q_{cond} \quad \text{Eq.2}$$

Donde, I es la radiación solar recibida sobre esa superficie (W/m^2), α el factor de absorción de la superficie (0-1), ε es el factor de emisividad de la superficie (0-1), σ la constante de Boltzman, T_s es la temperatura superficial exterior, T_{sky} es la temperatura del cielo ($^{\circ}\text{C}$), h_c es el coeficiente de convección de la superficie de la cubierta ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$) y T_{air} es la temperatura del aire.

De aquí se puede deducir que los intercambios térmicos están condicionados por los factores climáticos propios de cada región. La radiación solar (I) está condicionada por las trayectorias solares y el porcentaje de cielo cubierto; el flujo de radiación de onda larga por la temperatura del cielo (T_{sky}). Por último el flujo por convección por la temperatura del aire y las velocidades del viento que modifican el coeficiente de transmisión por convección (h_c). Otro factor que condiciona el flujo por convección son las precipitaciones, las que definen el flujo de calor por evaporación. Sin embargo, para simplificar este análisis es un parámetro que no se considera.

Por otra parte, estos intercambios térmicos están modificados por los parámetros propios de la cubierta. El factor de absorción (α) modifica el flujo de radiación solar absorbida; el factor de emisividad (ε) modifica el flujo de radiación de onda larga emitida; y el coeficiente de transmisión por convección (h_c) modifica el flujo convectivo. Estos 3 factores están determinados directamente por la materialidad de la superficie. Además, existen otros parámetros morfológicos que modifican estos flujos como la inclinación, la orientación y la forma de la cubierta.

El siguiente intercambio térmico es el flujo de calor que se transmite por conducción, Q_{cond} , desde el exterior al interior o viceversa. Este flujo está en función del coeficiente de transmitancia por conducción (U), $W/m^2.K$, que a su vez depende de las características propias de los materiales que componen la cubierta, y por el diferencial de temperaturas que exista entre la superficie exterior (T_s) e interior de la cubierta (T_{si}), *Eq. 3*.

$$Q_{cond} = U(\Delta T_s - T_{si}) \quad \text{Eq. 3}$$

Aunque este flujo en términos cuantitativos esté condicionado por la transmitancia térmica (U), existe otro parámetro, que es la masa térmica, la cual modifica este flujo en términos de tiempo. La masa térmica está en función del calor específico del material del elemento, la cual modificará el tiempo de retraso del flujo.

Finalmente, los intercambios térmicos que suceden en la superficie interior y modifican directamente el espacio interior, son el flujo por convección y por radiación. Por una parte, el flujo por convección está definido por *Eq.4*.

$$Q_{conv_i} = h_{ci}(T_{si} - T_{ai}) \quad \text{Eq. 4}$$

Donde Q_{conv_i} es el flujo de calor por convección que intercambia con el aire interior (W/m^2), T_{si} la temperatura superficial interior ($^{\circ}C$) y T_{ai} la temperatura del aire interior ($^{\circ}C$). Nuevamente este intercambio térmico dependerá de las características de rugosidad del material que modificarán su coeficiente de transmitancia térmica (h_{ci}), y además por la temperatura que alcance la superficie interior de la cubierta (T_{si}).

Por otra parte, el flujo por radiación está en función del intercambio de la cubierta con cada superficie del interior. El intercambio con cada superficie se define por *Eq. 5*.

$$Q_{LWR_i} = \Sigma A_j \cdot F_{i,j} s(T_{si}^4 - T_{sj}^4) \quad \text{Eq. 5}$$

Donde A_j es el área de la superficie vista por la cubierta (m^2), $F_{i,j}$ es el factor de vista de la cubierta con la superficie A_j , T_{si} la temperatura superficial interior de la cubierta, y T_{sj} la temperatura superficial de A_j .

En base a Eq. 4 y Eq. 5, tanto el intercambio convectivo y radiativo entre la superficie interior de la cubierta y el espacio interior **dependen de manera primordial de T_{si}** . Por tanto, debido a la proporción de la cubierta con respecto al espacio interior, tanto la temperatura del aire interior (T_{ai}), como la temperatura radiante media (T_{mrt}) dependen de la temperatura de esta superficie (T_{si}), las cuáles determinan la temperatura de sensación del usuario, además de la ventilación y la humedad.

En busca de reducir las condiciones de sobrecalentamiento interior, varias estrategias se enfocan en reducir la temperatura del aire interior, a través del uso de sistemas pasivos o activos. Sin embargo, aunque la T_{ai} disminuya, si T_{mrt} no se reduce el discomfort del usuario persistirá. Esta situación se define como asimetría radiante [Fanger *et al.*, 1980][Atmaca *et al.*, 2007] [Kalmár *et al.*, 2012] [d' Ambrosio *et al.*, 2013].

Dadas estas circunstancias, la temperatura radiante media tiene la misma o mayor importancia sobre el confort del usuario que la temperatura del aire, y depende en gran medida de la temperatura superficial interior de la cubierta, T_{si} .

El flujo de calor recibido por una persona desde la cubierta, tal como se muestra en Eq. 5, depende de la T_{si} de la cubierta y del factor de vista $F_{i,j}$ que tiene el usuario de esta superficie. Sin embargo, este flujo también está influenciado por la posición del usuario. Una persona en posición horizontal tiene mayor superficie donde el factor de vista predominante es el de cubierta, que una persona en posición vertical, **Figura 34**.

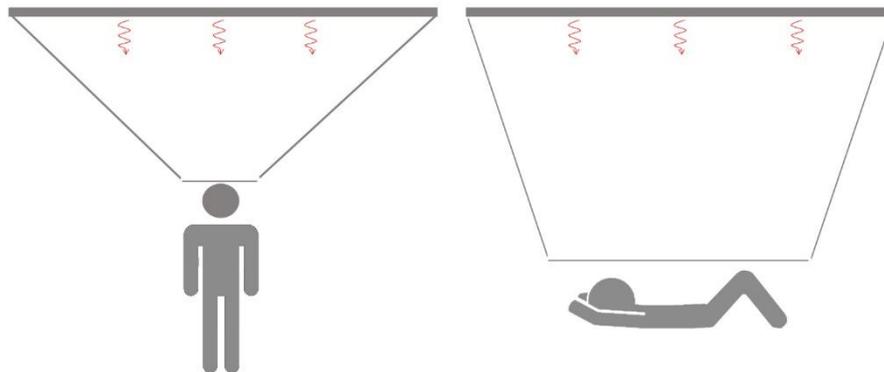


Figura 34 Factor de vista de la cubierta percibido por una persona de pie (izquierda) y una persona acostada (derecha)

Según esta consideración, la T_{si} de la cubierta puede tener un impacto mayor sobre la temperatura de sensación cuando el usuario está acostado, que cuando está de pie, [Vorre, Jensen and Le Dréau, 2015]. Es decir, la temperatura superficial interior en el periodo nocturno tiene un impacto igual o mayor que en el periodo diurno.

En consecuencia, la T_{si} de la cubierta es un parámetro que describe el comportamiento térmico de la cubierta en función de todos los intercambios térmicos que suceden en ella, y además es un parámetro de referencia del comportamiento de la T_{ai} y principalmente de la T_{mrt} .

Conforme a todo lo expuesto, las variables que modifican los intercambios térmicos que suceden en la cubierta son: la inclinación, orientación, forma, factor de absorción solar, emisividad, masa térmica y los coeficientes de transmitancia por convección y conducción.

Por otra parte, los factores climáticos que condicionan estos flujos son: los recorridos solares, el porcentaje de cobertura del cielo, la temperatura del cielo, y los vientos. La **Figura 35** muestra un esquema de la relación entre estos intercambios, los parámetros de la cubierta y los factores climáticos.

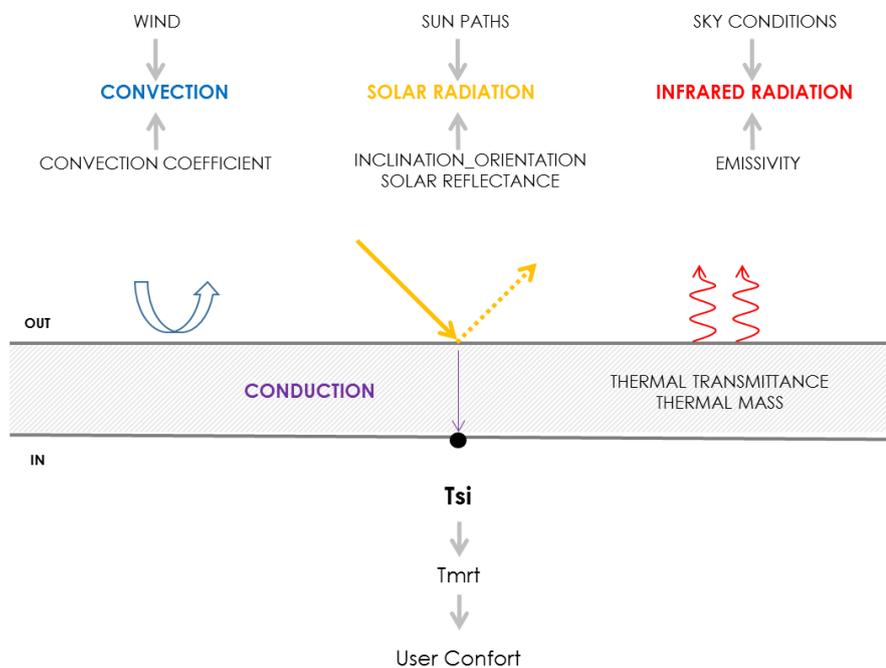


Figura 35 Variables de la cubierta y factores climáticos que modifican y condicionan respectivamente los flujos de calor a través de este elemento.

2.2 VARIABLES DE LA CUBIERTA ORIENTADAS A LA REDUCCIÓN DEL CALENTAMIENTO INTERIOR: LITERATURA PREVIA

Una vez detallados los factores que condicionan y las variables que modifican el comportamiento térmico de la cubierta, este apartado se centra en estudios previos que evalúan estrategias aplicadas a las variables de la cubierta para la reducción del sobrecalentamiento interior.

El estudio de estas variables ha sido el centro de numerosas investigaciones previas. Tales investigaciones abordan un sin número de estrategias, desde las cubiertas verdes, cubiertas frescas (cool roof), cubiertas ventiladas, hasta cubiertas estanque, aplicadas en diferentes climas cálidos: cálido-árido, cálido-húmedo, etc.

Las investigaciones revisadas a lo largo de este apartado han sido seleccionadas por haber sido realizadas en regiones con clima cálido-húmedo y latitudes bajas, similares al caso de estudio (región Costa del Ecuador); y además, porque se enfocan en el análisis de cubiertas metálicas y cubiertas de hormigón.

El repaso de estas investigaciones tiene como objetivo el análisis de las ventajas y desventajas de las estrategias planteadas, además de las similitudes y diferencias de los climas analizados con el clima de referencia de esta tesis.

Estos estudios se han ordenado en función de la variable en la que actúan. A partir del análisis general del comportamiento térmico de la cubierta realizado en el apartado anterior, las investigaciones repasadas se han ordenado de la siguiente manera.

INCLINACIÓN-ORIENTACIÓN

REFLEXIÓN

EMISIVIDAD

MASA TÉRMICA-TRANSMITANCIA TÉRMICA

DOBLE PIEL

2.2.1 INCLINACIÓN Y ORIENTACIÓN

Los parámetros de la inclinación y orientación de la cubierta, o de cualquier elemento de la envolvente, interactúan de manera directa con el flujo de radiación solar recibido. La inclinación en específico, además de influir sobre el flujo solar, repercute sobre el flujo de calor emitido hacia el cielo. Consecuentemente, el impacto de estas dos variables sobre estos flujos tiene una gran repercusión sobre el comportamiento térmico de la cubierta.

En climas cálidos, la inclinación y la orientación de la cubierta han sido de las variables de diseño más fundamentales para reducir la captación de la radiación solar. El uso de cubiertas inclinadas ha sido extensamente utilizado en climas cálido húmedo y de latitudes bajas, para protegerse del flujo solar y las constantes lluvias [Olgay, 1963][Al-Obaidi, Ismail and Abdul Rahman, 2014] [Ghaedi, Ghaedi and Ghaedi, 2012]. En cambio, los techos planos u horizontales en estas regiones no son aconsejables, ya que pueden recibir hasta el 50% más de radiación solar que los techos inclinados [EnergyStar, 2010].

Numerosos estudios han abordado el estudio de la inclinación y la orientación en diferentes climas cálidos y latitudes. Por ejemplo, **MASOUD** se centra en la influencia de estas dos variables sobre la radiación recibida sobre una cubierta en la ciudad de Jeddah-Arabia Saudí (21°N). En este estudio se analiza las inclinaciones: 0°, 15°, 30° y 45°, y con diferentes orientaciones. De acuerdo a los resultados de este estudio la orientación de la cubierta es el parámetro con mayor influencia sobre la radiación recibida. La orientación norte es la que menor radiación recibe, por el contrario la orientación sur que es la que mayor radiación recibe durante todo el año. Además, este estudio determina que la inclinación efectivamente reduce la cantidad de radiación recibida.

El análisis de esta investigación fue llevado a cabo a través de simulaciones con el uso del software Heliodón 2.6. Es necesario mencionar que este software sólo considera la componente directa para el cálculo de la radiación solar recibida. Debido a las características climáticas de la región de este estudio, donde la componente directa es predominante sobre la radiación global, la consideración de la componente difusa en los resultados no ha sido relevante y por lo tanto no ha sido tomado en cuenta [Badia Masoud, 2014].

Por otra parte, **[DÍAZ, 2012]** aborda la influencia de la inclinación sobre la temperatura superficial interior de la cubierta. El estudio se lleva a cabo a través de un proceso de cálculo, y se enfoca en un clima cálido-húmedo a una latitud de 18°N (Baní-República Dominicana). El modelo de estudio es una cubierta de zinc a dos aguas con una orientación de la cumbrera norte-sur. Las inclinaciones que se analizan son 15° y 30°. Las condiciones climáticas que se toman para el cálculo son las de un día tipo en la temporada de verano: radiación solar 6kWh/m² y temperatura media de 25°C.

De acuerdo a los resultados de este estudio, **Figura 36**, la diferencia de temperaturas entre la inclinación de 15° y 30° es relevante. La temperatura de la cubierta con la inclinación de 30° mantiene una temperatura de 4°C menor que la cubierta con inclinación de 15° durante todo el periodo diurno. Mientras que en el periodo nocturno las dos cubiertas tienen la misma temperatura que el aire.

Este estudio determina la relevancia de la inclinación sobre la temperatura de la cubierta. No obstante, es necesario mencionar que el modelo de cálculo de este estudio considera un coeficiente de transmisión de la superficie exterior constante y común para las dos inclinaciones, y por tanto en el cálculo no toma en cuenta el efecto de la inclinación sobre la radiación de onda larga.

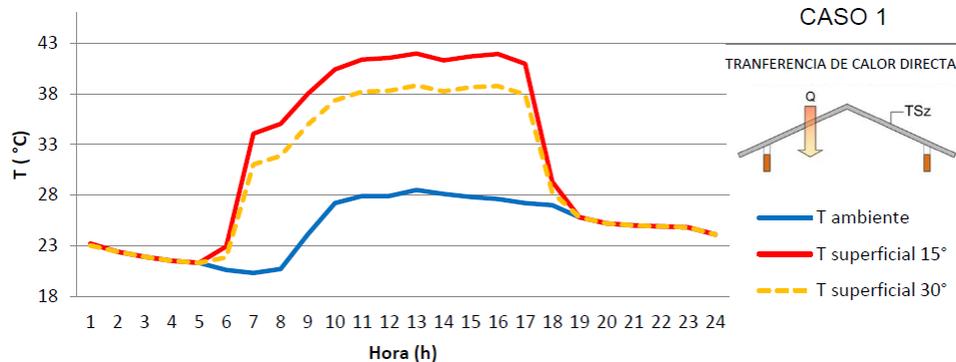


Figura 36 Temperatura superficial interior de la cubierta con diferentes inclinaciones. Imagen tomada de [Díaz, 2012]

Otro estudio realizado por **JAYASINGHE** en Colombo-Sri Lanka (latitud 6°54'N) analiza, a través de simulaciones en los meses de diciembre, junio y marzo, el efecto de la orientación de la cubierta sobre la temperatura superficial interior del cielo raso. El modelo de simulación tiene una cubierta a dos aguas, con una inclinación de 10°, y se han evaluado las orientaciones norte-sur y este-oeste. Colombo cuenta con un clima cálido-húmedo, y la proporción de radiación difusa-radiación normal directa sobre el plano horizontal, es de 1 a 5. Aún en este clima, se muestra la predominancia de la radiación directa sobre la difusa.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye que el efecto de la orientación en esta región es insignificante. La mayor diferencia entre la orientación norte-sur y este-oeste se presenta en diciembre, con una diferencia de 0.5°C, entre 31,2°C y 31.7°C respectivamente. En el mes de marzo, cuando el sol es muy vertical en esta latitud, la diferencia entre las dos orientaciones no supera los 0.15°C. Estos resultados se deben, por una parte, a la perpendicularidad sobre el plano horizontal de los rayos solares en esta región especialmente en marzo, y por otra parte, a la simetría de la localización geográfica y más aún por la simetría de la propia cubierta. Sin embargo, la influencia de otro factor que es necesario mencionar es la inclinación. Aún con la pequeña inclinación con la que cuenta la cubierta, se nota una notable diferencia entre el faldón de la cubierta con inclinación norte y el de inclinación sur. La mayor diferencia es en diciembre, 2.5°C, cuando el sol tiene su menor inclinación. Con lo cual se puede observar la fuerte influencia de este parámetro en este clima [Jayasinghe, Attalage and Jayawardena, 2003].

Conforme a todo lo expuesto, se ratifica que la inclinación y orientación de la cubierta tienen una fuerte influencia sobre el comportamiento térmico de la cubierta. Sin embargo, debido a que en estos climas la mayor parte de la radiación solar global proviene de la componente directa, el efecto de la radiación difusa no se ha desarrollado a detalle o más aún no se ha tomado en cuenta. Para climas con mayor nubosidad, como es el clima de referencia de esta tesis, la consideración de esta componente será indispensable para el análisis de las variables de la inclinación y la orientación, tanto su repercusión sobre el flujo de radiación solar recibida, como sobre el flujo de radiación de onda larga emitida que no se ha considerado en ninguna de las investigaciones mencionadas.

2.2.2 PROPIEDADES RADIATIVAS: REFLECTIVIDAD Y EMISIVIDAD.

La reflectividad y emisividad de la cubierta, además de la inclinación y orientación, son las variables que interactúan directamente con el flujo solar y la radiación de onda larga emitida. La reflectividad es una propiedad de los materiales que determina la fracción reflejada de la radiación solar (radiación visible y radiación en el infrarrojo cercano) incidente sobre un plano. [Berdahl and Bretz, 1997] [Bergman *et al.*, 2011]. Por otra parte el factor de emisividad se define como la eficacia de la superficie de un material para emitir energía como radiación térmica (radiación en el infrarrojo térmico o radiación de onda larga) [Trefil, 2003]. Por tanto la importancia de la reflectividad y la emisividad como estrategias para reducir el sobrecalentamiento de la cubierta, depende de la cantidad de energía reflejada y emitida respectivamente.

El uso de materiales con alta reflectancia solar en toda la envolvente es una de las estrategias pasivas más utilizadas en climas cálidos y con alta radiación solar [Koenigsberger *et al.*, 1975]. La efectividad de esta estrategia ya se ha consolidado desde mucho tiempo atrás en diferentes pueblos históricos como: Sevilla, Córdoba, Santorini, Rabat, etc; donde la característica visual primordial es el color blanco de sus viviendas. Dada su importancia, numerosos estudios se han enfocado en el efecto de este parámetro sobre el desempeño térmico de la cubierta. Estos trabajos comprueban la eficacia de esta estrategia a nivel de confort térmico, energético y económico [Akbari and Konopacki, 1998]. Varios autores afirman, que el uso de la alta reflectividad tiene la misma influencia sobre la reducción de las temperaturas interiores, que el uso de materiales aislantes en este elemento [H. Akbari, S. Konopacki, 2000][ANSI/ASHRAE, 2001].

Los estudios previos a esta tesis han abordado el impacto de esta estrategia sobre diferentes tipologías de cubierta, acabados o materiales; con diferentes resultados en diferentes tipos de clima.

[TONG ET AL., 2014] analiza el efecto de este parámetro sobre una cubierta de forjado de hormigón en Singapur. Esta ciudad cuenta con una condición climática y geográfica similar a la ciudad de referencia de esta tesis: clima cálido-húmedo y una latitud de 1°16'N. A través de los datos históricos meteorológicos de esta ciudad, este estudio ha establecido las características climáticas del día de análisis: una radiación solar promedio anual de 5.1 kWh/m² y una temperatura media anual de 27°C.

Este estudio fue realizado a través de simulaciones basadas en el modelo de cálculo CFFT (Complex Finite Fourier Transform) [Yumrutaş, Ünsal and Kanoğlu, 2005]. Los resultados obtenidos de las simulaciones fueron validados a través de mediciones experimentales. La discrepancia entre los dos resultados fue del 7% y 9% de acuerdo a los parámetros indicativos MBE y CVRSMSE respectivamente [Raftery, Keane and Costa, 2011]. Hay que recalcar que para los datos de entrada de las simulaciones se utilizaron los datos medidos *in situ*, en lo que respecta a radiación solar, temperatura del aire, vientos, etc. Sin embargo para el cálculo del flujo radiativo se hizo una aproximación de la temperatura del cielo sugerida por Swinbank [Swinbank, 1963]. Los cálculos de este flujo se han realizado para condiciones de cielo totalmente despejado.

La cubierta estudiada en la investigación de Tong está compuesta por un forjado de hormigón de 15 cm más un enlucido de cemento de 1 cm. Las variaciones del factor de reflectancia solar van de 0.1 a 0.9. Los resultados obtenidos de este estudio, **Figura 37**, muestran que la temperatura máxima interior de la cubierta se reduce 2°C por cada incremento de 0.2 de este parámetro, es decir una máxima reducción de 8°C, con lo cual su temperatura se reduce 3°C por debajo del aire. Mientras que en el periodo nocturno, la diferencia de temperatura entre las variaciones de reflexión de 0.1 a 0.9, va desde 0.5°C en el primer periodo nocturno hasta 3°C en el segundo periodo nocturno.

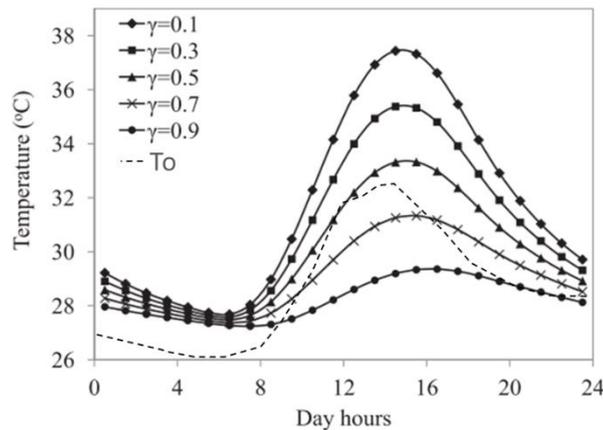


Figura 37 Temperatura superficial interior de la cubierta de hormigón con diferentes factores de reflectividad (γ).
 Imagen tomada de [Tong *et al.*, 2014]

Los resultados de esta investigación ratifican la gran influencia de la reflectividad sobre la reducción de la temperatura de la cubierta de hormigón en este clima, con un mayor impacto en el periodo diurno que en el periodo nocturno. Hay que recalcar que las simulaciones se han centrado en un día con cielo despejado, por lo que la influencia de la nubosidad del cielo para el cálculo del flujo radiativo no se ha tomado en cuenta. Sin embargo para climas con mayor nubosidad las condiciones térmicas del cielo será un parámetro indispensable para la correcta validación de los resultados, especialmente en el periodo nocturno donde el mayor intercambio de la cubierta es el flujo de onda larga emitido hacia el cielo.

Otros autores se han centrado en el efecto de la reflectividad en otros tipos de cubierta como las láminas metálicas. **SUEHRCKE** analiza el impacto de un recubrimiento de pintura con alta reflectancia solar ($r=0.8$) sobre una cubierta de acero galvanizado en un clima cálido (Tonsville-Australia), con una radiación solar promedio de 6 kWh/m² y una temperatura media de 25°C. La cubierta analizada cuenta con una lámina de acero galvanizado de 3 mm de espesor más un falso techo de 1 cm separados por una cámara de aire de 15 cm, [Suehrcke, Peterson and Selby, 2008].

Los resultados de este estudio, **Figura 38**, muestran 4 días de mediciones, divididos en dos partes: antes y después de la aplicación de la pintura reflectante. Según estos resultados, la temperatura máxima exterior de la cubierta (línea roja) se reduce 23°C después de la aplicación de la pintura, mientras que la temperatura máxima interior del cielo raso (línea cyan) se reduce 5°C. Es decir, el incremento de la reflectividad tiene una gran repercusión en la capa exterior y en la capa interior.

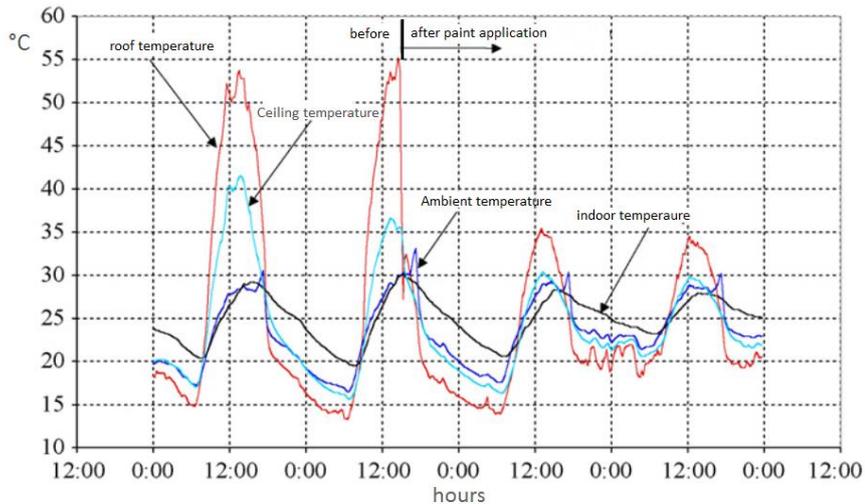


Figura 38 Mediciones de las temperaturas de una cubierta de lámina de acero en Tonsville-Australia, antes y después de la aplicación de una pintura de alta reflectancia solar. Imagen tomada de [Suehrcke, Peterson and Selby, 2008]

Durante todo el periodo nocturno (antes y después de la aplicación de la pintura), la capa exterior (línea roja) tiene temperaturas menores que el ambiente exterior (línea azul), lo cual denota la alta capacidad de enfriamiento radiativo que tiene el cielo en este clima. En cambio, la capa interior (línea cyan) antes de la aplicación de pintura tiene temperaturas iguales a la temperatura ambiente en este periodo, y después de la aplicación de pintura se reduce 2°C por debajo de esta.

La aplicación de esta pintura sobre esta cubierta ha tenido una gran repercusión sobre la reducción de la temperatura superficial exterior de la cubierta metálica. Sin embargo, la relevancia de este recubrimiento sobre este material no sólo depende de la modificación de su factor de reflectividad, sino también de la modificación del factor de emisividad. En la noche, debido al incremento de su emisividad y a la alta capacidad de enfriamiento del cielo, la capa interior de la cubierta se reduce inclusive por debajo de la temperatura ambiente exterior.

En consecuencia, los resultados de este estudio muestran que el incremento de la reflectividad y la emisividad de la cubierta de lámina de acero, sumado a la alta capacidad de enfriamiento del cielo, condición característica de este clima (Australia), repercuten sustancialmente sobre la reducción de la temperatura de la cubierta en el periodo diurno y nocturno.

Hasta ahora las investigaciones descritas evalúan el efecto de pinturas COOL ROOF de manera independiente sobre cubiertas metálicas y sobre cubiertas de concreto en diferentes regiones. En el siguiente estudio, [ZINGRE ET AL., 2014], se ha comparado el efecto de este recubrimiento sobre estas dos cubiertas de manera conjunta, dado que son las más utilizadas en la ciudad de Singapur, donde se realizó este estudio. El clima de esta ciudad es cálido húmedo. El estudio fue llevado a cabo con un proceso de cálculo (Cool roof heat transfer) y validado con datos medidos. Las condiciones climáticas de la fase de experimentación y usados para las simulaciones pertenecen a un día soleado con cielo despejado: radiación solar 5.5 kWh/m², temperatura del aire 27.5°C y temperatura del cielo promedio de 7°C, **Figura 39**.

Cabe mencionar que todos estos datos climáticos han sido tomados de mediciones *in situ*, con excepción de la temperatura del cielo que ha sido estimada por cálculo a partir de la temperatura del aire considerando un cielo despejado.

De acuerdo a la **Figura 39**, los valores obtenidos de la simulación (Fourier series) tienen una gran concordancia con los valores medidos (Experiment), por lo que el modelo de cálculo (CRHT) muestra una gran validez. Sin embargo este proceso de validación se ha realizado sólo en la cubierta de hormigón, para luego aplicarse a la simulación de la cubierta de metal.

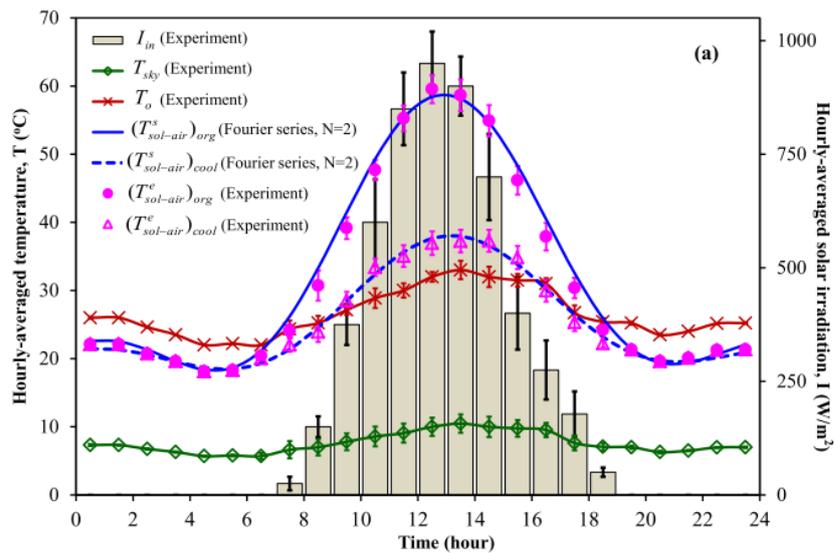


Figura 39 Factores climatológicos medidos, y temperatura de la cubierta de hormigón medida y calculada con y sin recubrimiento de pintura cool roof. Imagen tomada de [ZINGRE ET AL., 2014]

Conforme a estos primeros resultados, el incremento de la reflectividad repercute con una reducción máxima de 25°C de la temperatura superficial exterior (línea azul entrecortada) en el periodo diurno. Sin embargo, en el periodo nocturno, este incremento tiene una influencia casi nula. Es importante hacer notar que la temperatura de esta superficie se reduce casi inmediatamente por debajo de la temperatura del ambiente exterior (T_o) en el momento que el sol desaparece, manteniéndose 5°C por debajo durante casi toda la noche. Al igual que en el estudio anterior, este comportamiento denota la fuerte influencia del enfriamiento radiativo en esta región durante el periodo nocturno. Por lo tanto el incremento de la reflectividad tiene poco impacto en este periodo.

En cuanto a las SIMULACIONES de este estudio, los parámetros usados para la cubierta de concreto cuenta son una resistencia a la conducción de 0.111 m².K/W y un espesor de 0.1m, reflectividad de 0.3, y una emisividad de 0.9. Mientras que la cubierta de lámina de acero galvanizada tiene una resistencia conductiva de 0.001 m².K/W con un espesor de 8 mm, 0.6 de reflectividad y 0.3 de emisividad. Ninguna de las dos cubiertas posee aislamiento. Para analizar el efecto de estas estrategias, a las dos superficies se les ha aplicado una pintura cool roof con una reflectividad al visible de 0.74 y una emisividad al infrarrojo térmico de 0.9.

Conforme a los resultados de las simulaciones, **Figura 40**, el impacto de la pintura cool roof sobre la cubierta de concreto, que aumenta su reflectividad de 0.3 a 0.74, muestra una reducción en el máximo de la temperatura superficial interior (T_{si}) de 8.3°C, de **35°C a 26.7°C**. Por otra parte la influencia de esta estrategia sobre la cubierta de acero galvanizado, que aumenta su reflectividad de 0.6 a 0.74 y su emisividad de 0.3 a 0.9, reduce su temperatura 5°C, de **50°C a 45°C**. Mientras que en el periodo nocturno, la cubierta de concreto tiene una reducción máxima de 4.3°C, de **29.3°C a 25°C**, en cambio la cubierta de lámina disminuye 2°C su temperatura, de **30°C a 28°C**.

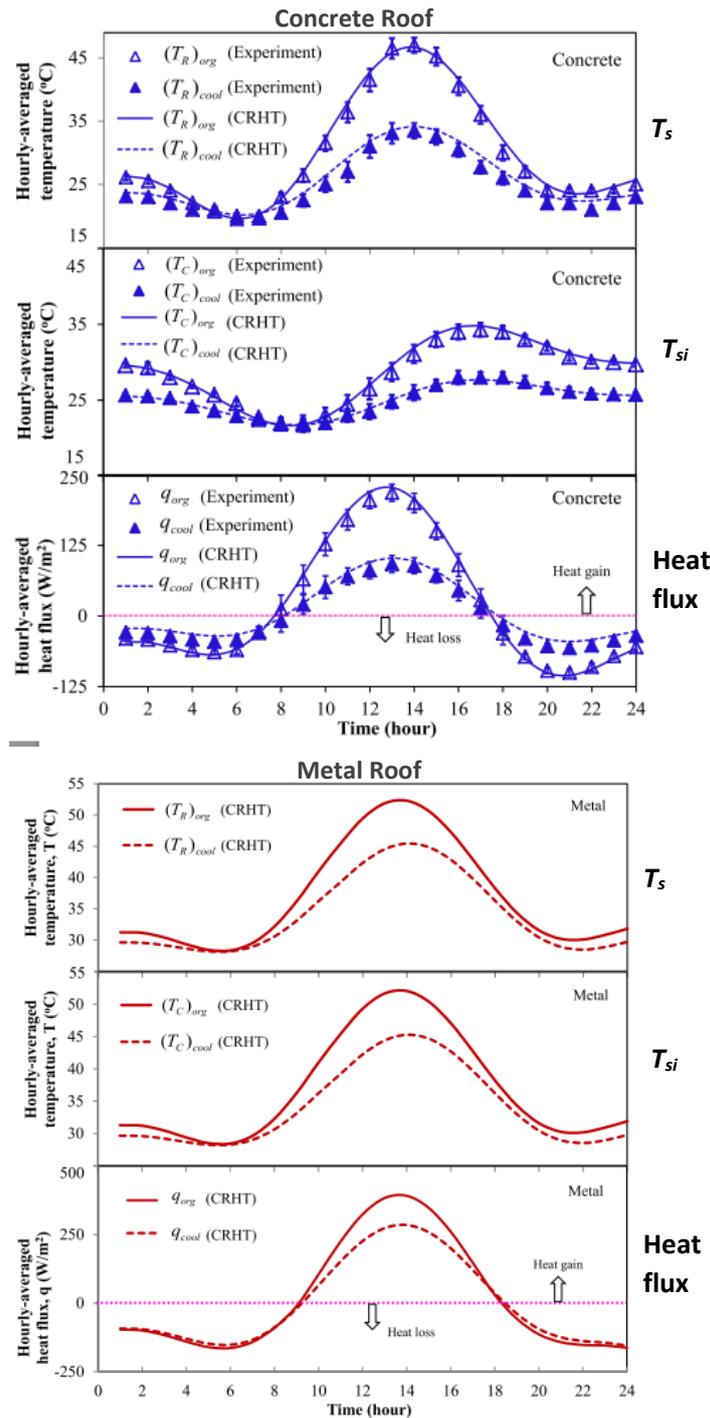


Figura 40 Temperatura superficial exterior (T_s), interior (T_{si}) y flujo de calor (Heat flux) de la cubierta de hormigón (arriba) y la cubierta metálica (abajo) con y sin recubrimiento cool roof. Imágenes tomadas de [Zingre *et al.*, 2014]

Tanto en el día como en la noche el efecto de la pintura cool roof tiene un mayor impacto en la cubierta de concreto que en la cubierta de lámina de acero galvanizado. Lo que significa, que el incremento de la reflectividad en la cubierta de concreto tiene un mayor efecto sobre la reducción de la temperatura superficial interior, que el incremento de la reflexión y la emisividad en la cubierta de lámina de acero galvanizado.

Si comparamos las temperaturas finales de las dos cubiertas después del recubrimiento cool roof, la temperatura superficial interior de la cubierta de lámina de acero galvanizado es **17°C y 3°C** más alta que la cubierta de concreto en el periodo diurno y nocturno respectivamente, **Figura 40**.

A través de esta investigación se ha podido observar de manera conjunta el desempeño térmico de estas dos cubiertas en su estado original y su respuesta ante la influencia del recubrimiento cool roof, en un clima similar al estudiado en esta tesis. De donde se obtiene como resultado que **LA CUBIERTA DE HORMIGÓN OFRECE UN MEJOR DESEMPEÑO TÉRMICO QUE LA CUBIERTA DE METAL EN ESTE CLIMA**, antes y después de las estrategias aplicadas.

Dadas las propias características de cada superficie, este recubrimiento tiene diferentes repercusiones en cada una de ellas. En la cubierta metálica incrementa tanto la reflectividad y la emisividad, con lo cual tiene un gran impacto sobre el flujo solar recibido en el periodo diurno, y sobre el calor emitido en el periodo diurno y en el nocturno, respectivamente.

En la cubierta de hormigón, dado que este recubrimiento sólo incrementa su reflectividad, sólo tiene una repercusión en el flujo solar en el periodo diurno.

Aunque en menor medida que el incremento de la reflectividad, la emisividad tiene un alto impacto sobre la reducción de las temperaturas de la cubierta.

Tabla 2 Emisividad de 16 recubrimientos de cubierta. Datos tomados de [Synnefa, Santamouris and Livada, 2006]

Samples	Infrared emittance (Error = ±0.01)
S1	0.68
S2	0.92
S3	0.93
S4	0.93
S5	0.91
S6	0.71
S7	0.91
S8	0.91
S9	0.89
S10	0.49
S11	0.89
S12	0.35
S13	0.90
S14	0.89
S15	0.89
S16	0.91

En el estudio de [SYNNEFA ET AL., 2006], se aborda la influencia de la emisividad sobre la temperatura de varias superficies. Este estudio analiza 16 superficies pintadas con diferentes recubrimientos que poseen similar reflectancia solar (>0.8) pero con diferente factor de emisividad **Tabla 2**.

El estudio fue llevado a cabo a través de experimentaciones en la ciudad de Atenas, durante los meses de agosto, septiembre y octubre. Las condiciones climáticas de este periodo de análisis corresponden a días soleados con cielo despejado, donde la radiación solar es de 7, 6 y 5 kWh/m² (radiación difusa 25% de la radiación global) y temperaturas medias de 30, 26 y 22°C, para los tres meses respectivamente. Los recubrimientos utilizados varían de pinturas acrílicas a pinturas de aluminio. El análisis de las temperaturas superficiales se realiza en el periodo diurno y nocturno.

De acuerdo a los resultados de este estudio, **Figura 41**, la muestra con menor temperatura en el periodo nocturno es la S4 y la de mayor temperatura la S12. La emisividad de estas muestras coinciden con la más alta y más baja respectivamente.

Por otra parte en el periodo diurno, las muestras con mayor temperatura son la S10, S6, S1, y S7. Con excepción de S7, todas estas muestras tienen un recubrimiento de aluminio, es decir tienen una alta reflectancia solar pero bajos valores de emisividad, por lo cual sus temperaturas son las más altas.

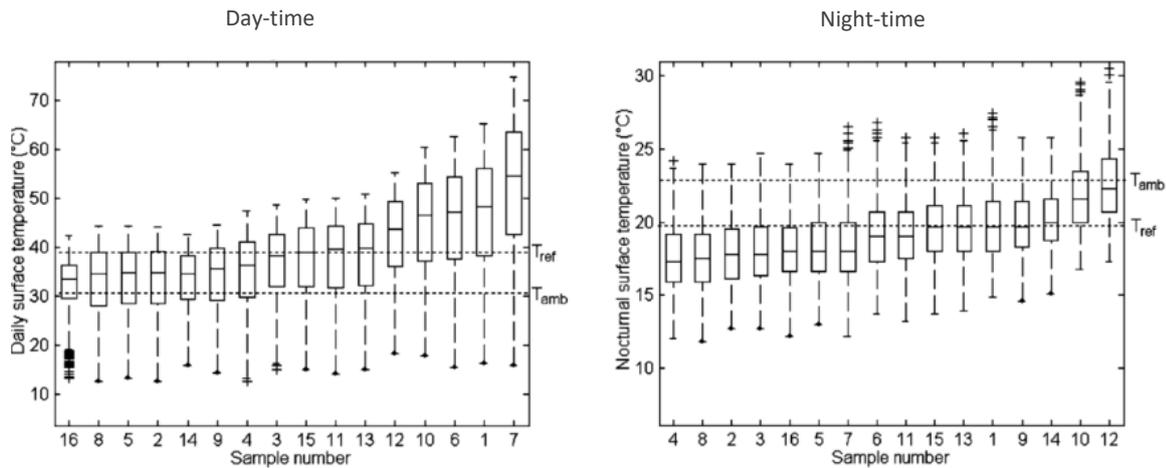


Figura 41 Temperatura superficial promedio del periodo diurno (izquierda) y nocturno (derecha) de 16 recubrimientos en cubierta con diferente emisividad. Imagen tomada de [Synnefa, Santamouris and Livada, 2006]

En el caso de S7, esta muestra tiene un recubrimiento con baja reflectividad pero con alta emisividad, sin embargo aún con una reflectividad de 0.2 su temperatura es muy similar a S1 que posee una reflectividad de 0.8. Esto ratifica que la temperatura de las superficies en el periodo diurno depende de igual manera de las dos propiedades radiativas.

Mientras que, en el **periodo nocturno**, debido a la ausencia de la radiación solar, **la emisividad se convierte en el factor predominante sobre el comportamiento térmico de las superficies.**

Cabe mencionar que en este periodo **todas las temperaturas de las superficies son menores que la temperatura del aire exterior (T_{amb})**, inclusive las superficies con baja emisividad están 1°C por debajo, mientras que las superficies con alta emisividad están entre 3 y 6°C . Nuevamente resalta la alta capacidad de enfriamiento del cielo en estos climas.

Como ya se ha detallado anteriormente, el flujo de calor emitido por estos materiales, además de depender del factor de emisividad de cada material, está condicionado por la capacidad de enfriamiento radiativo del cielo o de manera específica por temperatura del cielo (T_{sky}). Como se ha visto hasta ahora, la influencia de esta condicionante climática es de total importancia en el desempeño térmico de las cubiertas en el periodo nocturno. Por lo que a continuación se realiza un repaso del efecto de este flujo sobre las cubiertas.

– **ENFRIAMIENTO RADIATIVO**

Como se muestra en el estudio anterior, [Synnefa, Santamouris and Livada, 2006] **Figura 41**, debido a la alta capacidad de enfriamiento del cielo del lugar donde se realizó esta experimentación, Atenas-Grecia, todas las cubiertas mantienen una temperatura menor que la temperatura ambiente exterior (T_{amb}), incluso las muestras con baja emisividad. La temperatura del cielo en los climas de latitudes medias se caracteriza por ser baja, debido a la escasa nubosidad del cielo, que es consecuencia del bajo porcentaje de humedad relativa en estas regiones.

EL enfriamiento radiativo se ha consolidado como una estrategia para reducir el sobrecalentamiento de la cubierta, la cual utiliza el cielo como disipador de energía a través de la transferencia de calor por radiación de onda larga [Geetha and Velraj, 2012][Kamal, 2012].

Esta estrategia se basa en la idea de que cualquier objeto con una temperatura mayor que el 0 absoluto ($0^{\circ}K$) emite energía en forma de radiación electromagnética. El intercambio radiativo a diferencia del flujo solar sucede tanto en el día como en la noche, por lo que esta estrategia puede dar tan buenos resultados como el sombreado o la reflectividad.

El flujo emitido hacia el cielo varía de región a región, y depende de la temperatura del cielo que a su vez depende de diferentes condiciones climáticas como: vapor de agua, humedad, presión atmosférica, temperatura del aire, etc [Wilson and Jetz, 2016].

Por ejemplo, en Estados Unidos de Norte América, en el mes de julio este flujo alcanza entre 250 a 450 W/m^2 en el periodo nocturno [Al-Obaidi, Ismail and Abdul Rahman, 2014].

En Terrassa – España ($41^{\circ}N$), **Figura 42**, de acuerdo a mediciones realizadas por el autor de la presente tesis en julio de 2015, en un día con el cielo totalmente despejado (radiación solar promedio 280 W/m^2), el flujo de onda larga neto promedio emitido es de 120 W/m^2 , con un máximo de 190 W/m^2 y un mínimo de 100 W/m^2 durante la noche [Torres-Quezada, 2015]. Valores similares se muestran en París, para un cielo despejado, 90 W/m^2 [Loudon, 1968].

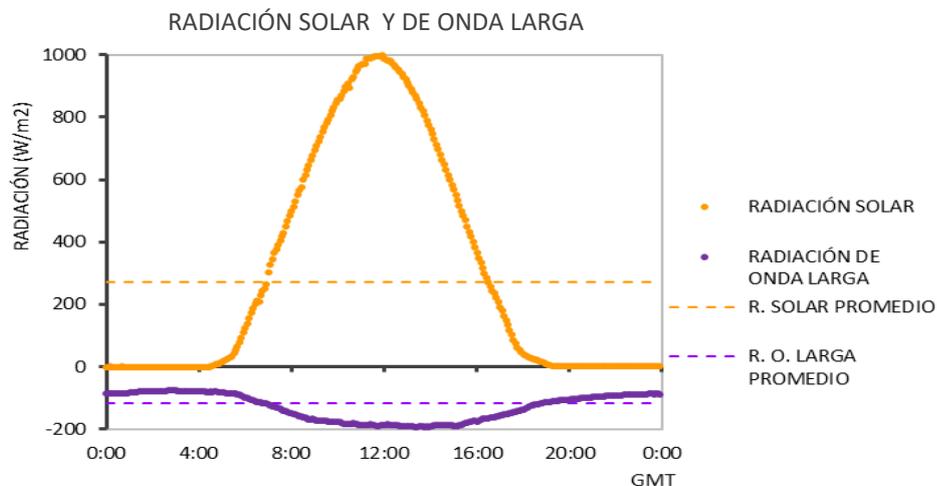


Figura 42 Flujo de radiación solar y radiación de onda larga neta medido sobre una cubierta en Terrassa, España. Imagen tomada de [Torres-Quezada, 2015].

Todos estos flujos fueron medidos en regiones de latitudes medias y en condiciones de cielo despejado, sin embargo, si consideramos la nubosidad del cielo, este flujo se puede reducir hasta 15 W/m^2 para un cielo totalmente cubierto [Loudon, 1968].

Por tanto, la diferencia del flujo de onda larga entre un cielo despejado y un cielo cubierto será relevante sobre el comportamiento térmico de la cubierta. Dado que la mayoría de estudios se centran en latitudes medias, donde el porcentaje de nubosidad es reducido, las investigaciones para caracterizar este flujo y sus repercusiones sobre los intercambios radiativos de una superficie se han enfocado en cielos despejados [Swinbank, 1963][Berdahl and Fromberg, 1982]

En consecuencia, **LA INFLUENCIA DE LA NUBOSIDAD SOBRE LA CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO DEL CIELO HA SIDO POCO ESTUDIADA**, y cualquier definición cuantitativa de este flujo es una aproximación a partir de modelos basados en cielos despejados [Alados-Arboledas, Vida and Olmo, 1995][Boulifa *et al.*, 2015].

– ENVEJECIMIENTO

A través del repaso de todos estos estudios se ha podido ratificar la capacidad de enfriamiento que tiene la superficie de una cubierta en función de sus propiedades radiativas, LA EMISIVIDAD y en especial la REFLECTIVIDAD. Sin embargo, una de las mayores desventajas que ha sido estudiada en varios trabajos es el decremento del factor de reflectividad con el paso del tiempo.

Debido a las inclemencias climáticas y de la intemperie: radiación solar, variaciones de temperatura, lluvia, etc; conjuntamente con la acumulación del polvo debido a las bajas pendientes que posee, la reflectancia solar de la cubierta es la superficie que mayor reducción presenta de toda la envolvente [Berdahl *et al.*, 2008][Noelia, Erica and Alicia, 2014].

Varios autores afirman que la principal reducción de reflectancia solar(15-30%), tanto en cubiertas metálicas como cubiertas de concreto con o sin recubrimiento, sucede en el primer año de uso [Bretz and Akbari, 1997][Eilert, 2000]. La reflectancia solar de una cubierta de lámina de acero galvanizado en su estado nuevo es de 0.75, y el efecto del envejecimiento reduce este parámetro a valores alrededor de 0.55, una reducción de 0.2 aproximadamente [Akbari *et al.*, 2005][Prado and Ferreira, 2005][Akbari *et al.*, 2006]. Un decremento similar presentan las cubiertas de hormigón sin ningún tipo de recubrimiento, 0.15-0.2, sin embargo sus valores en estado nuevo son de 0.4 y después de varios años de uso llegan a reducirse hasta 0.2 [ASHRAE, 1993][Akbari *et al.*, 2005][Akbari *et al.*, 2006].

El efecto del envejecimiento se ha centrado en el factor de la reflectancia solar, tanto en cubiertas metálicas como de concreto. Sin embargo, el impacto de esta condicionante sobre el factor de la emisividad ha sido poco estudiado. Debido a que los materiales metálicos poseen una baja emisividad, el cambio de las propiedades de la superficie debido a diferentes factores podría representar un cambio positivo para estas superficies.

CONFORME A TODO LO EXPUESTO EN ESTE APARTADO, se ha podido ratificar, que las propiedades radiativas de la cubierta tienen una gran influencia sobre la reducción del sobrecalentamiento de la cubierta, y en consecuencia, sobre el espacio interior.

Tal como se mencionó en el principio de este apartado, la reflectividad es un parámetro profundamente evaluado por un sin número de estudios. Por el contrario, **la emisividad de la cubierta, como estrategia para reducir la temperatura de esta superficie, aún es una variable poco estudiada**, al igual que su relación con la capacidad de enfriamiento del cielo.

De igual manera, aunque existe una gran información sobre **el efecto del envejecimiento** sobre la reducción de la reflectividad en la cubierta, **las repercusiones de esta condicionante sobre el factor de la emisividad es casi inexistente.**

Las publicaciones analizadas tanto de la reflectividad como de la emisividad han sido realizadas en climas similares al clima de referencia de esta tesis (cálido-húmedo). No obstante, **los días de análisis considerados en todas estas publicaciones corresponden a días con características de cielo totalmente despejado**, lo cual no coincide con las características climáticas de la región de análisis.

Por último, el **flujo de onda larga** emitido hacia el cielo en el balance térmico de la cubierta, en la mayoría de los estudios ha sido obtenido **a través de aproximaciones de la temperatura del cielo**. Si bien estas aproximaciones tienen gran precisión en cielos despejados, la determinación de este factor no ha sido estudiada a detalle en cielos con altos niveles de nubosidad.

En consecuencia, para evaluar las propiedades radiativas de la cubierta en el clima de referencia de esta tesis, donde la alta nubosidad es un factor predominante, será fundamental un estudio más a detalle del comportamiento térmico del cielo; y en especial, para el análisis del efecto de la emisividad.

2.2.3 MASA Y AISLAMIENTO

Además de las propiedades radiativas, otras variables para controlar el flujo de calor a través de la cubierta son su masa térmica y resistencia térmica. La masa modifica el tiempo de retraso del flujo y la resistencia térmica actúa sobre la cantidad de flujo que se transmite a través de este elemento.

El uso de estas dos variables, como estrategias para reducir el sobrecalentamiento interior ha sido extensamente difundido en climas cálidos. Como se revisó en el capítulo anterior, en el Ecuador, el uso de materiales con alta masa térmica en las cubiertas toma mayor popularidad cada día, mientras que las entidades reguladoras estipulan el uso de materiales con alta resistencia térmica (aislantes) como norma para evitar el sobrecalentamiento interior.

A continuación, se repasan las publicaciones de diferentes autores que abordan estas variables en diferentes climas cálidos, de donde se obtienen diferentes resultados y se resaltan sus ventajas y desventajas.

[SUEHRCKE ET AL., 2008] en su estudio compara tres tipos de cubierta con diferente masa térmica: lámina de acero, tejas de arcilla y forjado de hormigón, pero con igual resistencia térmica ($2.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$). Este trabajo ha sido desarrollado a través de un proceso de cálculo en estado estático, y el parámetro de análisis utilizado es el flujo de calor diario hacia el interior. Los datos climatológicos utilizados para este cálculo pertenecen a un día soleado con un tipo de cielo descubierto: radiación solar $6 \text{ kWh}/\text{m}^2$, temperatura del aire 24°C y temperatura del cielo 4°C .

De acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación de Suehrcke, **Figura 43**, el flujo de calor hacia el interior es independiente de la masa térmica, ya que la diferencia del promedio diario entre los 3 tipos de cubierta (lámina de acero, tejas, y losa) es sólo del 0.7%, 192.6, 192.7, 193.8 W/m^2 respectivamente.

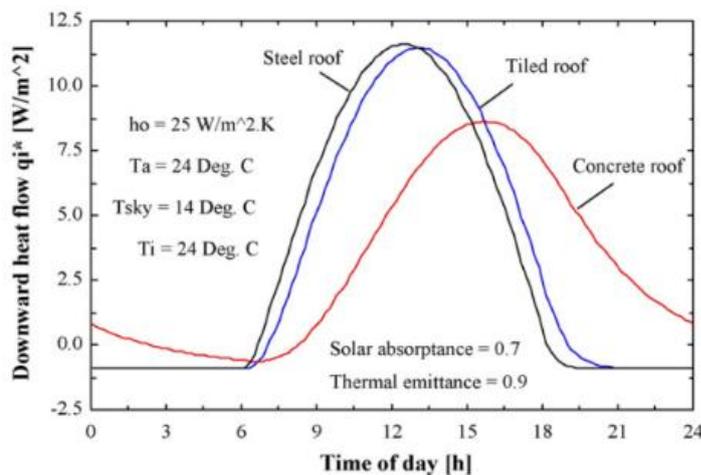


Figura 43 Flujo de calor a través de 3 tipos de cubierta. Imagen tomada de [Suehrcke, Peterson and Selby, 2008]

Tanto el flujo a través de la cubierta metálica como de la cubierta de teja es instantáneo, con un máximo de 11.5 W/m^2 en el día y un flujo negativo durante toda la noche. Por otra parte, el flujo a través de la cubierta de concreto muestra un flujo máximo de 9 W/m^2 . Una reducción de 2.5 W/m^2 y un retraso de 4 horas, con respecto a las otras dos cubiertas. Sin embargo, este flujo positivo se extiende durante casi todo el periodo nocturno, por lo cual sus pérdidas son casi nulas.

El cálculo de estos flujos se realizó con una temperatura de cielo de 4°C para todo el día, lo que define un enfriamiento radiativo bastante alto, no obstante aún con estas características de cielo la alta masa térmica de la cubierta de concreto retrasa y disminuye considerablemente la disipación de calor de esta cubierta. Esta disminución de la disipación de calor se puede intensificar en función del incremento de la temperatura del cielo.

En busca de analizar el efecto de la capacidad de enfriamiento del cielo, *Suehrcke* compara el desempeño térmico de estos tres tipos de cubierta con 3 diferentes temperaturas de cielo: 4°C , 14°C y 24° .

Los resultados muestran que efectivamente existe un incremento del flujo diario hacia el interior conforme aumenta la temperatura del cielo. Debido a que la temperatura del cielo se incrementa, el flujo radiativo emitido por la cubierta se reduce, y por lo tanto el flujo hacia el interior sube. En los 3 casos de análisis, la diferencia entre las 3 cubiertas es despreciable. Aunque estos resultados muestran la influencia de la temperatura del cielo sobre el incremento del flujo de calor hacia el interior, el uso de la misma resistencia térmica hace que se reduzca la diferencia de flujo entre los 3 tipos de cubierta.

Dado que la cubierta de concreto posee más masa térmica que las otras dos cubiertas, el incremento del flujo se intensifica más en esta cubierta a causa del incremento de la temperatura del cielo.

Por otra parte, **[JIM, 2015]** se enfoca en la influencia del uso de aislamiento en una cubierta de losa de hormigón. El estudio fue llevado a cabo a través de un trabajo experimental en un clima subtropical templado, Hong Kong latitud 20°N . Las cubiertas analizadas pertenecen a dos departamentos de edificios residenciales sin ninguna ocupación.

Las cubiertas están compuestas de un forjado de hormigón de 15 cm y un enlucido de cemento de 2 cm. Una de estas cubiertas cuenta con una capa de poli estireno expandido en su interior de 4 cm. Las mediciones fueron realizadas durante todo un año, y los datos que se han analizado pertenecen a un día soleado y a un día nublado de cada temporada del año.

De acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación, en el día soleado de verano (línea roja), radiación máxima 1030 W/m^2 y temperatura media 29.6°C , el flujo de calor máximo hacia el interior en la cubierta sin aislamiento es de 100 W/m^2 en el periodo diurno, y durante todo el periodo nocturno el flujo es negativo. Las pérdidas en el periodo nocturno varían entre los -20 W/m^2 a -60 W/m^2 , **Figura 44a**.

Si comparamos estos resultados con los de la cubierta con aislamiento, **Figura 44b**, el flujo máximo en el día soleado de verano (línea roja) se reduce hasta los 80 W/m² y presenta un retraso de 2 horas; sin embargo en el periodo nocturno las pérdidas también se reducen, por lo que la cubierta presenta un flujo positivo durante todo el día.

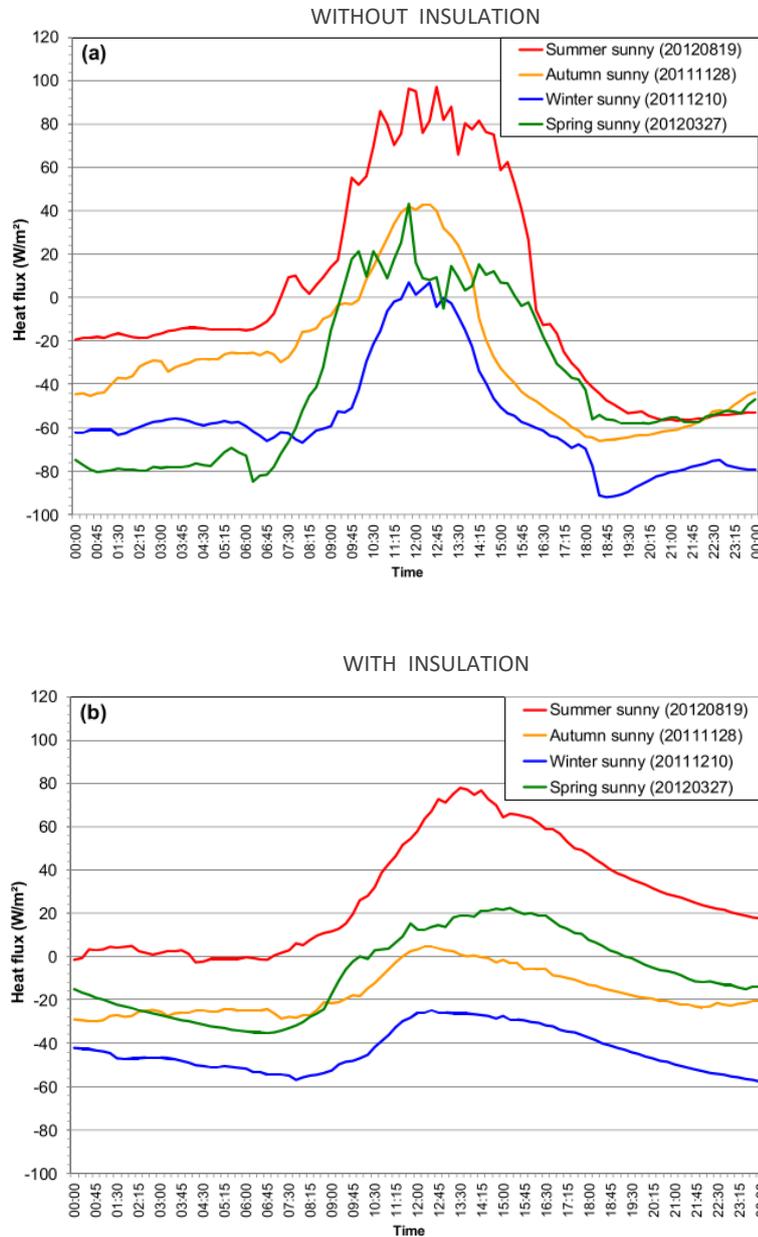


Figura 44 Flujo de calor hacia el interior a través de una cubierta de hormigón sin aislamiento (a) y con aislamiento (b) en un día soleado de la temporada de verano, invierno, otoño y primavera. Imagen tomada de [Jim, 2015]

El flujo de calor promedio diario de la cubierta con aislamiento es de 30 W/m², y el de la cubierta sin aislamiento es 10 W/m². Aunque el uso del aislamiento en la cubierta reduzca el flujo de calor hacia el interior en el periodo diurno, las pérdidas durante el periodo nocturno son mucho menores en comparación con la cubierta sin aislamiento, por lo que en el balance diario el flujo hacia el interior es mayor.

Si analizamos los resultados de estas dos cubiertas en el día nublado de verano, **Figura 45** (radiación solar máxima de 240 W/m² y temperatura del aire promedio de 29°C), el flujo de calor en la cubierta sin aislamiento es positivo durante pocas horas en el día, 12h00 – 16h00, donde alcanza los 20W/m², mientras que el resto del día este flujo representa sólo pérdidas. Por el contrario, el flujo a través de la cubierta con aislamiento es positivo durante todo el día, y varía desde los 0 W/m² hasta los 10 W/m².

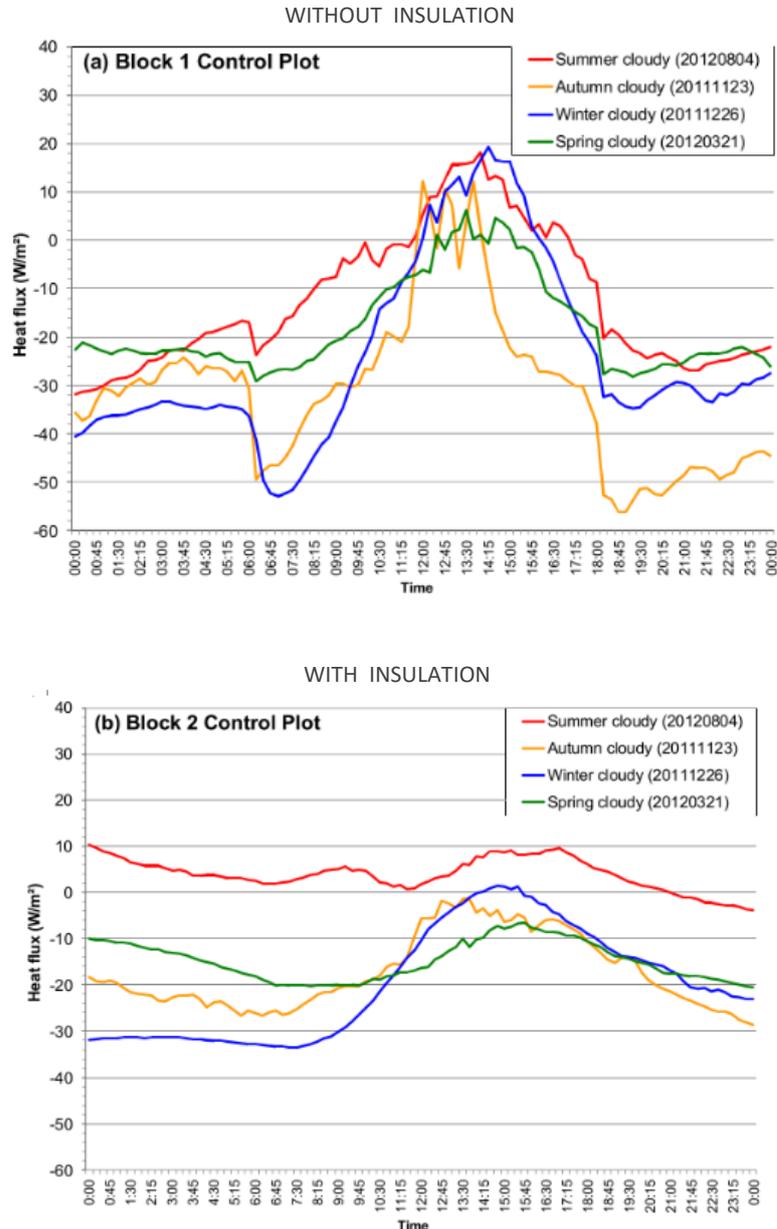


Figura 45 Flujo de calor hacia el interior a través de una cubierta de hormigón sin aislamiento (a) y con aislamiento (b) en un día nublado de la temporada de verano, invierno, otoño y primavera. Imagen tomada de [Jim, 2015]

De acuerdo a estos resultados, la alta conductividad de la cubierta de hormigón sin aislamiento permite un flujo elevado en ambas direcciones. **Mientras que el uso de aislamiento reduce tanto el flujo hacia el interior, como el flujo hacia el exterior.**

Debido a que en estos días de verano el diferencial de temperaturas entre interior y exterior no es extremo, la velocidad del flujo de calor se reduce, por lo que el uso del aislamiento restringe aún más este flujo en estas condiciones.

En un día con poca radiación y alta nubosidad, no sólo el diferencial de temperaturas exterior e interior se reduce, sino también el flujo emitido por radiación hacia el cielo, por lo que el uso del aislamiento restringe aún más las pérdidas por cubierta.

De igual manera, [TONG ET AL., 2014] analiza el efecto de 2.5 cm de EPS sobre una cubierta de forjado de hormigón de 10 cm sin cámara ventilada (UVR) y con cámara ventilada (VR), en un clima cálido-húmedo (Singapur). La metodología utilizada para este estudio se basó en simulaciones validadas a través de datos experimentales. Las condiciones climáticas para la simulación fueron de un día soleado con un cielo despejado.

La **Figura 46** muestra las temperaturas superficiales interiores de las 2 tipologías de cubiertas analizadas con y sin aislamiento. Conforme a estos resultados, la cubierta de forjado de hormigón sin cámara ventilada y sin aislamiento (1 UVR) muestra las mayores temperaturas en el día y las menores temperaturas en la noche de todas las tipologías analizadas.

El uso de aislamiento en esta cubierta (2) muestra una reducción de 4°C de su temperatura máxima, sin embargo muestra un incremento de 1°C durante todo el primer periodo nocturno (00h00 – 08h00) y un retraso alrededor de una hora en comparación con la cubierta sin aislamiento (1).

Por otra parte, el uso de aislamiento en la cubierta con cámara ventilada (4) muestra las menores temperaturas de los ejemplos analizados en el periodo diurno, sin embargo, en el primer periodo nocturno, alcanza una de las mayores temperaturas.

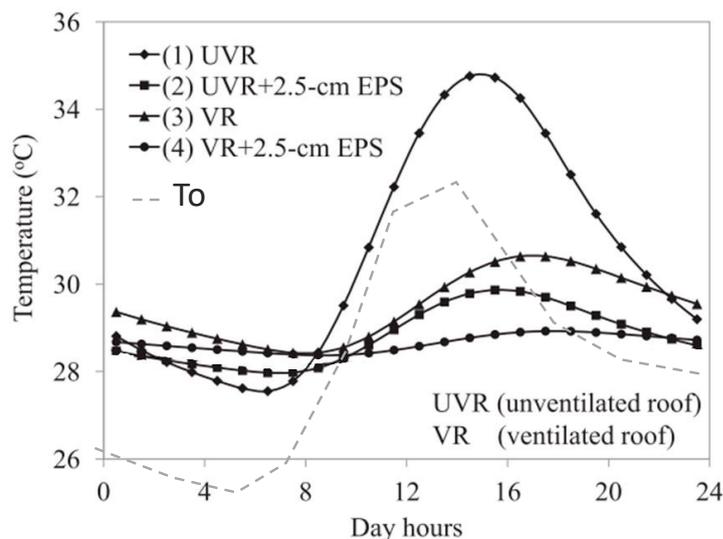


Figura 46 Temperatura superficial interior de una cubierta de hormigón (sin cámara ventilada UVR y con cámara ventilada VR) con y sin aislamiento. Imagen tomada de [Tong et al., 2014]

Es necesario recalcar que todas las temperaturas interiores de las superficies de las cubiertas analizadas tienen una temperatura mayor que la temperatura del aire exterior en el periodo nocturno. Aun cuando **la capacidad de enfriamiento radiativo del cielo de esta región es alto**, debido a la propia masa térmica de la cubierta de hormigón y la resistencia térmica del aislamiento, la temperatura superficial interior de esta cubierta no se reduce con la misma velocidad que la temperatura del aire exterior.

De acuerdo a estos resultados, tanto las ganancias en el periodo diurno como las pérdidas en el periodo nocturno se reducen con el uso del aislamiento, un comportamiento similar al visto en el trabajo de [Jim, 2015]. No obstante, en el análisis de Tong, la reducción de ganancias en el periodo diurno tiene mayor relevancia que la reducción de pérdidas en el periodo nocturno.

Por todo lo expuesto, tanto **la alta masa térmica como el uso de materiales aislantes en la cubierta tienen un impacto opuesto entre el periodo diurno y el periodo nocturno**. Aunque estas variables reducen el flujo de calor hacia el interior durante el día, también restringen las pérdidas durante la noche.

En el promedio diario de los estudios analizados predominan las ventajas sobre las desventajas del uso de estas estrategias, sin embargo **la eficacia de estas variables depende del clima de cada región, en especial del comportamiento térmico del cielo**. Como se ha visto en los estudios analizados, la alta nubosidad y las altas temperaturas del cielo intensifican la reducción de las pérdidas en el periodo nocturno. Por lo que, en el caso de Ecuador, donde predomina el alto porcentaje de cielo cubierto, el estudio de estas variables resulta fundamental antes de emitir un criterio integro de estas estrategias.

2.2.4 DOBLE CAPA

Una de las estrategias más utilizadas en estos climas es la cubierta doble capa, double skin roof o cubierta ventilada. Esta estrategia consiste en la adición de una capa a la cubierta, llamado falso techo o cielo raso, separadas por una cámara de aire ventilada [Wong and Li, 2007][Lai, Huang and Chiou, 2008].

El propósito de la cubierta ventilada consiste en reducir el flujo hacia el interior a través de la disipación de calor de la cámara de aire, con el uso de la ventilación forzada o natural [Biwole, Woloszyn and Pompeo, 2008].

Además del propósito térmico, la adición de esta capa a la cubierta se utiliza para disimular la cubierta original o para ocultar instalaciones técnicas, por lo cual es un sistema constructivo que está tomando mayor popularidad en las ciudades de Ecuador.

Esta tipología de cubierta posee 3 capas: el elemento expuesto al exterior, la cámara de aire ventilada y el elemento interior. Los estudios previos sobre la cubierta ventilada se han enfocado en diferentes parámetros: ancho, forma e inclinación de cavidad, con el propósito de aumentar la disipación de calor a través de la cámara de aire, y consecuentemente reducir el flujo hacia el interior y la temperatura superficial interior.

Lai en su estudio aborda el espacio óptimo de la cavidad para incrementar el flujo de calor que sale de la cámara de aire, conforme a tres inclinaciones (30°, 45°, 60°). Este estudio fue llevado a cabo a través de experimentaciones en un laboratorio. El modelo experimental fue un panel (1 m x 2m) compuesto de dos láminas metálicas. Los datos obtenidos dieron como resultado que los anchos óptimos de la cámara varían de acuerdo a la inclinación, 6 cm para una inclinación de 30° y 9cm para una inclinación de 60° [Lai, Huang and Chiou, 2008].

Estos resultados concuerdan con otras investigaciones donde se sugiere que la mayor eficiencia del ancho de la **cámara de aire está entre los 6 a 10 cm**. [Patania F, Gagliano A, Nocera F, Ferlito A, Galesi A, 2011][Biwole, Woloszyn and Pompeo, 2008][Villi, Pasut and de Carli, 2009].

Otro estudio experimental, realizado en un laboratorio, se enfoca en la forma de la cavidad. De acuerdo a uno de los resultados obtenidos, se afirma que una cubierta con una cámara de aire en forma de canal muestra mayores velocidades de aire que en una cavidad plana, con lo cual se obtiene un mayor coeficiente de transmitancia por convección y por lo tanto un mayor flujo disipado por la cámara de aire [Lee *et al.*, 2009].

Otros autores abordan la influencia de la inclinación de la cubierta sobre varios parámetros de la cámara ventilada. Biwole realiza un análisis experimental en agosto 2006 en Lyon, confrontado con simulaciones, para analizar el impacto de la inclinación en la temperatura y la velocidad del aire en la cámara ventilada. El modelo se compone de dos planchas metálicas de 1m x 1 m orientado a sur, donde la separación entre ellas fue de 2.5cm con el propósito de tener la misma proporción superficie de cubierta-ancho de cavidad como una cubierta de 4m x 4m y una cavidad de 10cm.

Las superficies medidas fueron: la temperatura de la plancha exterior por ambos lados arriba y abajo, y la plancha interior de igual manera por arriba y por abajo. Además, la temperatura y velocidad del aire de la cámara fueron medidas en este estudio. El análisis experimental y de simulación, y por tanto los resultados de este estudio sólo se enfocan en el periodo diurno.

Uno de los primeros resultados de este estudio fue que las temperaturas superficial exterior e interior de ambas planchas de acero son iguales. Debido a la alta conductividad del acero y su reducido espesor, este elemento ofrece una resistencia casi nula al flujo de calor.

Por otra parte, los resultados muestran que conforme a la inclinación se incrementa, la velocidad del aire aumenta y la temperatura del aire de la cámara se reduce. Al incrementarse la inclinación la convección natural es más fácil, con lo cual las pérdidas por convección crecen [Biwole, Woloszyn and Pompeo, 2008].

De acuerdo con los resultados de estos estudios, la velocidad del aire de la cámara se incrementa conforme crece el ancho de la cavidad y la inclinación de la cubierta. Sin embargo, la repercusión de estos parámetros sobre la temperatura superficial interior de la cubierta es mínima. Conforme al estudio de Escobar, la reducción de la temperatura superficial interior de una cubierta ventilada inclinada a 45° es de 2°C con respecto a una cubierta horizontal. De igual manera la reducción entre una cavidad con un ancho de 5 cm y 25 cm es de 3°C, y su máxima efectividad se da en los 10 cm de anchura. Por tanto, aunque la velocidad del aire de la cámara se incremente debido al incremento de la inclinación de la cubierta o el ancho de la cámara de aire, las pérdidas por convección no son significativas y por tanto la reducción de temperatura de la capa interior es reducida [Escobar, 2013].

En consecuencia, **LA MÁS GRANDE INFLUENCIA DE LA CUBIERTA VENTILADA SE DEBE A AL SOMBREAMIENTO QUE OFRECE LA CAPA EXTERIOR SOBRE LA CAPA INTERIOR.** Sin embargo, es necesario que la cámara de aire que separa estas dos capas no sea cerrada y permita la liberación de calor del aire caliente acumulado en este espacio. Estudios previos han comprobado que una cubierta con cámara de aire abierta transmite la mitad del flujo de calor que una cubierta con cámara cerrada [Gagliano *et al.*, 2012][Villi, Pasut and de Carli, 2009].

Existen varios estudios que han analizado esta estrategia tanto en cubiertas ligeras como en cubiertas pesadas, en diferentes regiones con climas cálidos.

[ZINGRE ET AL., 2015] en su estudio analiza el uso de la cubierta ventilada en un forjado de hormigón en un clima cálido-húmedo (Singapur). Este estudio fue llevado a cabo a través de simulaciones digitales, y los resultados han sido validados a través de datos medidos. Tanto las mediciones como las simulaciones se realizan en dos días tipo, un día soleado y un día nublado, con una radiación solar máxima de 950 W/m² y 420 W/m², y una temperatura máxima de 34°C y 28°C respectivamente. El trabajo experimental se centra en la medición de la cubierta de hormigón con una sola capa, y por otra parte, el efecto de la adición de la segunda capa se analiza con el uso de las simulaciones.

La **Figura 47** muestra los resultados medidos de los factores climáticos, los resultados medidos y simulados de la temperatura superficial exterior de la cubierta de una sola capa, en los dos días de análisis.

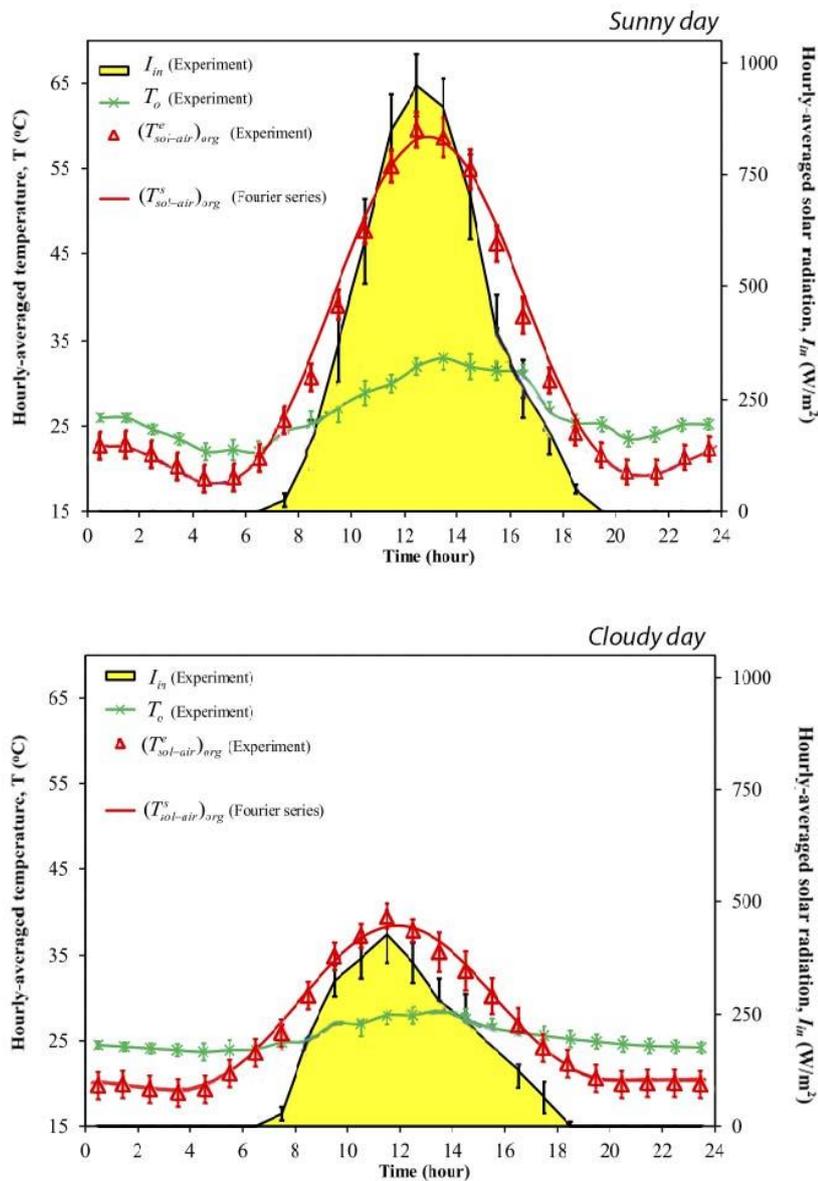


Figura 47 Factores climáticos medidos y temperatura superficial exterior de una cubierta de hormigón (medida y simulada), en un día soleado (arriba) y en un día nublado (abajo) en Singapur. Imagen tomada de [Zingre *et al.*, 2015]

De acuerdo a estos resultados, en el día soleado, la temperatura superficial exterior de la cubierta (línea roja) alcanza los 60°C en el periodo diurno, mientras que en la noche su temperatura se reduce hasta los 18°C, aproximadamente 4°C por debajo de la temperatura del aire exterior (línea verde).

En el día nublado, la temperatura de la cubierta alcanza los 38°C en el día, 22°C menos que en el día soleado, y en la noche llega hasta los 19°C, 6°C aproximadamente por debajo de la temperatura del aire. Es necesario resaltar que tanto en el día soleado como el nublado se muestra una gran influencia del enfriamiento radiativo en el periodo nocturno, ya que en ambos días la temperatura de la cubierta se reduce por debajo de la del ambiente exterior.

Dada la similitud de los valores de la temperatura superficial exterior obtenidos con simulaciones (línea roja) con los valores obtenidos por mediciones (marcadores rojos), el modelo de simulación utilizado en este estudio se valida.

En cuanto a los resultados simulados, la **Figura 48** muestra las temperaturas de la superficie exterior e interior de la cubierta con una sola capa (magenta) y de la cubierta con doble capa (verde) en el día soleado.

La adición de una segunda capa separada por una cámara ventilada de la cubierta de concreto, efectivamente reduce los máximos de temperatura en el periodo diurno, tanto de la superficie exterior como de la superficie interior, 17°C y 7°C respectivamente. Sin embargo, esta estrategia también incrementa los mínimos de temperatura en el periodo nocturno, 6°C en la superficie exterior y 4°C en la superficie interior.

Aunque el uso de esta estrategia presenta un comportamiento opuesto en estos dos periodos, la reducción en el periodo diurno es mayor que el incremento en el periodo nocturno. En consecuencia, el flujo total diario a través de la cubierta con dos capas representa una reducción del 40% en comparación con la cubierta de una sola capa.

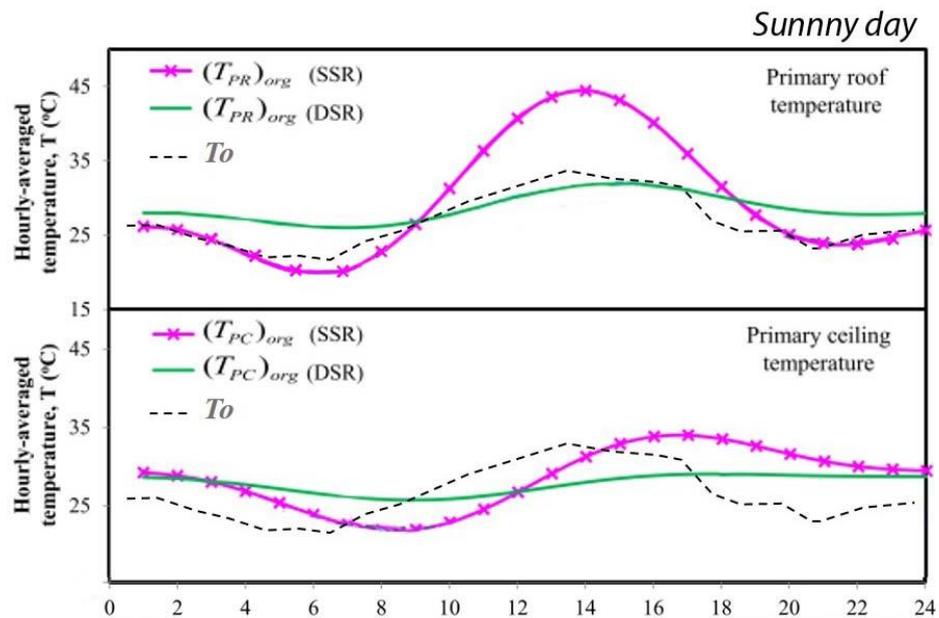


Figura 48 Temperatura del aire exterior (T_o), temperatura superficial exterior (arriba) y temperatura superficial interior (abajo) de una cubierta de hormigón con una sola capa (magenta) y con dos capas (verde) en un día soleado. Imagen tomada de [Zingre *et al.*, 2015].

Los resultados en el día nublado, **Figura 49**, muestran la misma tendencia vista en el día soleado. El uso de esta estrategia reduce las temperaturas de la cubierta en el periodo diurno e incrementa las temperaturas en el periodo nocturno.

No obstante, esta vez la reducción de temperatura de la cubierta, provocado por el uso de la doble capa, es similar al incremento que provoca en el primer periodo nocturno. Es decir, la cubierta de concreto con doble capa reduce su temperatura superficial interior 1°C en comparación con la cubierta simple, sin embargo, también incrementa un promedio de 1°C en el periodo nocturno.

En cuanto al flujo total diario en este día, el uso de la cubierta ventilada aún provoca una reducción del 20% en comparación con la cubierta simple.

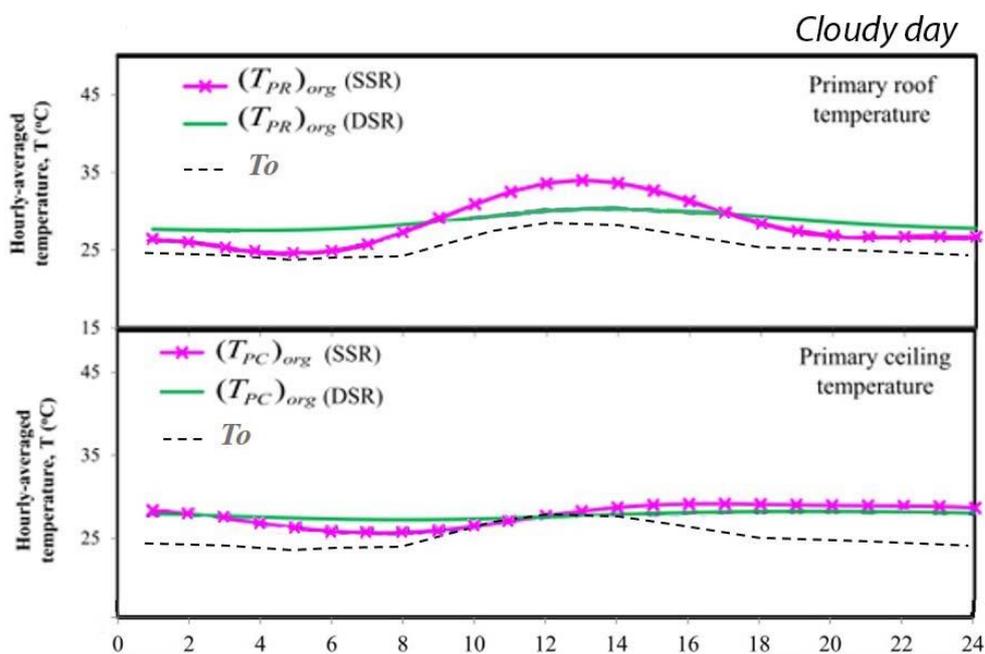


Figura 49 Temperatura del aire exterior (T_o), temperatura superficial exterior (arriba) y temperatura superficial interior (abajo) de una cubierta de hormigón con una sola capa (magenta) y con dos capas (verde) en un día nublado. Imagen tomada de [Zingre *et al.*, 2015].

De igual manera, el uso de ESTA ESTRATEGIA HA TENIDO UNA GRAN DIFUSIÓN EN LAS CUBIERTAS METÁLICAS, y además con mejores resultados que en las cubiertas de hormigón.

Por ejemplo, en el estudio de [IDRIS ET AL., 2017] se compara el flujo a través de una cubierta de lámina de acero de una sola capa, con otra de doble capa, considerando las condiciones climáticas de la ciudad de Djibouti (latitud 11°35'N). De acuerdo a este estudio, el flujo de calor a través de la cubierta de doble capa es la mitad que el flujo de la cubierta simple de lámina de acero, en un día soleado con cielo totalmente despejado.

Así mismo, en el estudio de [DÍAZ, 2012] se analiza esta estrategia en la cubierta metálica en un clima tropical (Santo Domingo-República Dominicana, latitud 18°28'N).

Este estudio fue llevado a cabo a través de un modelo de cálculo estático, donde se considera una radiación solar máxima de 1000 W/m², y una temperatura máxima de 28°C. Al igual que en otros estudios, el modelo de cálculo utilizado no toma en cuenta la nubosidad del cielo. Tanto para el flujo de radiación de onda corta como para el flujo de onda larga se ha considerado un modelo de cielo 100% despejado.

De acuerdo a los resultados de este estudio, **Figura 50**, la superficie interior de la cubierta de dos capas (T_{s_2capas}) reduce 13°C su temperatura en comparación con la cubierta simple ($T_{s_1 capa}$), una reducción casi el doble en comparación con la cubierta de hormigón vista en los estudios anteriores.

Además, la baja masa térmica de las dos cubiertas hace que la temperatura superficial en ambos casos se reduzca hasta la temperatura del aire (T_a) en el momento que la radiación solar desaparece y se mantienen así durante todo el periodo nocturno. Hay que hacer notar que este modelo utilizado no considera el intercambio térmico con el cielo, por lo que sus temperaturas están condicionadas únicamente por la radiación solar y la temperatura del aire.

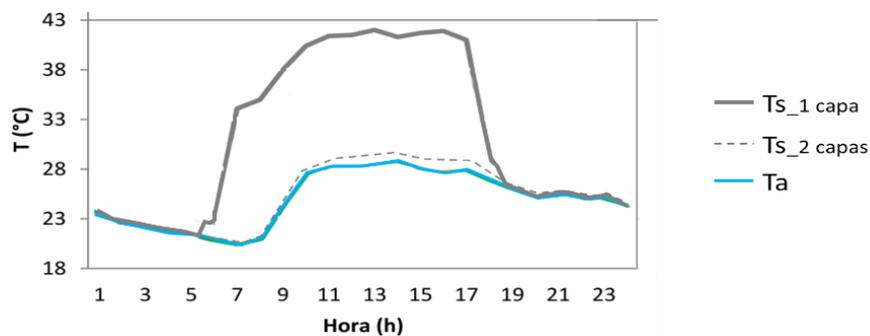


Figura 50 Temperatura del aire exterior (T_a), temperatura superficial interior de la cubierta de lámina de acero simple (T_{s_1capa}), y la cubierta de lámina de acero ventilada ($T_{s_2 capas}$). Imagen tomada de [Díaz, 2012]

Por otra parte, en el estudio de [Escobar, 2017] donde se aborda el estudio de esta estrategia a través de la experimentación, se pueden notar algunas diferencias con el trabajo de Díaz. Para el análisis de este estudio se han caracterizado las condiciones de un día tipo, radiación solar de 5.2 kWh/m² y temperatura media del aire de 29.5°C.

De acuerdo a los resultados de este estudio, **Figura 51**, la cubierta ventilada reduce su temperatura máxima 22°C respecto a la cubierta simple. Mientras que en el periodo nocturno su temperatura se incrementa alrededor de 2°C durante todo el periodo nocturno. Un comportamiento similar al visto en las cubiertas de hormigón, sin embargo, la reducción de temperatura en el día es mucho más relevante que el incremento de la temperatura en la noche.

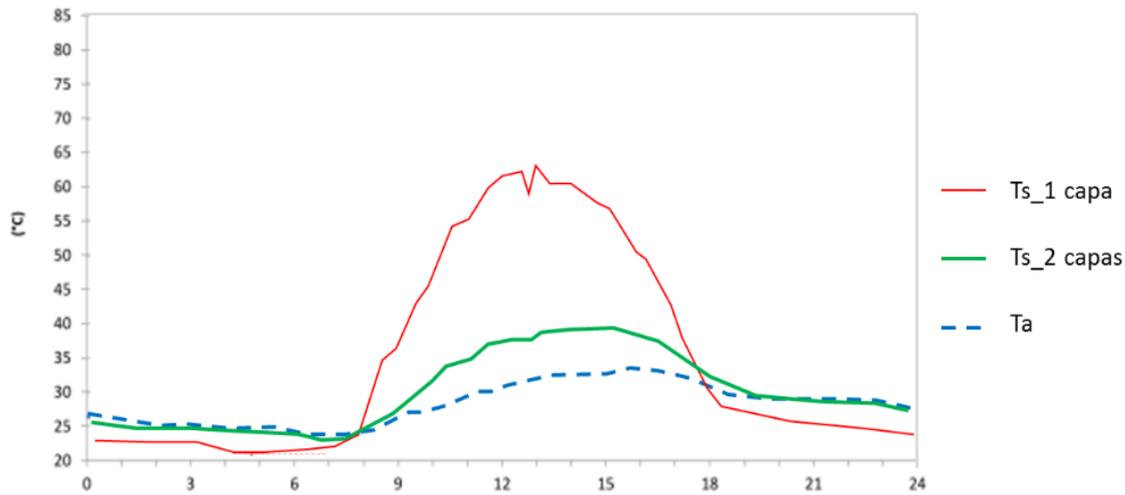


Figura 51 Temperatura del aire (T_a), temperatura superficial interior de una cubierta metálica simple ($T_{s_1\text{capa}}$) y una cubierta metálica ventilada ($T_{s_2\text{capas}}$). Imagen tomada de [Escobar, 2017]

Hay que hacer notar que las temperaturas superficiales interiores de la cubierta simple y la cubierta doble capa o ventilada son menores que la temperatura del aire exterior en el periodo nocturno, 4°C y 1 °C respectivamente. Estos resultados ratifican la fuerte influencia del enfriamiento radiativo sobre la temperatura de las cubiertas en este clima.

En consecuencia, el uso de la doble capa o doble piel en la cubierta tiene un efecto similar al de la masa térmica o aislamiento. Esta estrategia reduce el flujo hacia el interior en el periodo diurno, sin embargo, también restringe el enfriamiento de la capa interior en el periodo nocturno.

2.3 RESUMEN DEL CAPÍTULO

A través de todo lo expuesto en este capítulo, se han podido analizar las diferentes variables de la cubierta utilizadas como estrategias para reducir el sobrecalentamiento interior en varias regiones con climas cálidos-húmedos. Cada una de estas estrategias, con mayor o menor grado de estudio, presenta diferentes repercusiones, ventajas y desventajas, sobre las dos tipologías de cubiertas evaluadas: la cubierta ligera metálica y la cubierta pesada de hormigón.

Todos los estudios revisados se han enfocado en regiones con climas cálidos húmedos y latitudes bajas, donde la característica principal ha sido la alta radiación solar. Los climas de estas publicaciones son similares al clima de la Región Costa del Ecuador, en referencia a niveles de temperatura y humedad, sin embargo, **los niveles de NUBOSIDAD no coinciden.**

Las condiciones climáticas consideradas para el análisis de cada una de las estrategias en estos estudios corresponden a días soleados con cielo despejado, los cuales se resaltan como los días tipo de cada una de las ciudades o regiones estudiadas. Aunque algunas de estas investigaciones consideran días nublados, el efecto de esta condición sobre las variables de la cubierta no ha sido desarrollado a detalle.

Las diferentes publicaciones han abordado el estudio de estas estrategias por diferentes métodos: la experimentación en campo, y otros con cálculos por simulación.

En el caso de los estudios que utilizan las simulaciones digitales, la caracterización térmica del cielo ha sido obtenida a través de aproximaciones matemáticas. Si bien los modelos de cálculo para CIELOS DESPEJADOS tienen un extenso campo de investigación, la caracterización térmica de **los cielos con un alto porcentaje de nubosidad aún no cuenta con un modelo de cálculo de alta precisión y validez.**

A lo largo de este capítulo se ha reflexionado sobre la ausencia de la nubosidad del cielo en el análisis de las variables que influyen en el comportamiento térmico de la cubierta. En una región con alto porcentaje de cielo cubierto, la ausencia de este factor puede resultar en errores determinantes sobre la eficacia de estas variables, como la inclinación-orientación, reflectividad, emisividad, masa térmica, etc.

En consecuencia, la consideración de **la NUBOSIDAD DEL CIELO es un factor climático fundamental e indispensable** para el análisis del comportamiento térmico de la cubierta y las variables a evaluarse en el clima cálido-húmedo del Ecuador.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

Capítulo 3

CUBIERTA LIGERA METÁLICA Y CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN



COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

En las regiones con climas cálidos húmedos, los materiales ligeros destacan como los más usados en las viviendas. Debido a su baja masa térmica, estos materiales facilitan la liberación de calor del espacio interior [Koch-Nielsen, 2002][Olgyay, 1963][Serra, R. y Coch, 2001][Santamouris and Kolokotsa, 2013].

No obstante, de acuerdo a lo descrito en los capítulos anteriores, la Región Costa del Ecuador está experimentando un cambio significativo en el uso de los materiales de cubiertas, de manera específica, de cubiertas ligeras metálicas a cubiertas pesadas de hormigón. Aunque aún existe una predominancia de las cubiertas metálicas, cada vez toman mayor relevancia en el uso residencial las cubiertas de hormigón.

En el momento de decidir ¿qué tipología de cubierta usar en esta región?, el arquitecto o el propietario considera varios aspectos que caracterizan a cada una de estas cubiertas, entre los más importantes, aspectos económicos y térmicos.

En el caso de la cubierta ligera metálica (CL), debido a su facilidad y bajos costos de instalación (24\$/m²) esta tipología es una de las más usadas en esta región. Sin embargo, por su reducido espesor y sus características térmicas, la CL ofrece una baja resistencia al paso de calor, lo que puede provocar un alto desconfort interior y por ende un alta demanda energética.

Por otra parte, la cubierta pesada de hormigón (CP), aunque tiene un mayor costo de construcción (75\$/m²), debido a su mayor espesor y propiedades térmicas ofrece una mayor resistencia al flujo de calor que la CL, y por tanto se supone que ofrece “mejores condiciones interiores” y por ende una menor demanda energética. Por lo tanto, el mayor costo de construcción de la CP puede compensarse por una menor demanda energética a largo plazo.

Bajo este contexto, el incremento de las cubiertas pesadas de hormigón, que ha experimentado la región Costa del Ecuador en las últimas décadas, parece tener un PROPÓSITO TÉRMICO (reducir el sobrecalentamiento interior).

Otro aspecto que se debe considerar para comparar estas dos cubiertas es la ENERGÍA INCORPORADA (Embodied Energy). Este término se refiere a la energía consumida asociada a todo el proceso de fabricación y construcción de cualquier material [Yohanis and Norton, 2002] [Azari and Abbasabadi, 2018].

En base a las características de estas cubiertas en esta región, la Energía Incorporada de 1 m² de cubierta es de 227 MJ en el caso de la cubierta de ligera metálica, y 871 MJ en el caso de la cubierta pesada de hormigón (ver cálculo anexo A1.2.2 CÁLCULO DE ENERGÍA INCORPORADA DE LA CL Y LA CP).

Aunque el consumo de energía para producir un kg de acero galvanizado (39MJ/kg) es mayor que el que se usa para producir un kg de hormigón armado (1.1 MJ/kg), [Cabeza *et al.*, 2013][Pagés-Ramon, 2014] [Chastas, Theodosiou and Bikas, 2016], debido al bajo peso por m² que tiene la cubierta metálica, su energía incorporada es mucho menor que la de la cubierta de hormigón.

Por lo tanto, el uso de una CL supone un costo de instalación y un gasto de Energía Incorporada (EMBODIED ENERGY) 3 veces menor que una CP (ver anexo A1.2 CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS Y ENERGÉTICAS DE LA CL Y LA CP). Sin embargo, de acuerdo a estudios previos en climas cálidos, debido a su menor resistencia al paso de calor, la CL ofrece un mayor sobrecalentamiento interior y una demanda energética 30% mayor al de la CP [Zingre *et al.*, 2015], **Tabla 3**.

Tabla 3 Comparación de los aspectos ambientales, energéticos y económicos que ofrece una Cubierta Ligera Metálica (CL) y una Cubierta Pesada de Hormigón (CP).

	CL	CP
DISCONFORT INTERIOR (°C)	●●	●
DEMANDA ENERGÉTICA (kWh) - (\$)	●●	●
EMBODIED ENERGY (MJ) (CO2)	●	●●●
COSTOS (\$)	●	●●●

Aun cuando la CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN es la que ofrece menores condiciones de sobrecalentamiento interior, y menor consumo energético en estos climas, es la CUBIERTA LIGERA METÁLICA la opción más idónea en lo que respecta a los costos de instalación para el usuario, y además, la opción más sostenible, debido a su menor demanda de energía incorporada.

De estos 4 aspectos, esta tesis se centra en valorar a la CL y la CP, en función del confort interior que ofrecen en el espacio interior.

Como se ha descrito en el capítulo anterior, algunos estudios corroboran la relevancia de la CP sobre la CL, en función de ofrecer un menor sobrecalentamiento del espacio interior, [Zingre *et al.*, 2015]. Aunque, estos estudios han sido desarrollados en climas cálidos húmedos, varias diferencias con el clima de referencia de esta tesis han sido señaladas, las cuales pueden tener una fuerte influencia sobre el desempeño térmico de la CL y la CP en esta región.

En consecuencia, esta tesis aborda el comportamiento térmico de la CL y la CP en un clima cálido húmedo, y analiza el impacto de varias estrategias aplicadas a cada una de ellas, con el propósito principal de determinar:

¿QUÉ TIPOLOGÍA DE CUBIERTA TIENE UN MEJOR DESEMPEÑO TÉRMICO EN EL CLIMA DE LA REGIÓN COSTA DE ECUADOR, LA LIGERA METÁLICA O LA PESADA DE HORMIGÓN?

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CUBIERTA LIGERA Y LA CUBIERTA PESADA.

Las características técnicas y térmicas de las dos tipologías de cubierta a estudiarse en esta investigación se definen a continuación:

La **CUBIERTA LIGERA METÁLICA (CL)** se refiere a una lámina de acero de 0.3 mm de espesor, con un recubrimiento de zinc o una aleación de aluminio y zinc (55%-45%). El peso de esta lámina de acero es de 2.6 kg/m², y ofrece una transmitancia térmica alrededor de 7.2 W/ m².K [NOVACERO, 2016].

Las propiedades radiativas de este acabado en estado nuevo son las siguientes: una reflectividad en el visible alrededor de 0.75 y una emisividad en el infrarrojo térmico alrededor de 0.12, **Figura 52**.

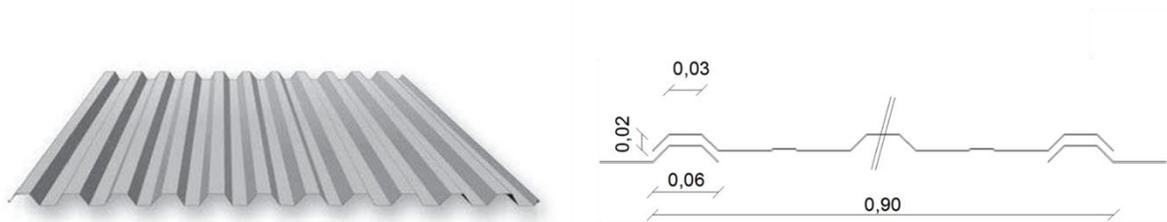


Figura 52 Detalle de la lámina de acero.

La **CUBIERTA PESADA DE LOSA DE HORMIGÓN (CP)** se refiere a una losa de hormigón armado, nervada en los dos sentidos. Esta losa tiene un espesor de 22 cm y un peso aproximado de 2000 kg/m³, y está compuesta por una chapa de hormigón de 5 cm, bloque aligerado de piedra pómez de 15 cm y un enlucido de mortero de cemento de 2 cm en el interior. Esta cubierta tiene una transmitancia térmica alrededor de 2.8 W/ m².K

El acabado superficial de la cubierta de hormigón en esta región es la propia superficie de hormigón. Por lo tanto, las propiedades radiativas de este material en estado nuevo son las siguientes: una reflectividad al el visible alrededor de 0.40 y una emisividad en el infrarrojo térmico alrededor de 0.90, **Figura 53**.

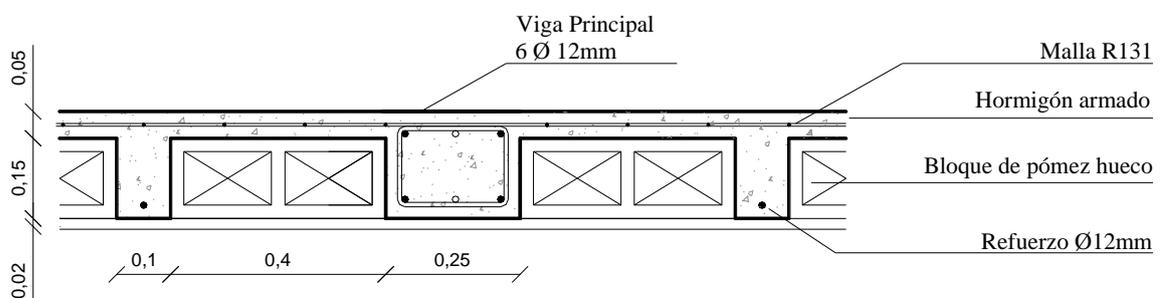


Figura 53 Detalle de la cubierta de losa de hormigón.

– **PARÁMETRO DE ANÁLISIS: TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR (T_{si})**

Dado que el clima de la región Costa del Ecuador está caracterizado por las constantes y altas temperaturas del aire y altos niveles de humedad, al igual que otras regiones de estas latitudes, las condiciones de DISCONFORT TÉRMICO por el sobrecalentamiento interior son una permanente preocupación para los habitantes de esta zona climática.

Esta condición de disconfort interior puede intensificarse o reducirse en función de otras dos variables: la temperatura radiante y la velocidad del aire. Al ser la cubierta la superficie más expuesta a la radiación solar y la que mayor proporción de la envolvente tiene sobre el espacio interior, la temperatura del aire interior (T_{ai}) y la temperatura radiante media (T_{mrt}) de las viviendas **dependen** del comportamiento térmico de este elemento, en específico de su **temperatura superficial interior (T_{si})**. Bajo este contexto, el desempeño térmico de la superficie interior de la cubierta puede intensificar o reducir las condiciones de disconfort térmico en el ambiente interior.

Numerosas estrategias se han enfocado en reducir la temperatura del aire para reducir las condiciones de disconfort interior, a través del uso de sistemas pasivos o activos de refrigeración. Sin embargo, aunque la T_{ai} disminuya, si la T_{si} de la cubierta no se reduce la T_{mrt} tampoco y en consecuencia el disconfort del usuario persistirá.

En base a lo descrito, la **TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR (T_{si})** de la cubierta se ha escogido como el **PARÁMETRO DE ANÁLISIS** para esta investigación.

En consecuencia, **EL MEJOR DESEMPEÑO TÉRMICO** entre las dos cubiertas está en función de la menor temperatura superficial interior que puedan ofrecer, lo que implica un menor disconfort interior y en consecuencia una menor demanda energética de las viviendas de esta región.

La **Figura 54** detalla un esquema de los flujos de energía, parámetro de análisis y casos de estudio que se toman en consideración para el desarrollo de la investigación.

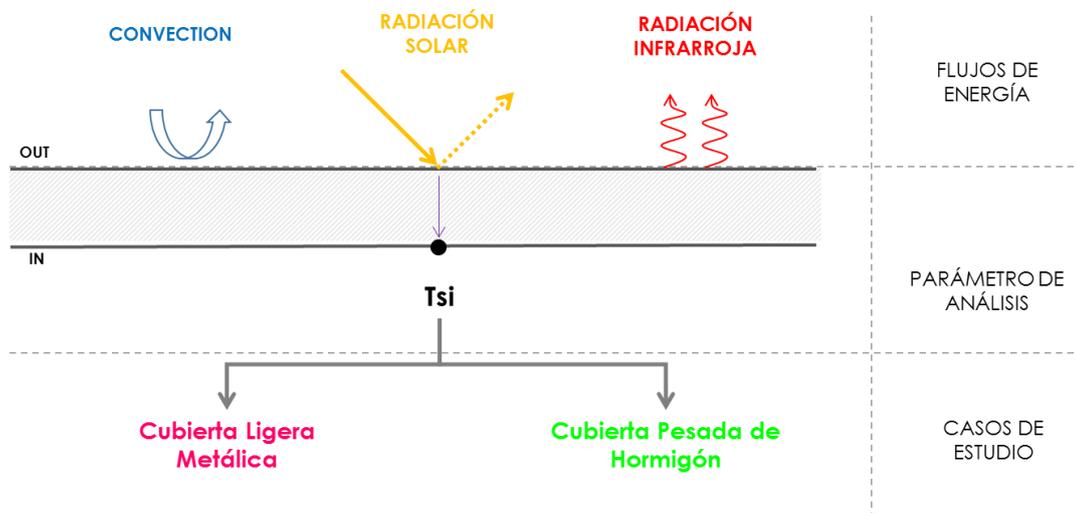


Figura 54 Esquema de los Flujos de calor, Parámetro de análisis y Casos de Estudio considerados para esta investigación.

– VARIABLES DE ANÁLISIS

De acuerdo a los estudios analizados en el capítulo anterior, se han escogido las siguientes variables de análisis como las más significativas tanto a nivel material como morfológico, para determinar la influencia independiente de cada una de ellas sobre el comportamiento térmico de las dos cubiertas de análisis en el clima cálido-húmedo.

1. LA INCLINACIÓN
2. ORIENTACIÓN
3. REFLECTIVIDAD AL VISIBLE
4. EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO
5. LA DOBLE CAPA.

Cada uno de estas variables cuenta con diferentes variantes.

La dos primeras variables se han analizado en conjunto. Es decir, para la **INCLINACIÓN** se han considerado 4 variantes: 0%-15%-30%-45%, y cada una de estas variantes se han analizado con las **ORIENTACIONES**: norte-sur-este-oeste.

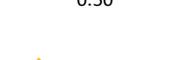
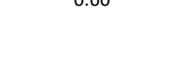
Las variaciones de inclinación son correspondientes a las características más comunes de las cubiertas en Ecuador, donde las mayores pendientes encontradas son del 45%.

Para la tercera y cuarta variable, se han tomado en cuenta 3 variantes: 0.25-0.5-0.75 para la **REFLECTIVIDAD** al visible, y 0.30-0.60-0.90 para el factor de **EMISIVIDAD** al infrarrojo térmico. Las variantes de las propiedades radiativas manejan valores típicos de los materiales analizados: la lámina metálica galvanizada y el hormigón.

La última variable a analizarse es la **DOBLE CAPA**. Esta estrategia consiste en añadir una capa a las dos cubiertas analizadas (CL y CP), separada por una cámara de aire ventilada. Esta segunda capa corresponde a una plancha de cartón-yeso de 125mm de espesor, que se utiliza como un cielo raso y corresponde a uno de los materiales más usados en esta región. Basado en estudios previos, se ha configurado el ancho de la cámara de aire en 10 cm [Escobar, 2013].

La **Tabla 4** muestra un resumen de las variables y las variantes de cada una de estas.

Tabla 4 Variables y variantes de análisis, parámetro de análisis y casos de estudio.

CUBIERTAS DE ANÁLISIS	PARÁMETRO DE ANÁLISIS	VARIABLES						
		INCLINACIÓN-ORIENTACIÓN				REFLECTIVIDAD	EMISIVIDAD	DOBLE CAPA
		N	S	E	O			
CL	Tsi							
		0%				0.25	0.30	
								
		15%				0.50	0.60	
								
CP		30%				0.75	0.90	
								
		45%						

– **PERIODO DE ANÁLISIS**

Una vez establecidas las variables y el parámetro de análisis, a continuación se plantean los periodos en que serán evaluadas. En busca de tener una visión general del comportamiento térmico de la cubierta a lo largo del año, se han definido dos días Tipo: un Día Tipo Promedio y un Día Tipo Extremo.

Dado que en este clima, la temperatura del aire es poco variable a lo largo del año, el factor climático utilizado para definir los días tipo ha sido la RADIACIÓN SOLAR. Los valores del flujo solar tomados para definir estos días corresponden a los datos reales medidos durante un año por una estación meteorológica cercana a la ciudad de análisis.

Para definir los días de análisis, todos los datos recolectados han sido evaluados estadísticamente. El proceso de evaluación se muestra en el ANEXO A2.1.3 *DEFINICIÓN DEL DÍA DE ANÁLISIS*.

Además de la definición del parámetro de la radiación solar y otros factores como la temperatura del aire y niveles de humedad de los dos días de análisis, se han medido otros dos parámetros que usualmente son obtenidos por aproximaciones matemáticas: la NUBOSIDAD DEL CIELO y la TEMPERATURA DEL CIELO.

Los valores promedios de estos dos días: DÍA PROMEDIO y DÍA EXTREMO, se muestran a continuación, **Tabla 5**. (Los valores horarios de estos días se detallan en un apartado posterior)

Tabla 5 Valores promedio de radiación solar, cobertura del cielo, temperatura del cielo y temperatura del aire del DÍA PROMEDIO y el DÍA EXTREMO.

	DÍA PROMEDIO	DÍA EXTREMO
RADIACIÓN SOLAR	2.6 kWh/m ²	4.5 kWh/m ²
COBERTURA DEL CIELO	92%	83%
TEMPERATURA DEL CIELO	18.8°C	15.5°C
TEMPERATURA DEL AIRE	24.5°C	25.1°C

Para conseguir una descripción detallada del desempeño térmico de estas cubiertas en el ciclo del día (24h), el parámetro de análisis será evaluado de manera independiente en el PERIODO DIURNO y en el PERIODO NOCTURNO, a través de los VALORES PROMEDIO en cada uno de estos periodos.

Para esto, los dos días de análisis se han dividido en el periodo diurno, de 06h00-18h00, y en el periodo nocturno, que comprende un primer periodo de 00h00 - 06h00 y un segundo periodo de 18h00 - 24h00. Dadas las condiciones geográficas del Ecuador, estos dos periodos poseen casi las mismas horas durante todo el año (12 horas).

A continuación se muestra un resumen de las variables y periodos de análisis de esta investigación, **Tabla 6**.

Tabla 6 Periodo de análisis, parámetro de análisis y variables.

PERIODO DE ANÁLISIS		PARÁMETRO DE ANÁLISIS	VARIABLES			
			Inclinación/ Orientación	Reflectividad	Emisividad	Doble Capa
DÍA PROMEDIO	Diurno	Tsi (promedio diurno)	15%	0.25	0.30	Cámara de aire + Yeso cartón
	Nocturno	Tsi (promedio nocturno)	30%	0.50	0.60	
DÍA EXTREMO	Diurno	Tsi (promedio diurno)	15%	0.25	0.30	Cámara de aire + Yeso cartón
	Nocturno	Tsi (promedio nocturno)	30%	0.50	0.60	
			45%	0.75	0.90	

La evaluación de estas cubiertas en los dos días de análisis: DÍA PROMEDIO Y DÍA EXTREMO, y los dos periodos de análisis: PERIODO DIURNO Y PERIODO NOCTURNO, nos permite tener una visión más amplia del comportamiento térmico de la cubierta y de las estrategias planteadas tanto en el ciclo del día como a lo largo del año.

3.2 ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN

Con el fin de evaluar el comportamiento térmico de las dos tipologías de cubierta de análisis y el impacto de cada una de las variables frente a las condiciones climáticas reales de esta región, la metodología de esta investigación se lleva a cabo a través de **SIMULACIONES DIGITALES**.

No obstante, antes de realizar esta evaluación, se ha realizado una validación del modelo de cálculo a través de mediciones realizadas *in situ*, para obtener resultados de una mayor precisión.

El proceso de investigación se ha desarrollado en tres etapas: la Configuración de las simulaciones, la Validación de las Simulaciones y el Análisis de los Resultados, **Figura 55**.

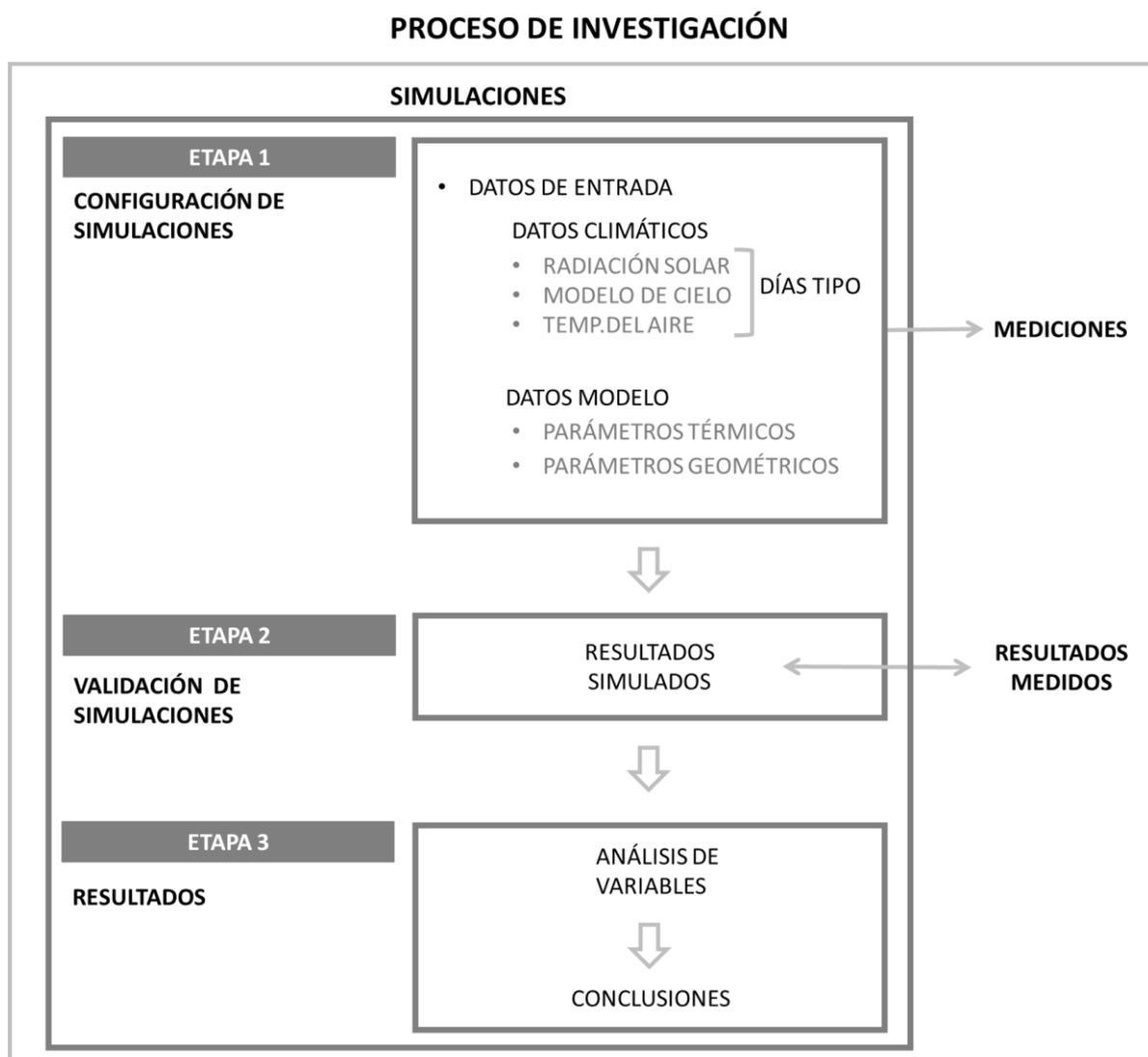


Figura 55 Diagrama esquemático del proceso de investigación.

La primera etapa, **CONFIGURACIÓN DE LAS SIMULACIONES**, se centra en la obtención de los datos de entrada para el software de simulación a través de mediciones realizadas *in situ*. Tanto los factores climáticos como las propiedades radiativas, térmicas y geométricas de la cubierta han sido obtenidas del trabajo de campo.

Los datos climáticos medidos han servido para configurar el archivo climático (EPW) que utiliza el software de simulación, mientras que las propiedades de las cubiertas sirvieron para detallar las características del modelo de validación.

Una vez realizada la configuración de los datos de entrada del software de simulación, se obtuvieron los resultados, que fueron comparados con los resultados medidos para realizar la **VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN**.

Los parámetros utilizados para realizar esta validación han sido: la temperatura superficial exterior, la temperatura superficial interior y la temperatura del aire interior de cada una de las dos cubiertas y del espacio que cubren, tanto la cubierta ligera metálica (CL) como la cubierta pesada de hormigón (CP).

En la etapa final de **RESULTADOS** se evalúan las variables planteadas. Para la evaluación de estas variables se obtuvieron unos resultados base, a partir de los cuales se valora la influencia de cada una de estas estrategias sobre los dos tipos de cubierta. La efectividad de cada variable ha sido determinada de manera independiente en cada una de las dos cubiertas.

Una vez definido que parámetros son los más relevantes para cada tipo de cubierta, se comparan los comportamientos térmicos de las dos tipologías.

Finalmente, con el análisis de todos los resultados obtenidos se establecen las **CONCLUSIONES** de esta investigación.

En el presente capítulo se desarrollan las dos primeras etapas de este proceso de investigación: **CONFIGURACIÓN** y **VALIDACIÓN DE LAS SIMULACIONES**. La fase de **RESULTADOS** se muestra en un capítulo independiente.

3.3 CONFIGURACIÓN DE LAS SIMULACIONES

El programa de simulación utilizado en esta investigación ha sido el software **DESIGN BUILDER** [DesignBuilder, 2016]. Esta plataforma utiliza como motor de cálculo a **ENERGY PLUS** [DOE, 2017], especializada en la simulación térmica y energética de los edificios.

En términos generales, Energy Plus, al igual que otros simuladores energéticos, relaciona unos **DATOS DE ENTRADA** con un **MODELO DE CÁLCULO DINÁMICO** para simular y determinar el flujo de calor a través de los elementos analizados.

La parte de la **CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN** en que se centra esta investigación es la calibración de los **DATOS DE ENTRADA** a partir de mediciones realizadas en campo. **Figura 56**.

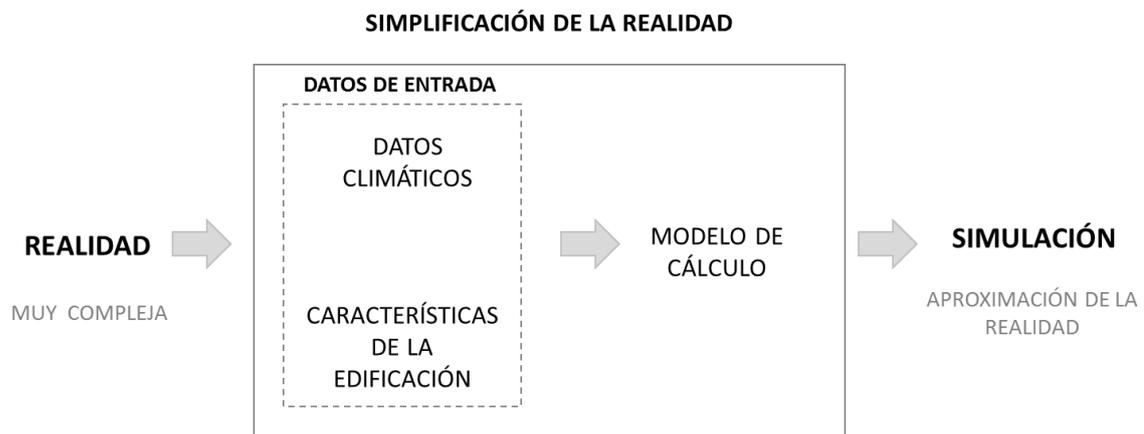


Figura 56 Esquema del funcionamiento de las simulaciones energéticas.

En específico los datos de entrada a calibrarse son: los **DATOS CLIMÁTICOS** y las **CARACTERÍSTICAS DE LA EDIFICACIÓN**.

En cuanto a los **DATOS CLIMÁTICOS**, el archivo climático EPW (Energy Plus Weather) de la región de análisis es inexistente (región Costa del Ecuador). Por lo tanto, hubo que realizar una campaña de mediciones para crear y configurar este archivo.

Como estableció previamente, a partir de la información climática recolectada se ha realizado una caracterización detallada del clima de esta región. A partir de esta información se han definido las características climáticas de los **DÍAS DE ANÁLISIS** (Día Promedio y Día Extremo) para ingresar como datos de entrada al programa informático.

La mayoría de datos se ingresaron de manera directa. Sin embargo, otros datos fueron calculados a partir de los datos medidos y en base a los algoritmos utilizados por el software [ENERGYPLUS, 2015] [Clark and Allen, 1978] [Berdahl and Fromberg, 1982].

En lo que se refiere a la **CARACTERIZACIÓN DE LA EDIFICACIÓN**, las características geométricas y térmicas de las dos tipologías de cubierta y los espacios que cubren han sido medidas en dos edificios residenciales que sirvieron como modelos de validación.

Estas mediciones han prestado especial atención a los parámetros radiativos de las cubiertas de análisis: la REFLECTIVIDAD al visible y la EMISIVIDAD al infrarrojo térmico.

Además de las propiedades radiativas de las cubiertas, este trabajo de campo se centró en la medición de varios parámetros térmicos de la cubierta y del espacio que cubren, para utilizarse como parámetros de validación de los resultados simulados.

Los factores climáticos y los parámetros de las dos cubiertas fueron medidos simultáneamente durante **1 semana del mes octubre (06 al 12) y 1 semana del mes de diciembre (04 al 10) de 2016** en la **ciudad de Santa Rosa-El Oro-Ecuador**.

A continuación se describen los detalles y resultados de las mediciones de los FACTORES CLIMÁTICOS y los PARÁMETROS DE LA CUBIERTA.

3.3.1 FACTORES CLIMÁTICOS.

Los factores climáticos medidos han sido:

- Temperatura del aire (T_a), °C.
- Humedad relativa (H), %.
- Temperatura del rocío (T_{dp}), °C.
- Presión atmosférica (PA), Pa.
- Velocidad del viento (v), m/s.
- Dirección del viento (dv), °.
- Radiación solar global (RS), W/m².

Todos estos datos han sido tomados de dos estaciones meteorológicas [WeatherCompanyLLC, 2016a] [WeatherCompanyLLC, 2016b]. Sin embargo, otros dos parámetros que con frecuencia son obtenidos por cálculo o imágenes satelitales han sido medidos por el autor:

- La COBERTURA DEL CIELO (cloud cover), décimas.
- La TEMPERATURA DEL CIELO (T_{sky}), °C.

El proceso de medición y la instrumentación utilizada para todos estos parámetros se muestra en el **ANEXO A2.1.1 PROCESO DE MEDICIÓN** y **ANEXO A2.4 INSTRUMENTACIÓN**

Dada la importancia de la **RADIACIÓN SOLAR** y **LA NUBOSIDAD DEL CIELO** en esta región, se ha dado especial importancia a la configuración de estos factores climáticos en el archivo EPW. A continuación, se resaltan varios aspectos de los resultados de estas dos condiciones climáticas.

– RADIACIÓN SOLAR

Para un análisis más detallado del flujo de radiación solar en esta región se han utilizado datos de estación meteorológica medidos a lo largo de todo el año 2016.

Estos datos obtenidos por mediciones se han comparado con los valores obtenidos por simulación con el software Heliadón 2.6 y con los valores obtenidos del atlas solar del Ecuador [Conelec, 2008]. Los valores simulados consideran un modelo de cielo totalmente despejado y los valores del atlas solar consideran una corrección de la nubosidad del cielo obtenida a partir de imágenes satelitales.

Esta comparación nos permite validar los resultados medidos y obtener una perspectiva del impacto real que tiene la nubosidad del cielo sobre la radiación solar en esta región.

La **Figura 57** muestra los promedios mensuales de radiación solar provenientes de las tres fuentes, la radiación solar medida (línea continua), la radiación del atlas solar que considera una corrección de nubosidad (línea entrecortada) y la radiación solar simulada con un cielo despejado (línea de puntos). Además todos estos valores se comparan con los promedios de nubosidad mensual obtenidos de la plataforma online EarthEnv [Wilson and Jetz, 2016].

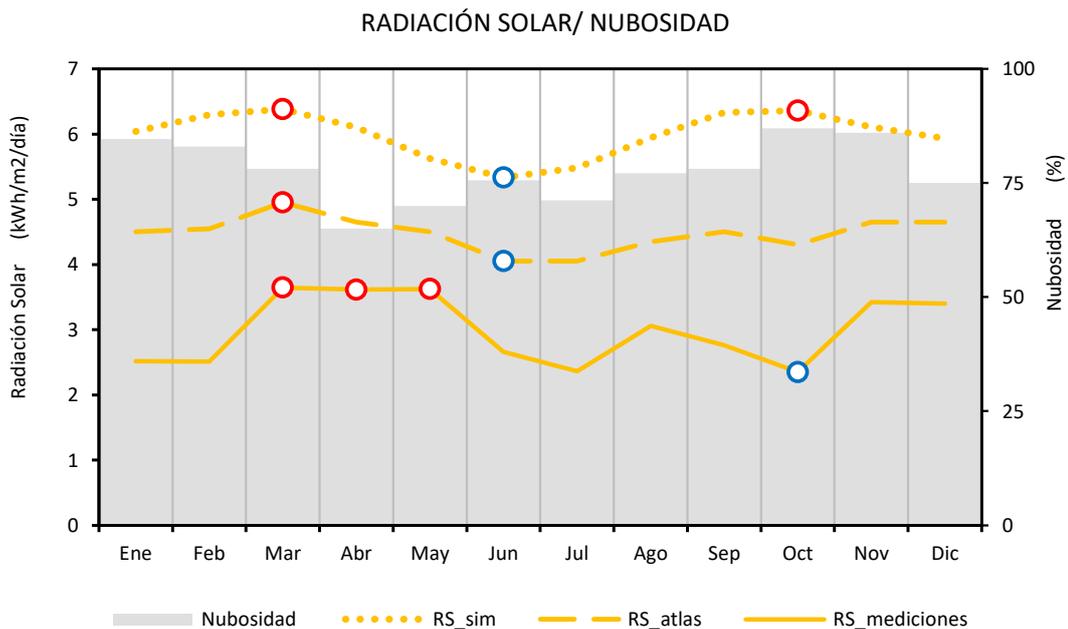


Figura 57 Comparación entre los promedios mensuales de la Nubosidad del Cielo y la Radiación Solar obtenidos por: simulación (RS_simul), atlas solar (RS_atlas) y mediciones (RS_medic).

Tal como se analizó en el apartado de clima de referencia, los valores obtenidos del atlas solar (RS_atlas) muestran una reducción promedio anual del 25% en comparación con los datos generados por el software de simulación (RS_simul). Esta reducción se debe a que el modelo de cálculo utilizado por el atlas solar considera un factor de corrección por la nubosidad del cielo, mientras que los datos de simulación utilizan un modelo de cielo teórico totalmente despejado.

Al analizar los valores medidos por la estación meteorológica (**RS_medic**), esta vez se muestra una **reducción media anual del 50%**, en comparación con los valores de simulación (RS_sim), y del 25% en comparación con los datos del atlas solar (RS_atlas).

Estos porcentajes de reducción, entre los valores medidos y simulados, van desde un 36% en el mes de abril hasta un 65% en el mes de octubre, coincidiendo con los meses de menor y mayor nubosidad, 70% y 87% respectivamente.

Aunque la radiación promedio máxima de los datos medidos coincide en el mes de marzo, al igual que en el caso de los datos simulados y del atlas solar, los otros promedios mensuales cambian de manera significativa. La mayor variación se muestra en el mes de octubre, que pasa de ser uno de los meses con mayor radiación al mes con menor radiación.

Este análisis evidencia dos aspectos relevantes del impacto de la nubosidad del cielo sobre la radiación solar en esta región.

Por un lado, estos resultados evidencian que **la radiación solar global no está influenciada de manera principal por la geometría solar, sino por la nubosidad del cielo**. Es decir, los valores máximos y mínimos de radiación solar en esta región no suceden necesariamente en los meses de equinoccio o solsticio respectivamente, sino están función del porcentaje de nubosidad del cielo a lo largo del año.

Por otro lado, los datos analizados muestran que **el impacto de la nubosidad sobre la reducción del flujo solar es más fuerte del considerado en el modelo de cálculo del atlas solar**. Lo que representa un 25% de diferencia entre los promedios anuales de estos dos valores.

De acuerdo a todo lo expuesto se pueden resaltar varias consideraciones sobre las fuentes que se han utilizado para describir el flujo de radiación solar en esta región.

Por una parte, los valores de radiación solar obtenidos por simulaciones, describen de manera imprecisa el comportamiento de este flujo en esta región, tanto sus tendencias a lo largo del año, como el flujo en términos de cantidad.

Por otra parte, aunque los valores del atlas solar si describen la tendencia de este flujo en función de la nubosidad a lo largo del año, sus valores aún muestran una diferencia del 25% con los resultados medidos.

Por tanto, el uso de los valores de radiación solar tomados de las simulaciones o del atlas solar, supondría una desviación de los resultados del 50% y 25% respectivamente, en comparación con la radiación solar real.

– NUBOSIDAD Y TEMPERATURA DEL CIELO.

Un aspecto fundamental para la correcta configuración del archivo climático de esta región es la CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL CIELO, especialmente en la región de análisis.

Para caracterizar el comportamiento térmico del cielo, esta investigación se ha centrado en los parámetros de la NUBOSIDAD DEL CIELO y la TEMPERATURA DEL CIELO. Aunque con frecuencia estos parámetros son calculados, esta investigación se basa en datos medidos para la definición de estos dos parámetros.

La importancia de estos factores climáticos radica en su influencia para definir tanto el flujo solar como la capacidad de enfriamiento del cielo.

Por un lado, la nubosidad del cielo o PORCENTAJE DE COBERTURA DEL CIELO define la proporción de las componentes del flujo solar, la **RADIACIÓN DIRECTA** y la **RADIACIÓN DIFUSA**.

Por otro parte, la TEMPERATURA DEL CIELO se ha utilizado para definir el flujo de **RADIACIÓN HORIZONTAL INFRARROJA**.

La radiación horizontal infrarroja es el flujo de radiación de onda larga que emite la bóveda celeste, y que describe la capacidad de enfriamiento del cielo. Los simuladores energéticos utilizan este flujo para determinar la radiación de onda larga neta emitida que es capaz de emitir la cubierta (o cualquier superficie) hacia el cielo, y en consecuencia determinar el balance térmico de la cubierta.

De manera común este flujo se calcula a partir de algoritmos que relacionan la temperatura del aire con el porcentaje de cielo cubierto, como lo hace Energy Plus o cualquier simulador energético. Sin embargo, dada la importancia de este parámetro para esta investigación, la definición de este flujo se ha realizado de manera directa a partir de las mediciones de la temperatura del cielo realizadas *in situ*.

Con el propósito de realizar una caracterización completa de estos dos parámetros, las mediciones se llevaron a cabo tanto en el periodo diurno como en el periodo nocturno. Estos datos permiten relacionar la cobertura del cielo con la radiación solar en el periodo diurno, y además detallar la capacidad de enfriamiento del cielo en esta región tanto en el día como en la noche.

El proceso de medición utilizado para la nubosidad del cielo fue la observación, mientras que para la temperatura del cielo se realizaron mediciones puntuales de varias partes de la bóveda celeste con el uso de un termómetro de laser por infrarrojo. Estas mediciones fueron corroboradas a través de imágenes fotográficas e imágenes térmicas de la bóveda celeste, **Figura 58**.

El proceso de medición, instrumentación y los resultados totales de estos dos parámetros se muestra en el ANEXO A2.1.1 PROCESO DE MEDICIÓN y ANEXO A2.4 INSTRUMENTACIÓN. Además en el ANEXO A2.3.1 NUBOSIDAD DEL CIELO se muestra un registro fotográfico del comportamiento de la nubosidad del cielo a lo largo de diferentes días de los periodos de medición.

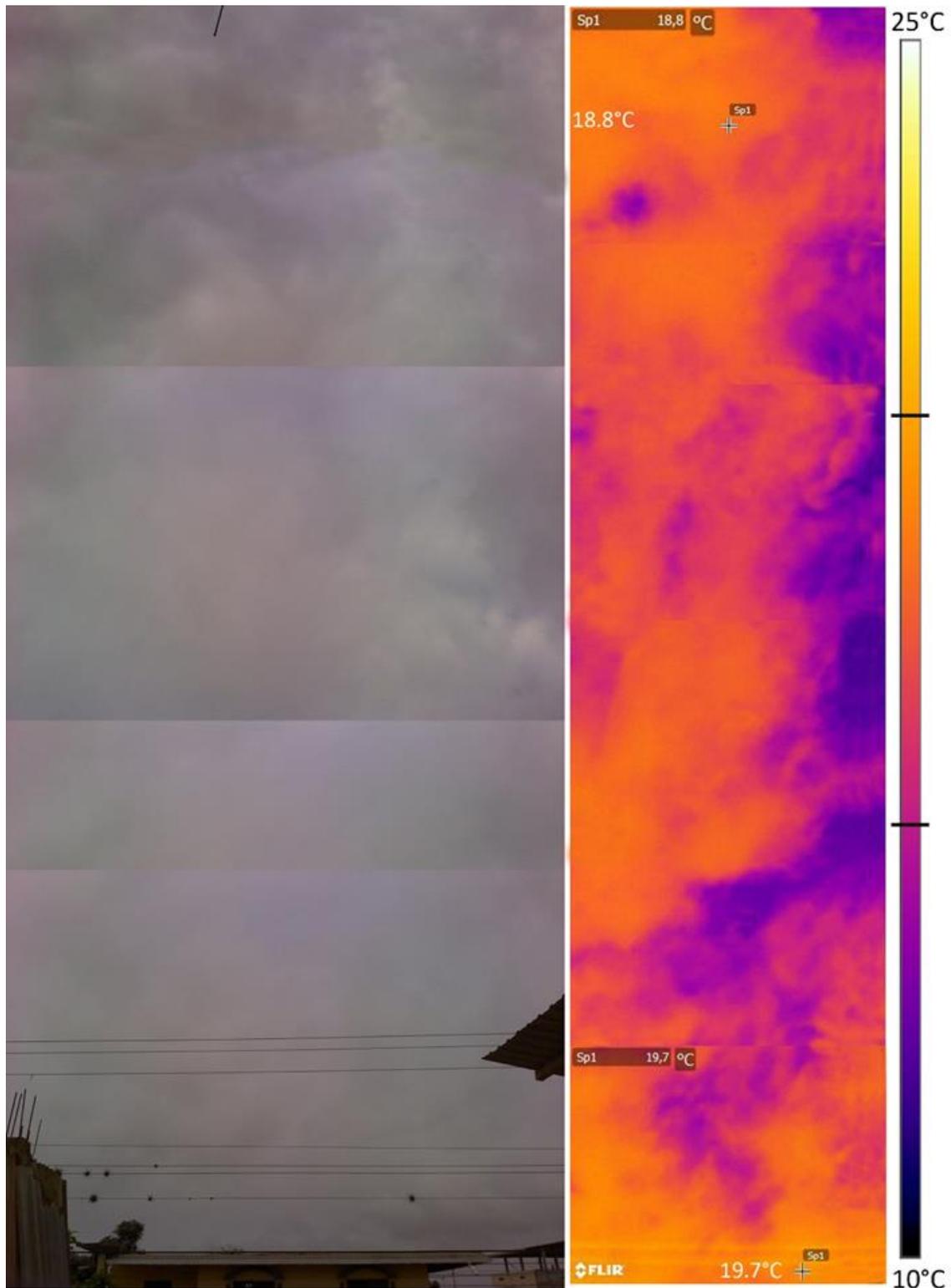


Figura 58 Imagen fotográfica (izquierda) e imagen térmica (derecha) de un semi arco de la bóveda celeste, en el periodo diurno de un día promedio de radiación solar en la ciudad de Santa Rosa.

Los datos obtenidos a través de las mediciones de estos parámetros han sido comparados con los datos obtenidos de otras fuentes que utilizan aproximaciones por cálculo.

En lo que respecta a la **NUBOSIDAD DEL CIELO**, los resultados obtenidos del mes de octubre y diciembre se comparan con los obtenidos de la plataforma online EarthEnv [Wilson and Jetz, 2016], la cual usa un modelo de simulación en base a imágenes satelitales, **Figura 59**.

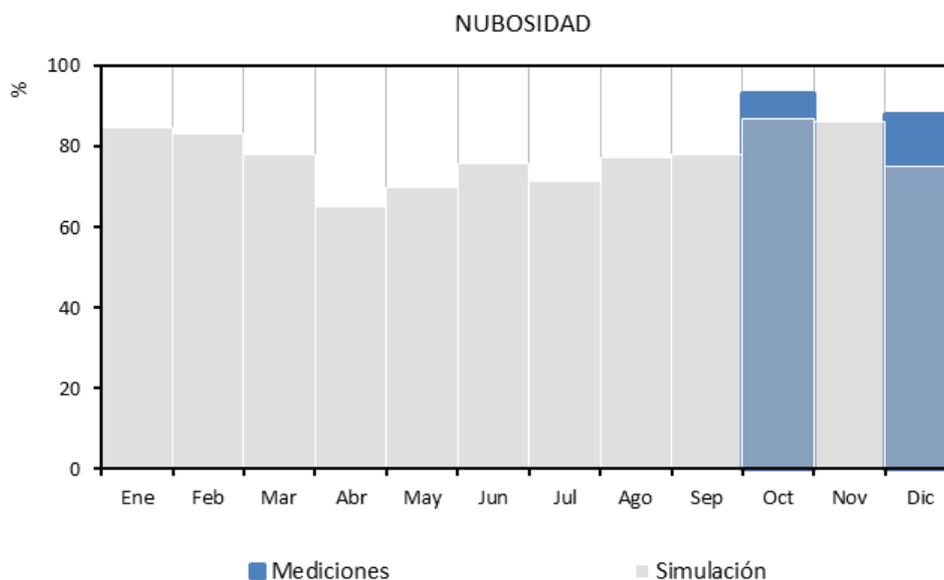


Figura 59 Comparación de los datos medidos y simulados de la nubosidad del cielo en el mes de octubre y diciembre.

Los resultados resaltan que la nubosidad del cielo medida (mediciones) muestra la misma tendencia mostrada en los resultados simulados (simulación), es decir un porcentaje de nubosidad mayor en el mes de octubre que en el mes de diciembre.

Sin embargo, existe una diferencia en términos cuantitativos, **los valores medidos muestran un porcentaje de cielo cubierto mayor que los simulados**. En el mes de octubre se muestra una diferencia del 6%, de 93% a 87%, mientras que en el mes de diciembre se muestra una diferencia más marcada del 13%, de 88% a 75%.

La diferencia entre los datos medidos y simulados de la nubosidad del cielo se puede asociar a la diferencia mostrada en el parámetro de la radiación solar. Esto implica que, la diferencia del 25% de la RADIACIÓN SOLAR GLOBAL entre los datos medidos y los calculados por el modelo del atlas solar está relacionada a las imprecisiones del porcentaje de cobertura del cielo.

Además, de acuerdo al porcentaje de cobertura del cielo medido, se ha determinado que la proporción promedio entre la RADIACIÓN DIRECTA y la RADIACIÓN DIFUSA es **18%-82%**. Sin embargo, de acuerdo a los modelos de cálculo del atlas solar esta proporción es 40%-60% respectivamente. Por tanto, la predominancia de la radiación difusa sobre la radiación directa en esta región es mayor que la que se muestra en los datos del atlas solar.

En lo que respecta al flujo de la **RADIACIÓN HORIZONTAL INFRARROJA (RHI)**, se ha realizado una comparación de este flujo entre los valores obtenidos con un CIELO TOTALMENTE DESPEJADO y con EL CIELO CUBIERTO de un DÍA PROMEDIO, de acuerdo a las mediciones realizadas, **Figura 60**. El Día Promedio presenta un porcentaje de cielo cubierto del 92%.

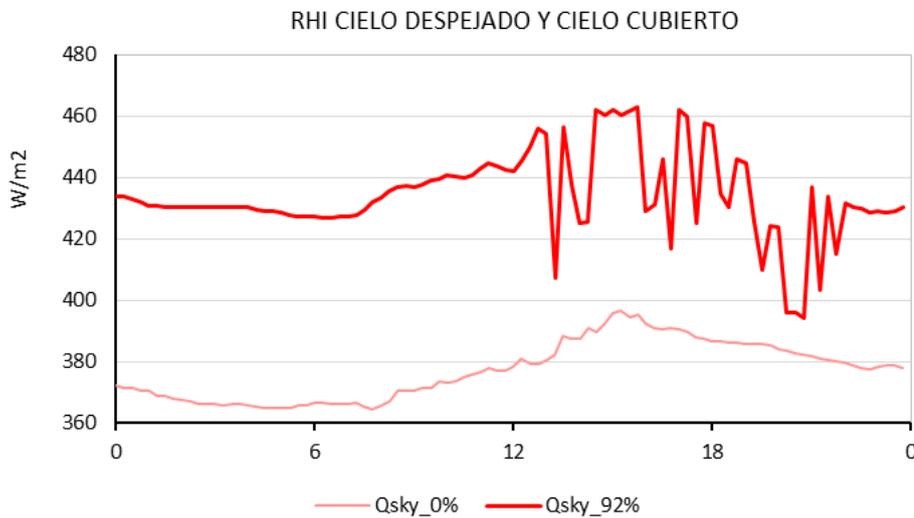


Figura 60 Comparación entre la radiación horizontal infrarroja con un cielo teórico totalmente despejado ($Q_{sky_0\%}$) y con el cielo cubierto de un DÍA PROMEDIO de acuerdo a las mediciones ($Q_{sky_92\%}$).

Conforme a estos resultados, la diferencia promedio del flujo de radiación horizontal infrarroja entre un cielo cubierto al 92% y un cielo totalmente despejado es de 62 W/m^2 (de 437 a 375 W/m^2), lo que representa una diferencia del **17%**.

Además, se ha realizado una comparación del flujo de radiación horizontal infrarroja de un cielo cubierto (92%) entre los valores obtenidos de las mediciones de la temperatura del cielo con los valores obtenidos del modelo usado por Energy Plus, **Figura 61**.

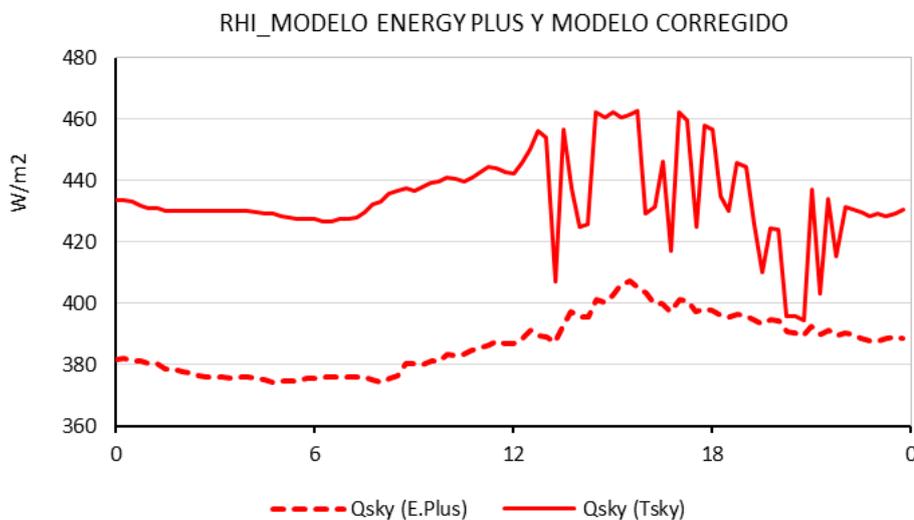


Figura 61 Comparación entre la radiación horizontal infrarroja de un cielo cubierto (92%) obtenida a través de las mediciones de la temperatura del cielo, $Q_{sky} (T_{sky})$, y los valores obtenidos con el algoritmo de Energy Plus, $Q_{sky} (E.Plus)$.

La diferencia promedio del flujo de radiación horizontal infrarroja entre los resultados obtenidos a partir de la temperatura de cielo medida ($Q_{sky_T_{sky}}$) y los resultados obtenidos con el modelo de cielo de Energy Plus ($Q_{sky_E.Plus}$) es de 51 W/m^2 (de 386 a 375 W/m^2), lo que representa una diferencia del **12%**.

Los flujos obtenidos con los dos modelos han sido validados con los resultados de las temperaturas de las cubiertas medidas (ver *ANEXO A3.2.1 VALIDACIÓN MODELO DE CIELO ENERGY PLUS VS MODELO DE CIELO RECTIFICADO*) donde se muestra que los resultados calculados a partir de las mediciones de la temperatura del cielo (T_{sky}) tienen una mayor precisión que los resultados a partir del modelo de Energy Plus.

Aunque los modelos de cálculo para cielos despejados tienen una gran precisión para la simulación del flujo de calor emitido por el cielo, no es así para los cielos cubiertos.

Según los resultados obtenidos **la capacidad de enfriamiento del cielo en estas regiones es 12% menor al que definen los modelos de cálculo utilizados por los simuladores energéticos para cielos nublados.**

Las diferencias mostradas del flujo de radiación horizontal infrarroja, entre un cielo despejado y un cielo nublado, no son tan amplios en términos de porcentaje. Sin embargo, dado que este flujo está en función de la temperatura del cielo elevada a la cuarta, cualquier variación de este flujo por pequeña que sea tiene una gran relevancia sobre el comportamiento térmico de la cubierta (ver *ANEXO A3.1.1 CONFIGURACIÓN DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS*)

– CONFIGURACIÓN DE LOS DÍAS DE ANÁLISIS.

Con excepción de la radiación normal directa, la radiación difusa, y la radiación horizontal infrarroja (radiación emitida por el cielo), todos los factores climáticos (que utiliza Energy Plus) han sido introducidos de manera directa al archivo EPW desde los datos recolectados de la estación meteorológica.

La RADIACIÓN NORMAL DIRECTA Y LA RADIACIÓN DIFUSA en el plano horizontal han sido obtenidas a partir de los datos medidos *in situ* de la radiación solar global y el porcentaje de cobertura del cielo.

En cuanto a la RADIACIÓN HORIZONTAL INFRARROJA DEL CIELO, este flujo ha sido obtenido, por un lado, con el uso del modelo de cielo de Energy Plus, y por otro lado, con el modelo de cielo basado en las mediciones de la T_{sky} . Los resultados con los dos modelos han sido validados en función de los resultados del comportamiento de la cubierta.

Los detalles específicos de la configuración del software Energy Plus se precisan en el ANEXO A3.1.1 *CONFIGURACIÓN DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS*.

De todas las mediciones realizadas, tanto en octubre como en diciembre, los datos utilizados para la configuración del archivo EPW han sido los de la semana del 06 al 12 de octubre de 2016.

Esta semana ha sido escogida porque tiene días con condiciones climáticas más similares a los días de análisis planteados, que los días medidos en el mes de diciembre.

Las simulaciones y validaciones se realizaron durante los 7 días de esta semana (06-12octubre), no obstante, para la evaluación de los resultados de esta tesis se utilizaron sólo los días de análisis: el DÍA PROMEDIO y el DÍA EXTREMO.

Para la elección del DÍA PROMEDIO y DÍA EXTREMO se realizó un análisis estadístico con todos los datos medidos de la estación meteorológica durante el año 2016. Tanto la configuración y definición de estos días, como los datos de toda la semana de mediciones se muestra en el ANEXO A3.1.2 *ARCHIVO CLIMÁTICO*. El registro fotográfico de la nubosidad del cielo a lo largo de los dos días de análisis se muestra en el ANEXO A2.3.1 *NUBOSIDAD DEL CIELO*.

A continuación se muestran las condiciones climáticas a lo largo del Día Promedio y del Día Extremo: Radiación Solar (RS), Porcentaje de Cobertura del Cielo (cloud cover), Temperatura del Aire (T_a), Humedad Relativa (HR), Temperatura del Cielo (T_{sky}), **Figura 62**.

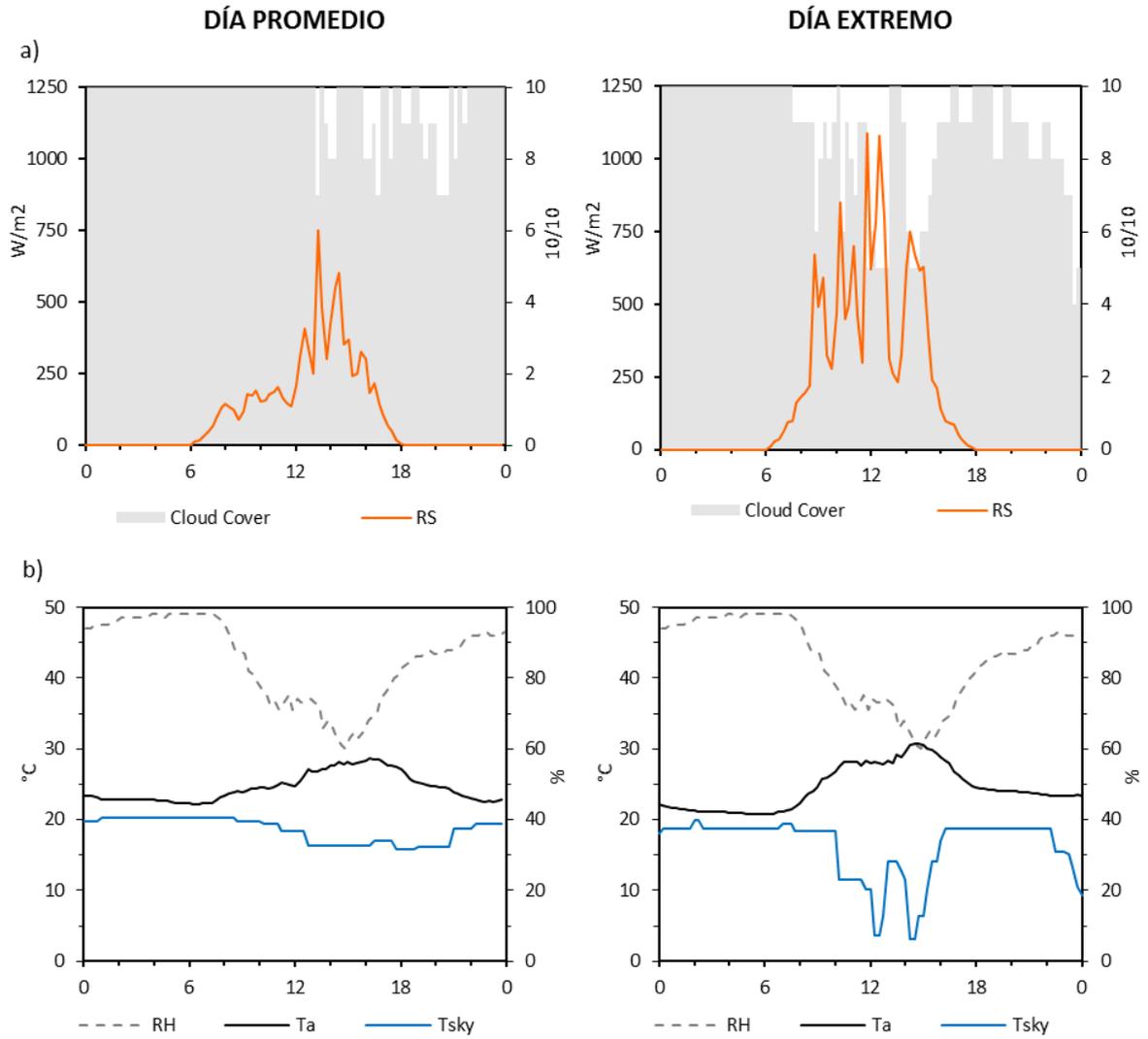


Figura 62 Valores horarios de las condiciones climáticas del DÍA PROMEDIO (izquierda) y el DÍA EXTREMO (derecha): a) Radiación Solar (RS), Porcentaje de cielo cubierto (cloud cover). b) Temperatura del Aire (T_a), Humedad Relativa (RH) y Temperatura del cielo (T_{sky}).

3.3.2 PARÁMETROS DE LA CUBIERTA

Para realizar una caracterización precisa de los PARÁMETROS DE LA CL Y LA CP se ha llevado a cabo una campaña de mediciones en dos viviendas de la ciudad de Santa Rosa. Las características geométricas y térmicas de estas dos viviendas y en especial de sus cubiertas han servido como casos de validación para las simulaciones realizadas.

– CASOS DE VALIDACIÓN.

Cada uno de los casos de validación cuenta con una tipología de las cubiertas analizadas: caso de validación 1: CUBIERTA LIGERA METÁLICA, y caso de validación 2: CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN. A continuación se detallan las características generales de estos casos de validación, no obstante la descripción completa se muestra en el ANEXO A 2.2.1 CASOS DE VALIDACIÓN.

CASO DE VALIDACIÓN 1: CUBIERTA LIGERA METÁLICA

Esta vivienda es un edificio de 3 plantas. El espacio medido se ubica en la 3ª planta en el lado sur, su ocupación es nula y no posee ventanas. Las paredes son de bloque aligerado enlucido y pintado, piso de entablado de madera y una CUBIERTA LIGERA METÁLICA que fue instalada en el 2008.

Tabla 7 Especificaciones técnicas del caso de validación 1.

VIVIENDA CON CUBIERTA LIGERA METALICA



ESPECIFICACIONES GENERALES

VIVIENDA (MULTIFAMILIAR 3 PLANTAS)

ZONA MEDICION: 3 PLANTA
Ocupación: 0 personas
Área: 15,05 m²
Área de cubierta : 15,2 m²
Altura: 3,25 m
Volumen: 45,16 m³

CUBIERTA

C1 Plancha de acero TIPO A, NTE INEN 2221
Espesor: 0,0003 m
C2 Recubrimiento de aleación
55% aluminio y 45% zinc
ASTM 792
Pendiente 10%

CASO DE VALIDACIÓN 2: CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN.

Esta vivienda es una edificación de 1 planta construida en el año de 1986. El espacio donde se realizaron las mediciones se ubica en el lado sur, su ocupación es casi nula y no posee ventanas. Las paredes son de bloque aligerado enlucido, piso de hormigón más recubrimiento de cerámica, y una CUBIERTA PESADA DE LOSA DE HORMIGÓN que fue construida en 1998.

Tabla 8 Especificaciones técnicas del CASO DE VALIDACIÓN 2.

CUBIERTA LOSA PESADA DE HORMIGÓN		ESPECIFICACIONES GENERALES
		<p>VIVIENDA 1 PLANTA</p> <p>ZONA MEDICION</p> <p>Ocupación: 0 pers</p> <p>Área: 8,83 m²</p> <p>Área de cubierta : 8,83 m²</p> <p>Altura: 3,25 m</p> <p>Volumen: 28,70 m³</p>
<p>CUBIERTA</p> 	<p>INTERIOR</p> 	<p>CUBIERTA</p> <p>C1. Hormigón armado Espesor: 0,05 m</p> <p>Bloque aligerado de pómez con huecos</p> <p>C2. Mortero de cemento y Espesor: 0,15m</p> <p>C3. Mortero de cemento y Espesor: 0,015m</p> <p>Pendiente 1%</p>

Aunque los dos casos experimentales son similares en varios aspectos: ocupación, características de la envolvente, orientación, carencia de ganancias solares directas, etc; también tienen diferencias notables con respecto al espacio interior y a las cubiertas.

En cuanto al espacio interior resaltan las disimilitudes en lo que respecta a las infiltraciones de aire y diferente posición a nivel del suelo. En cuanto a las cubiertas, estos dos elementos poseen diferentes pendientes, y el contexto urbano inmediato de cada vivienda presenta diferentes obstrucciones. Aunque estas diferencias no son extremas, más adelante se ha creado un **MODELO DE SIMULACIÓN BASE** con el propósito de homogenizar las características de las viviendas.

– PROPIEDADES RADIATIVAS DE LA CL Y LA CP

Dado que, la CUBIERTA LIGERA METÁLCA (**CL**) Y LA CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN (**CP**) de los casos de validación tienen varios años de uso y no han recibido mantenimiento desde su instalación o construcción, las propiedades radiativas de estas cubiertas han sufrido modificaciones. Por lo que se han medido *in situ* las propiedades radiativas actuales.

Las propiedades radiativas se refieren a la REFLECTIVIDAD de la radiación visible y la EMISIVIDAD de la radiación infrarroja térmica. Los datos obtenidos han sido utilizados para la configuración del modelo de simulación de esta tesis.

Por otra parte, para analizar el efecto del envejecimiento en el cambio de las propiedades radiativas de las cubiertas, además de los modelos de validación, se han medido varias muestras más de la cubierta ligera metálica y la cubierta pesada de hormigón.

El proceso de medición y la instrumentación utilizada para la medición de las propiedades radiativas de todas las muestras analizadas en este apartado se muestran en el ANEXO A 2.2.2 PROPIEDADES RADIATIVAS: REFLECTIVIDAD AL VISIBLE Y EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO.

En lo que respecta a la REFLECTIVIDAD al visible y la EMISIVIDAD al infrarrojo térmico de los dos modelos de validación, la **Figura 63** muestra lo resultados de las mediciones en el estado actual (CL/CP) y los compara con los valores de estas cubiertas en su estado nuevo (CL_new/CP_new).

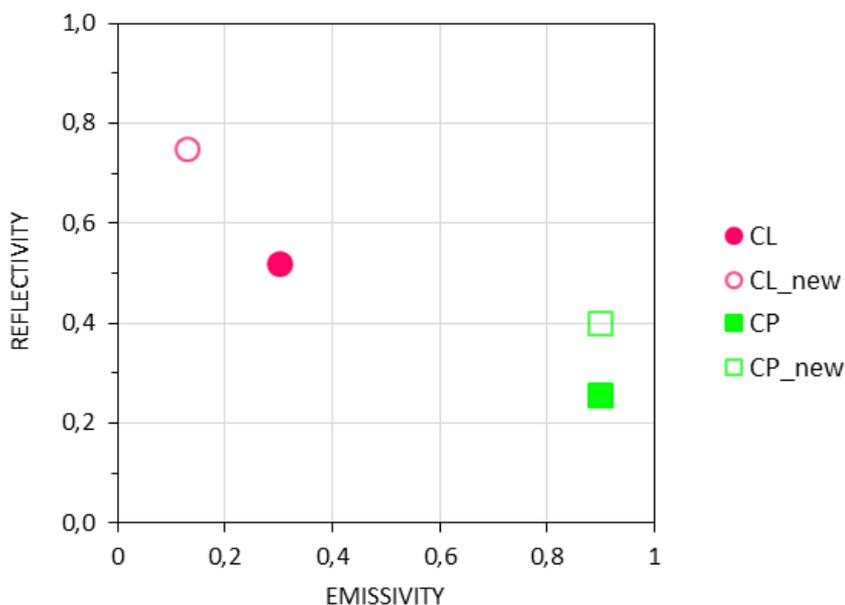


Figura 63 Comparación de los valores de Reflectividad al visible y la Emisividad al infrarrojo térmico de la cubierta metálica y la cubierta de hormigón de los casos de validación (CL / CP), con los valores en su estado nuevo (CL_new/CP_new).

Los valores de reflectividad al visible y emisividad al infrarrojo térmico de las cubiertas en su estado nuevo han sido tomadas de fuentes bibliográficas y corroboradas con mediciones de campo, **Tabla 9** [Bergman *et al.*, 2011][ASHRAE, 2001].

Tabla 9 Valores de reflectividad al visible y emisividad al infrarrojo térmico de la CL y la CP de los casos de validación (estado actual) comparados con los valores en su estado nuevo.

Propiedades Radiativas	CL		CP	
	Estado Nuevo	Estado Actual	Estado Nuevo	Estado Actual
Reflectividad (r)	0.75	0.52	0.4	0.25
Emisividad (ε)	0.13	0.30	0.90	0.90

Los resultados de las propiedades radiativas de la CL y la CP en su ESTADO ACTUAL muestran valores opuestos. Por una parte, la CL presenta un valor de reflectividad al visible medio, 0.52, y un valor de emisividad al infrarrojo térmico bajo, 0.30. Por otro lado, la CP tiene una reflectividad muy baja, 0.25, y un valor de emisividad alto, 0.90. Estos valores son los que se han utilizado para configurar los MODELO DE VALIDACIÓN de las simulaciones.

Si comparamos estos valores con los valores en su ESTADO NUEVO, se puede observar el cambio de estas propiedades con el paso del tiempo, tanto en la CL como en la CP.

En el caso de la CL, la reflectividad muestra una reducción de 0.23, desde 0.75 a 0.52, mientras que la CP tiene una reducción de 0.15, de 0.4 a 0.25. Por otra parte, en el caso de la CL, el factor de emisividad también muestra una modificación, pero esta vez se ve reflejado en un incremento de 0.17, de 0.13 a 0.3; mientras que la CP mantiene el mismo valor.

Es decir, con el paso de los años, una cubierta ligera reduce su reflectividad pero aumenta su emisividad. Sin embargo, una cubierta pesada también reduce su reflectividad aunque su emisividad se mantiene prácticamente intacta

Debido a la acumulación de polvo y sumado a la falta de mantenimiento, la reducción del factor de reflectividad a la radiación visible es una consecuencia común y normal en cualquier superficie con el paso del tiempo, lo que se refleja en los dos tipos de cubierta.

Sin embargo, de acuerdo a estas mediciones, estas mismas circunstancias han repercutido sobre el incremento del factor de emisividad en la CL.

Es decir, **UNA LÁMINA DE ACERO EMPOLVADA PASA DE SER UN MATERIAL PULIDO Y LISO A SER UN MATERIAL CON MAYOR RUGOSIDAD Y MAYOR SUPERFICIE, POR LO CUAL SU EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO SE INCREMENTA.**

Además de las mediciones de las propiedades radiativas de estos dos modelos de validación (CL y CP), se ha medido la reflectividad al visible y la emisividad al infrarrojo térmico de varias muestras de estas dos tipologías de cubierta. Las superficies medidas corresponden a dos tipos de muestras. Por un lado, muestras en su estado actual con varios años de uso (estado original sin ningún recubrimiento); y por otro lado, muestras con diferentes recubrimientos de pintura.

Todas las características de las superficies medidas se detallan en la **Tabla 10**.

Tabla 10 Especificaciones de las muestras medidas de la CL y la CP.

MUESTRAS	CÓDIGO GRÁFICO	ESPECIFICACIONES
CL_new		Estado nuevo
CL_old1		1 año de uso (empolvada)
CL_old5a		5-10 años de uso (empolvada) (caso de validación 1)
CL_old5b		5-10 años de uso (empolvada)
CL_old5c		5-10 años de uso (empolvada)
CL_old5d		5-10 años de uso (empolvada)
CL_cool		+ Pintura cool roof (MIRACOOOL)
CL_white		+ Pintura esmalte normal Blanca
CL_green		+ Pintura esmalte normal Verde
CP_new		Estado nuevo
CP_old		>5 años años de uso (caso de validación 2)
CP_white		+ Pintura esmalte Blanca

Los resultados de todas las muestras medidas tanto de la cubierta liviana como de la cubierta pesada se muestran en la **Tabla 11**.

Tabla 11 Valores de reflectividad al visible y al infrarrojo térmico de todas las muestras medidas de la CL y la CP.

CUBIERTAS	CÓDIGO GRÁFICO	REFLECTIVIDAD (r)	EMISIVIDAD (ε)
CL_new		0.75	0.13
CL_old1		0.63	0.26
CL_old5a		0.52	0.30
CL_old5b		0.52	0.50
CL_old5c		0.60	0.55
CL_old5d		0.57	0.65
CL_cool		0.86	0.90
CL_white		0.78	0.95
CL_green		0.30	0.95
CP_new		0.40	0.90
CP_old		0.25	0.90
CP_white		0.77	0.95

MUESTRAS DE LAS CUBIERTAS EN SU ESTADO ACTUAL CON VARIOS AÑOS DE USO

La **Figura 64** muestra los resultados de las muestras en su estado actual con varios años de uso, y los compara con los valores de las cubiertas en su estado nuevo (CL_new y CP_new)

En el caso de la CL se han medido 5 muestras de cubiertas con varios años de uso, de estas 1 muestra corresponde a una cubierta con 1 año de uso (CL_old1) y las otras 4 muestras corresponden a cubiertas entre 5 y 10 años de uso (CL_old5a, CL_old5b, CL_old5c, CL_old5d).

En el caso de la CP se ha medido 1 sola muestra CP_old, que corresponde a una cubierta con más de 10 años de uso (cubierta del caso de validación CP)

Conforme a estos resultados, todos los ejemplos medidos presentan una modificación de sus propiedades radiativas con respecto a su estado nuevo.

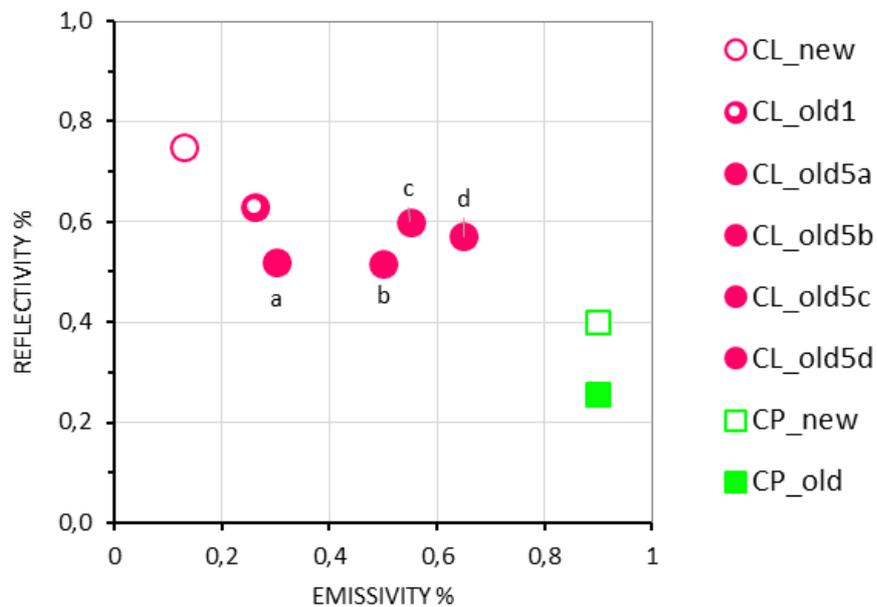


Figura 64 Reflectividad al visible y emisividad al infrarrojo térmico medida de la CL (círculos) y CP (cuadrados) en su estado actual con diferentes grados de envejecimiento.

Todos los valores de reducción y de incremento que se describen a continuación, están comparados con respecto a los valores en su estado nuevo.

En cuanto a los resultados de la CUBIERTA LIGERA METÁLICA, la cubierta metálica con un año de uso (CL_old1) muestra una reducción de la reflectividad al visible de 0.12, y un incremento de la emisividad de 0.13.

Las 4 cubiertas con más años de uso, CL_old5a, CL_old5b, CL_old5c, CL_old5d, tienen una reducción de su reflectividad al visible de 0.23, 0.23, 0.20 y 0.18, mientras que su factor de emisividad al infrarrojo térmico se incrementa entre 0.17, 0.37, 0.47 y 0.52 respectivamente.

Todos los resultados de la CL muestran valores muy variables, lo que denota las diferentes condiciones de envejecimiento a las que han estado sometidas todas las muestras analizadas.

No obstante, todas las muestras presentan un mayor grado de incremento de la emisividad respecto al grado de disminución de la reflectividad.

EL INCREMENTO MÁXIMO DE EMISIVIDAD AL INFRARROJO ES DE 0.52, de 0.13 a 0.65 correspondiente a la CL_old5d.

LA REDUCCIÓN MÁXIMA DE REFLECTIVIDAD AL VISIBLE es DE 0.23, desde 0.75 a 0.52 correspondiente a la CL_old5a

Con respecto a los resultados de la CP, la cubierta con varios años de uso CP_old presenta una reducción de su reflectividad de 0.15, mientras que su emisividad se mantiene en 0.90.

En consecuencia, en el caso de la **CUBIERTA LIGERA METÁLICA**, **la influencia del paso del tiempo y las inclemencias del medio ambiente tienen una influencia mayor sobre el incremento de la emisividad al infrarrojo térmico que en la reducción de la reflectividad al visible.**

Mientras que en la **CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN**, la condicionante del envejecimiento **sólo influye en la reducción de la reflectividad al visible.**

MUESTRAS CON RECUBRIMIENTO DE PINTURA

Por otra parte, la **Figura 65** presenta los resultados de las muestras a las que se les añadió el recubrimiento de pintura, conjuntamente con los valores de las cubiertas en su estado nuevo: CL_new y CP_new.

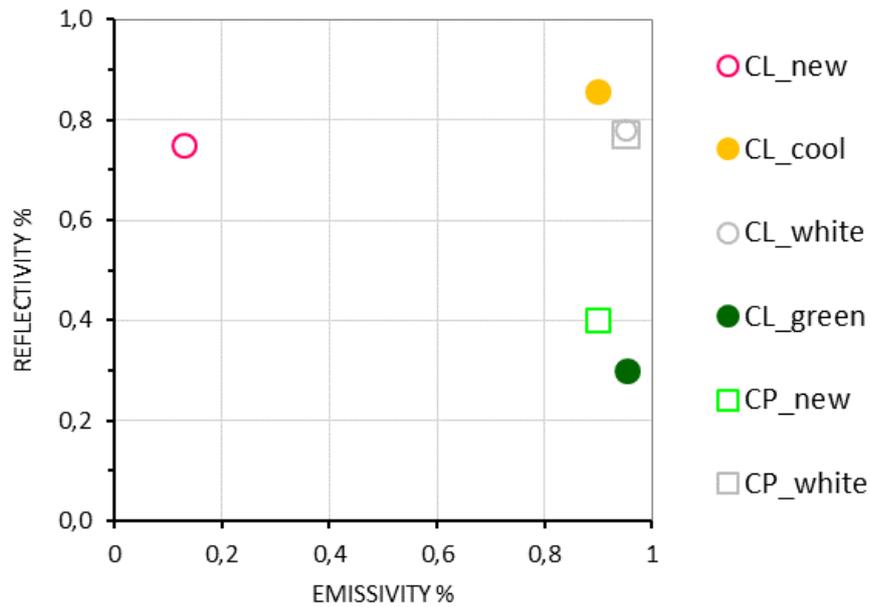


Figura 65 Reflectividad al visible y emisividad al infrarrojo térmico medida de la CL (círculos) y CP (cuadrados) con diferentes recubrimientos de pintura.

En cuando a la CUBIERTA LIGERA, CL_cool, pintada con una pintura TIPO cool roof, es la que presenta el mayor factor de reflectividad al visible entre todas las muestras, 0.86.

Por otra parte, CL_white y CL_green, pintadas con pinturas normales, presentan un factor de reflectividad de 0.78 y 0.30 respectivamente.

En cuanto al factor de emisividad al infrarrojo térmico, CL_white y CL_green presentan el valor más alto de las muestras medidas, 0.95, inclusive mayor que CL_cool que tiene un valor de 0.90.

En lo que respecta a la CUBIERTA PESADA, CP_white tiene una reflectividad de 0.77 y una emisividad de 0.95. Los valores alcanzados por la CP_white son casi iguales que los de CL_white, tanto de reflectividad como de emisividad, ya que fueron pintados con el mismo tipo de pintura.

Estos resultados muestran que el uso de pinturas en la CL y en la CP cambia significativamente las propiedades radiativas de estas cubiertas con respecto a los valores en su estado nuevo.

En el caso de la CL, su reflectividad al visible puede cambiar en ambos sentidos, mientras la emisividad al infrarrojo térmico sólo se incrementa.

En comparación con los valores de su estado nuevo, el máximo incremento de la reflectividad de la CL es 0.11, mientras que el máximo incremento de la emisividad es 0.82.

En el caso de la CP, los cambios debidos al uso de pinturas sólo muestran un alto impacto en el incremento de su reflectividad al visible, mientras que el incremento de su emisividad al infrarrojo térmico es casi nulo.

En comparación con los valores de su estado nuevo, el máximo incremento de la reflectividad de la CP es 0.37, mientras que el máximo incremento de la emisividad es 0.05.

El COMPORTAMIENTO TÉRMICO de todas estas cubiertas, tanto de las muestras con varios años de uso como las muestras con diferentes recubrimientos de pintura, será evaluado en el capítulo de resultados (*ver CAPÍTULO 4.3.2 DESEMPEÑO TÉRMICO DE LAS MUESTRAS MEDIDAS DE LA CL Y LA CP.*)

3.4 VALIDACIÓN DE LA SIMULACIONES

Con el objeto de validar el modelo de simulación, en este apartado se ha comparado el comportamiento térmico de las dos cubiertas entre los valores medidos y los valores simulados. Los parámetros de validación han sido: la Temperatura superficial exterior (T_s), temperatura superficial interior (T_{si}) y temperatura del aire interior (T_{ai}). Todas las validaciones han sido realizadas a través de un análisis estadístico y un análisis gráfico. La descripción completa de estas validaciones con los dos métodos se muestra en el ANEXO A3.2 VALIDACIÓN DE LAS SIMULACIONES.

La validación de los resultados nos ha permitido determinar varias imprecisiones de los modelos de simulación, de donde se resaltan la influencia del modelo de cielo y la influencia del movimiento del aire, que repercuten en gran medida en el comportamiento térmico de las dos cubiertas.

Por un lado el **MODELO DEL CIELO**, la comparación de los resultados con los dos modelos de cielo, el modelo de Energy Plus y el modelo corregido a partir de las mediciones de la temperatura del cielo, da como resultado que el modelo corregido tiene mayor correlación con los resultados medidos, **Figura 66**.

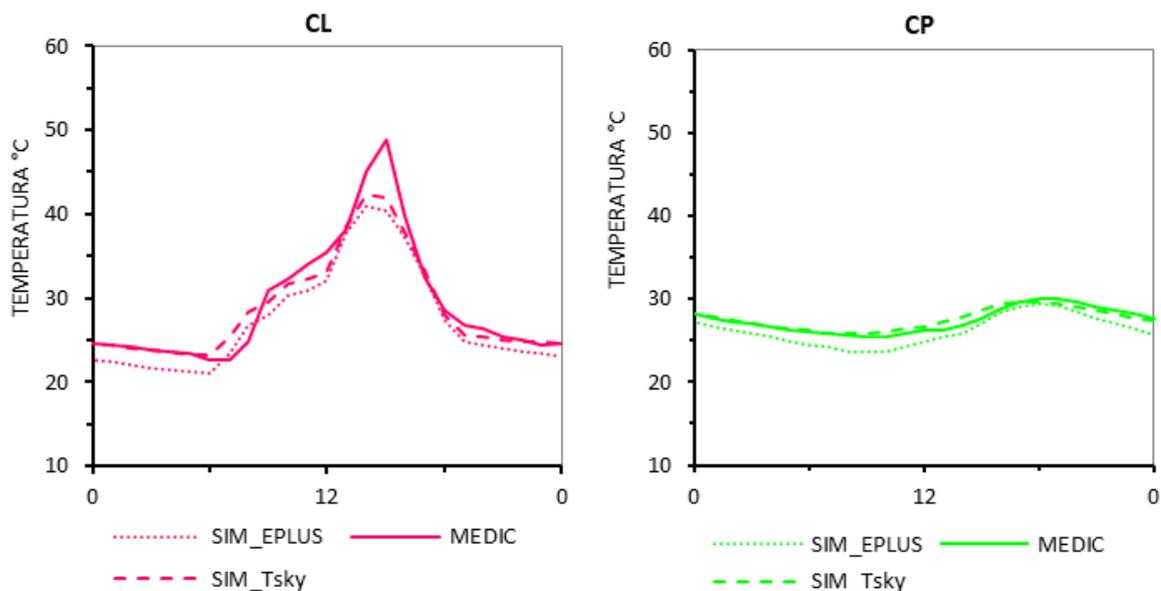


Figura 66 Comparación de la T_{si} entre los valores medidos (MEDIC) y simulaciones: con modelo de cielo de Energy Plus (SIM_EPLUS) y modelo de cielo corregido (SIM_Tsky), de la CL y la CP. Valores Día Promedio.

La diferencia entre estos dos modelos de cielo se intensifica en el periodo nocturno, cuando el enfriamiento por radiación tiene mayor influencia sobre el funcionamiento térmico de la cubierta.

A través de esta validación se ha determinado que: la capacidad de enfriamiento del cielo en estas regiones es un 12% menor al que definen los modelos de cálculo utilizados por los simuladores energéticos. En consecuencia, **en el periodo nocturno, estas imprecisiones del modelo de cielo varían los resultados de la temperatura superficial interior de las cubiertas un promedio de 2.5°C en la CL, y 1.2°C en la CP, por debajo de los resultados medidos.**

Por otra parte, para conocer la **INFLUENCIA DEL MOVIMIENTO DEL AIRE**, se han comparado los parámetros de la cubierta medidos con los simulados con un modelo de cálculo CON VIENTO y con un modelo de cálculo SIN VIENTO. De estos resultados se ha determinado que el modelo de simulación SIN VIENTO se acerca más a los valores medidos que el modelo con viento, **Figura 67**.

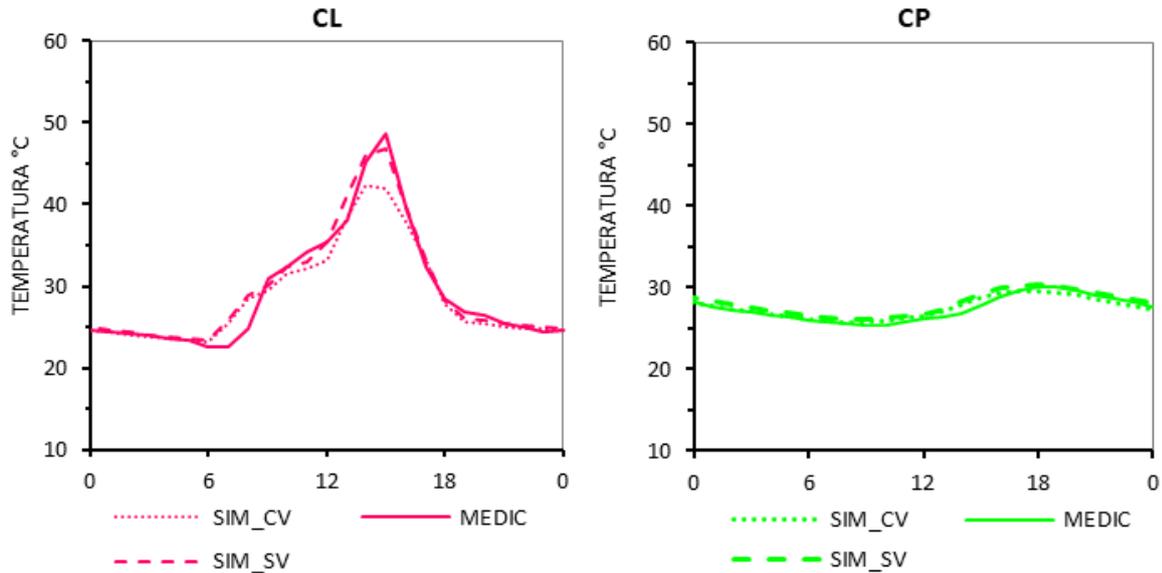


Figura 67 Comparación de la T_{si} entre los valores medidos (MEDIC) y simulaciones: con viento (SIM_CV) y sin viento (SIM_SV), de la CL y la CP. Valores Día Promedio.

Según estos resultados (T_{si}), la diferencia entre estos dos modelos (con y sin viento) se intensifica en el periodo diurno en los máximos de temperatura, cuando la velocidad del viento es mayor.

Debido a que el modelo con viento simula mayores pérdidas por convección, las temperaturas superficiales interiores de las cubiertas son menores que los valores obtenidos con el modelo sin viento y menores que los valores medidos. Estas diferencias son menos amplias en la T_{si} de la CP debido a su mayor resistencia térmica.

En consecuencia, **el modelo de simulación con viento tiene una diferencia promedio con los resultados medidos ($\Delta T_{si_medic} - T_{si_sim_CV}$) de 3°C en la CL y 1°C en la CP**, en el periodo DIURNO. Mientras que la variación promedio del modelo sin viento con los resultados medidos ($\Delta T_{si_medic} - T_{si_sim_SV}$) es menor a -0.5°C en las dos cubiertas.

En base a estos resultados, **las pérdidas por convección debidas al movimiento del aire tienen una influencia casi nula sobre el comportamiento térmico de la cubierta en esta región**

Otras imprecisiones de menor relevancia, debidas a otros agentes climáticos como las precipitaciones, se detallan en el ANEXO A3.2.2 **INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS**

A Continuación se muestran los resultados simulados finales del modelo corregido comparado con los resultados medidos, de la CL, **Figura 68**, y la CP, **Figura 69**.

VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CL

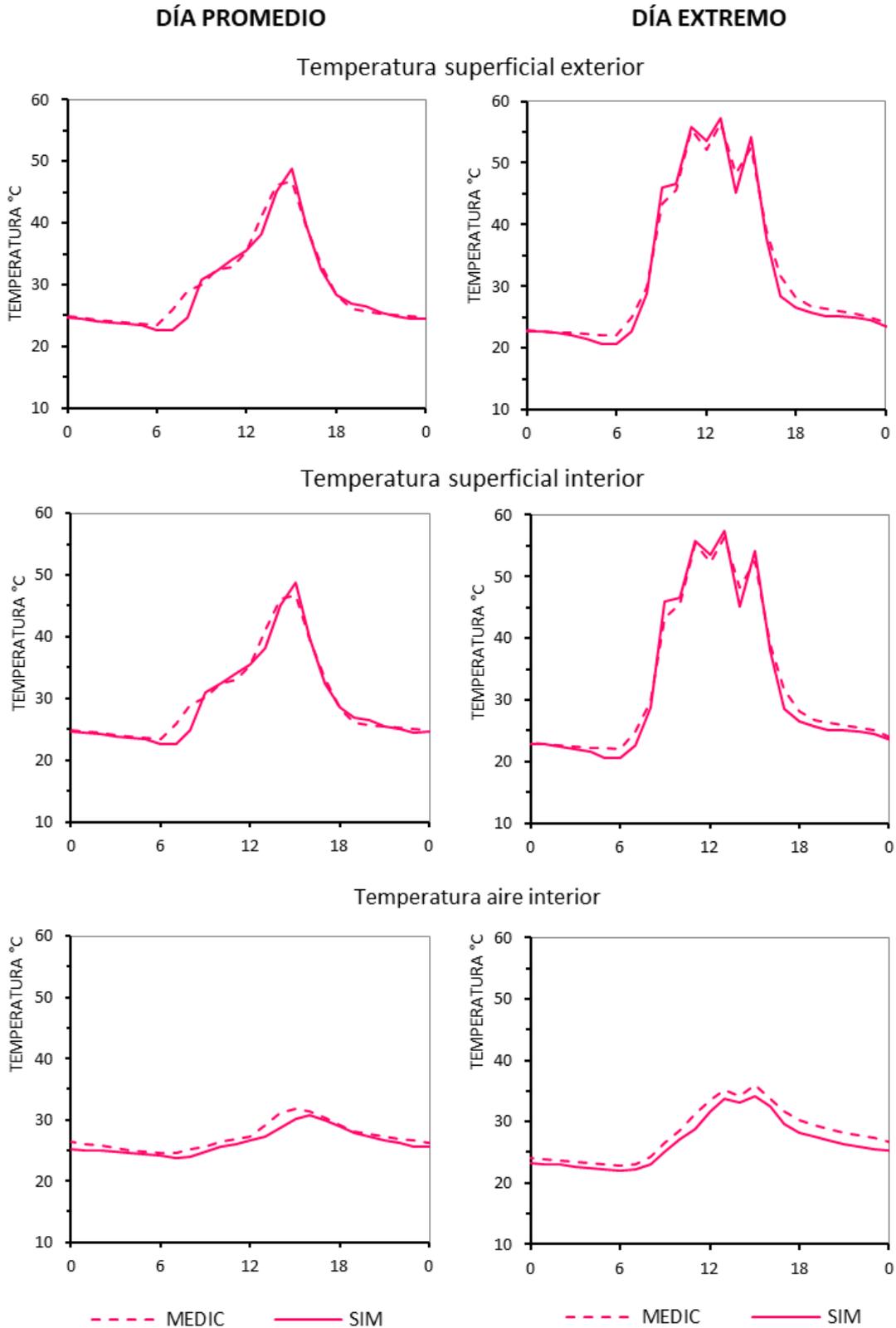


Figura 68 Comparación de la temperatura superficial exterior, temperatura superficial interior y temperatura del aire interior de la CL, entre los valores medidos (línea continua) y los valores simulados finales (línea discontinua)

VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA CP

DÍA PROMEDIO

DÍA EXTREMO

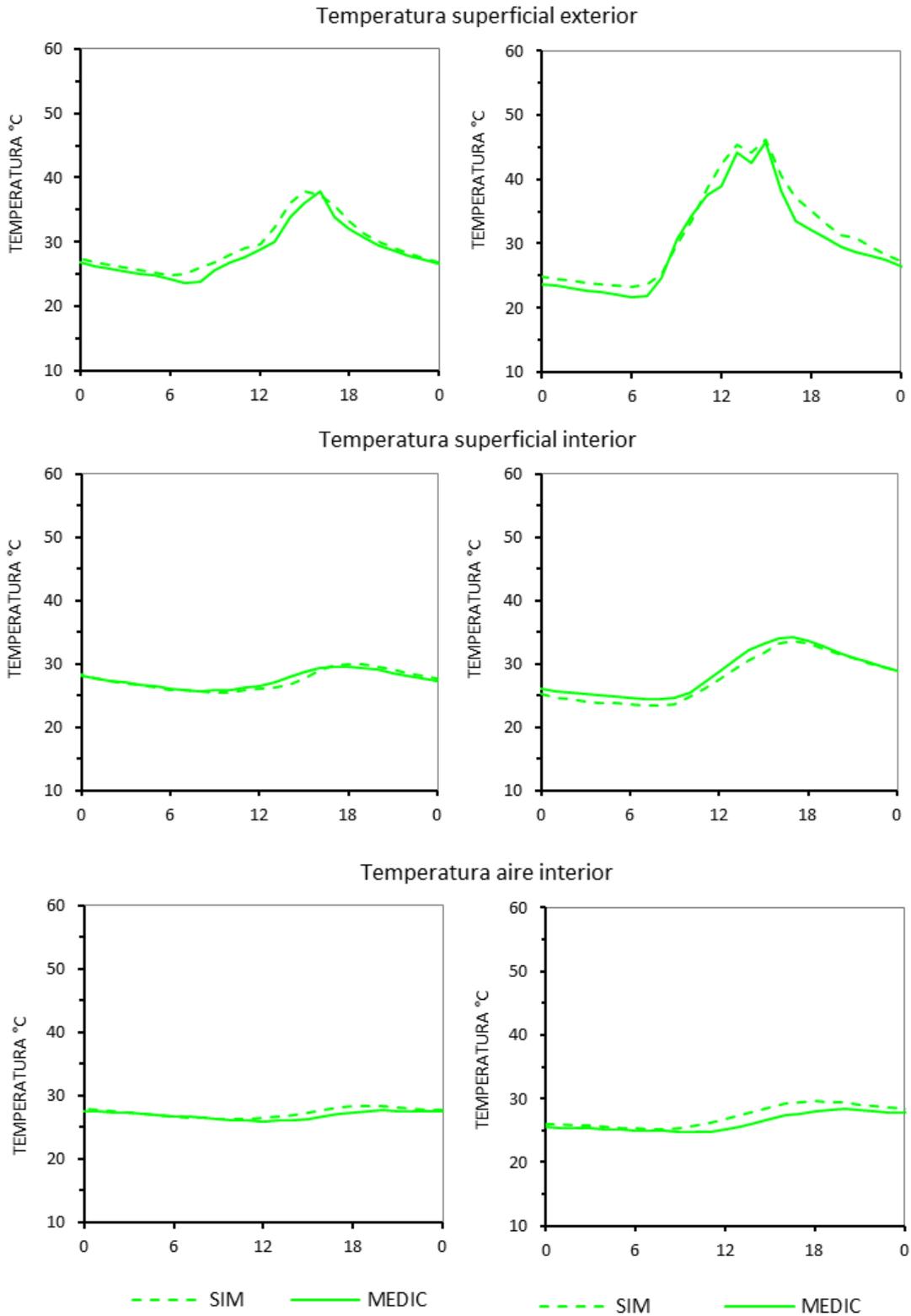


Figura 69 Comparación de la temperatura superficial exterior, temperatura superficial interior y temperatura del aire interior de la CP, entre los valores medidos (línea continua) y los valores simulados finales (línea discontinua)

3.5 RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se establecen los casos de estudio (CL y CP), el parámetro de análisis (temperatura superficial interior), las variables de análisis (inclinación-orientación, reflectividad al visible, emisividad al infrarrojo térmico y doble capa), y los periodos de evaluación de esta investigación.

El análisis del comportamiento térmico de estas cubiertas y la influencia de cada una de las variables se han llevado a cabo a través de SIMULACIONES DIGITALES, las cuales han sido validadas a través de mediciones en campo. El proceso de investigación se ha dividido en 3 partes: configuración de simulaciones, validación de simulaciones y análisis de resultados. Las dos primeras etapas han sido desarrolladas en este capítulo.

En cuanto a La CONFIGURACIÓN DE SIMULACIONES, esta etapa se ha centrado en la configuración de los datos de entrada, tanto los factores climáticos como las características radiativas de la cubierta a través de mediciones *in situ*.

De la configuración de los factores climáticos se resalta la importancia de las CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DEL CIELO en esta región, debido a la alta influencia de este factor sobre el flujo solar y el flujo de onda larga. En cuanto a la radiación solar, debido a los altos niveles de nubosidad del cielo, el promedio anual del flujo solar (3kWh/m^2) representa el 50% del valor total teórico simulado con un cielo despejado. Por otra parte, dado que la mayoría del tiempo la bóveda celeste está cubierta por nubes, la radiación solar recibida proviene principalmente de la componente difusa, 90% y 80% en un día promedio y un día extremo respectivamente.

Por otra parte, la alta y constante nubosidad del cielo mantiene al cielo con altas temperaturas, en promedio 7°C por debajo de la temperatura del aire, lo que reduce sustancialmente la capacidad de enfriamiento del cielo, un 17% en comparación con un cielo totalmente despejado.

Estos resultados resaltan que el balance energético del clima de esta región no está influenciado primordialmente por un excesivo flujo solar, sino por el bajo flujo de calor emitido hacia el cielo.

En cuanto a la VALIDACIÓN DE LAS SIMULACIONES, una vez configurados los datos de entrada, los resultados obtenidos se han comparado con mediciones de campo. Los parámetros de validación han sido: la temperatura superficial exterior e interior de la cubierta, y la temperatura del aire interior. La validación de estos resultados nos ha permitido modificar ciertas imprecisiones del modelo de simulación.

Por un lado, se ha determinado que **la capacidad de enfriamiento del cielo en estas regiones es, en promedio, 12% menor al que suponen los modelos de los softwares energéticos.** Y por otra parte, esta validación resalta que **el movimiento del aire tiene un impacto casi nulo sobre las pérdidas por convección de la cubierta en este clima.**

A través de la modificación de estas imprecisiones se ha podido obtener resultados con una mayor correlación con los resultados medidos, de acuerdo a los tres parámetros de validación.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

Capítulo 4
RESULTADOS



COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

Una vez validado el modelo de simulación en el capítulo anterior, este capítulo se centra en el análisis de la influencia de las variables planteadas sobre el comportamiento térmico de la CL y la CP.

Después de definir cuál o cuáles de las variables analizadas son más relevantes sobre la reducción del calentamiento de cada una de las cubiertas, en la segunda parte de este capítulo se compara el comportamiento térmico de estas dos tipologías.

Tal como se estableció en el capítulo anterior, la TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR (T_{si}) ha sido escogida como el PARÁMETRO DE ANÁLISIS para evaluar el comportamiento térmico de las dos cubiertas.

Este parámetro ha sido evaluado en el PERIODO DIURNO y en el PERIODO NOCTURNO, para cada uno de los días de análisis: el DÍA PROMEDIO y el DÍA EXTREMO, **Figura 55**.

Para evaluar la influencia de cada una de las variables en las dos cubiertas se ha utilizado un modelo común de edificación (MODELO BASE), donde la única variable es el tipo de cubierta: la CL y la CP.

El Modelo Base tiene una configuración geométrica y una implantación que corresponden a las normativas y características urbanas establecidas de la ciudad de análisis (Santa Rosa-Ecuador). La configuración térmica de las cubiertas corresponde a las características de los casos de validación medidas *in situ*.

Las características geométricas, térmicas y radiativas de cada cubierta se especifican a continuación, **Tabla 12**. La descripción completa del MODELO BASE se detalla en el ANEXO A4.1.1 **MODELO BASE DE SIMULACIÓN**.

Tabla 12 Parámetros de las cubiertas del MODELO BASE, tomados de las mediciones *in situ*.

	Pendiente	Reflectividad al visible	Emisividad al infrarrojo térmico	Transmitancia Térmica (W/m ² .K)	Masa Térmica (kJ/m ² .K)
CL	0%	0.52	0.30	7.14	0.61
CP	0%	0.25	0.90	2.68	85.60

En un primer estudio, se establecerán los resultados base para cada tipo de cubierta, es decir el comportamiento térmico de la CL y la CP en su estado previo a la aplicación de las estrategias. Estos RESULTADOS BASE servirán para evaluar la influencia de cada una de las variables planteadas

A partir de estos RESULTADOS BASE se evalúa la influencia de cada una de las variables planteadas: LA INCLINACIÓN-ORIENTACIÓN, REFLECTIVIDAD AL VISIBLE, EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO Y DOBLE CAPA en las dos cubiertas.

4.1 RESULTADOS BASE DE LA CUBIERTA LIGERA Y LA CUBIERTA PESADA.

Este apartado muestra los RESULTADOS BASE del comportamiento de la CL y la CP. En primer lugar, se muestran los resultados horarios, para luego definir los resultados promedios del periodo diurno y nocturno con los que se trabajará a lo largo de la tesis.

Esta primera evaluación tiene como objetivo mostrar el comportamiento general de estas dos cubiertas y su impacto sobre el confort interior, por lo cual la temperatura del aire interior (T_{ai}) se ha incorporado al análisis, además de la temperatura superficial interior de la cubierta (T_{si}), **Figura 70.**

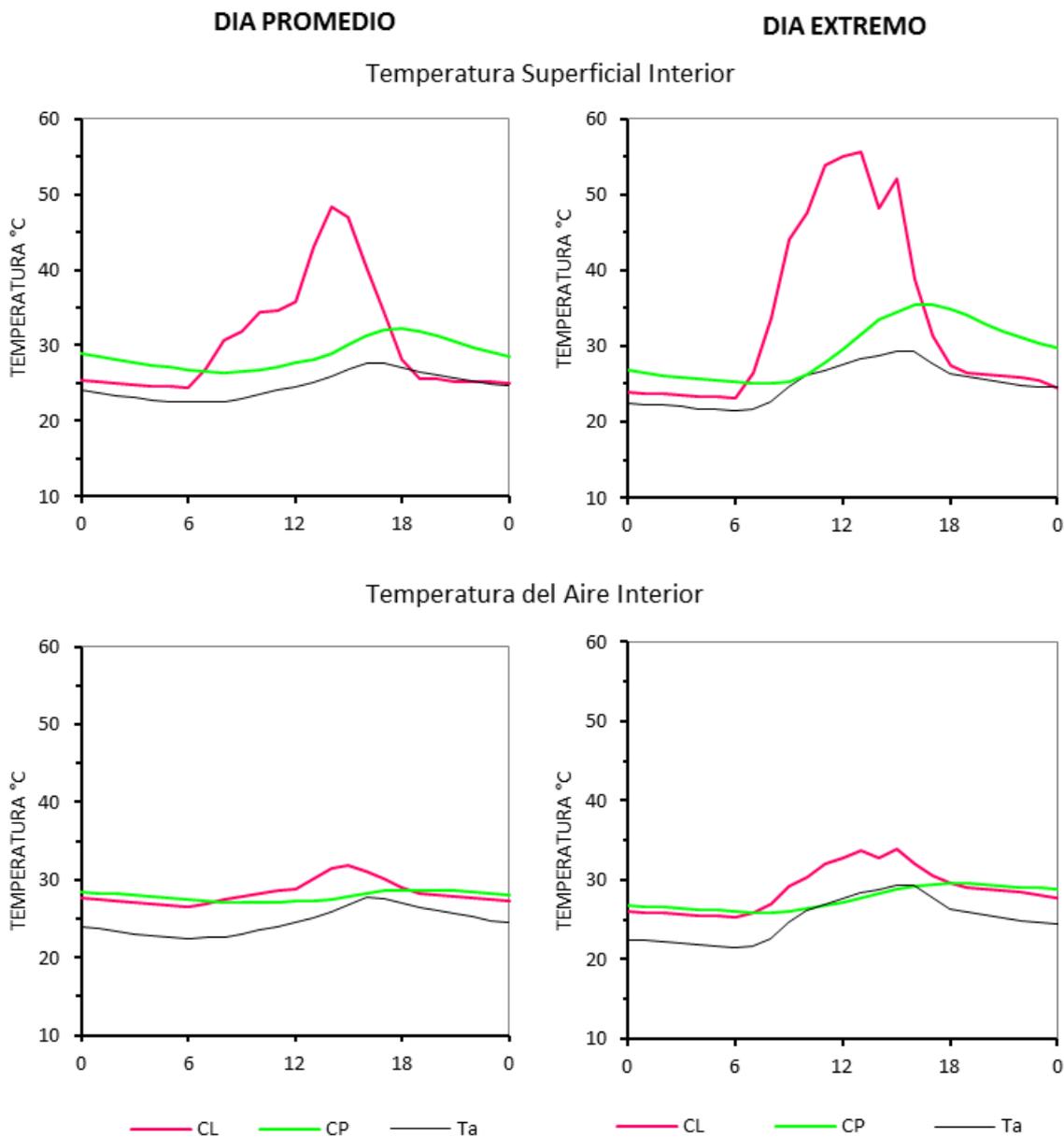


Figura 70 Resultados Base de la Temperatura superficial interior y la temperatura del aire interior de la CL (magenta) y la CP (verde), durante el Día Promedio y el Día Extremo.

En el **PERIODO DIURNO**, la T_{si} de la CL alcanza unos valores máximos de 49°C en el Día Promedio y 57°C en el Día Extremo; y con una T_{ai} máxima de 32°C y 34°C respectivamente.

Por otra parte, la T_{si} de la CP llega hasta 33°C en el Día Promedio y 36°C en el Día Extremo; y con una T_{ai} máxima de 29°C y 30°C respectivamente. Ambas temperaturas tienen un retraso de 4 hasta 5 horas con respecto a la CL.

En los dos casos de análisis (CL y CP), la T_{si} de la cubierta es mayor que la T_{ai} , por lo que la sensación de discomfort interior se incrementa en ambas situaciones. No obstante, este incremento del discomfort interior es más intenso en la CL que en la CP durante casi todo el periodo diurno. Por lo tanto, la CP ofrece un mejor desempeño térmico que la CL en este periodo.

En el **PERIODO NOCTURNO**, la CL reduce su T_{si} casi hasta la temperatura del aire exterior (T_a) y se mantiene así durante toda la noche, entre 22°C y 24°C tanto en el Día Promedio como en el Extremo. Mientras que, la T_{ai} se reduce hasta 27°C y 26°C respectivamente en los mismos días.

En cuanto a la CP, en el periodo nocturno su T_{si} se mantiene de 27°C a 33°C en el Día Promedio y de 28°C a 35°C en el Día Extremo. En cambio, la T_{ai} se mantiene entre 28°C y 29°C durante todo el periodo nocturno en los dos días de análisis.

En el periodo nocturno, tanto la T_{si} como la T_{ai} de la CL son menores que las de la CP. Además, la CL mantiene una T_{si} menor que su T_{ai} , lo que influye sobre la reducción de la temperatura de sensación. No obstante, la T_{si} de la CP mantiene temperaturas mayores que su T_{ai} , debido a su masa térmica, lo que incrementa el discomfort interior en este periodo.

De acuerdo con estos resultados iniciales, en el periodo DIURNO la CP ofrece un menor discomfort interior que la CL, por el contrario, en el periodo NOCTURNO es la CL la que ofrece mejores condiciones interiores. Aunque los comportamientos de estas dos cubiertas son opuestos en los dos periodos, la relevancia de la CP en el periodo diurno es mayor que la CL en el periodo nocturno.

En base al análisis de estas dos cubiertas en su estado original se puede afirmar que: **la CP ofrece un mejor desempeño térmico que la CL en la en esta región**. Por lo que, el incremento del uso de esta cubierta en la Costa del Ecuador se sustenta en un propósito térmico. Un análisis más detallado del comportamiento de estas dos cubiertas en su estado actual se muestra en el **ANEXO A 2.2.3 PARÁMETROS DE VALIDACIÓN**.

Como ya se ha especificado, el parámetro de referencia de esta tesis es la TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR (T_{si}). A partir de aquí, todas las temperaturas referidas a la CL y a la CP corresponden a este parámetro.

Debido a los diferentes desfases de tiempo que tiene la T_{si} de estas dos cubiertas, las diferencias de temperatura varían en función de la hora de cada periodo. Además, aunque los valores máximos y mínimos muestran de manera general las diferencias de estas cubiertas, un análisis de este tipo sólo refleja un momento del día y de la noche. En cambio, los valores promedios del periodo diurno y nocturno describen de manera más amplia y completa el comportamiento de las cubiertas.

Conforme a esto, se sustenta que el comportamiento de la T_{si} haya sido evaluado con los valores promedios del periodo diurno y nocturno. Los resultados promedio de la CL y la CP en estos dos periodos y en los dos días de análisis se muestran en la **Figura 71**.

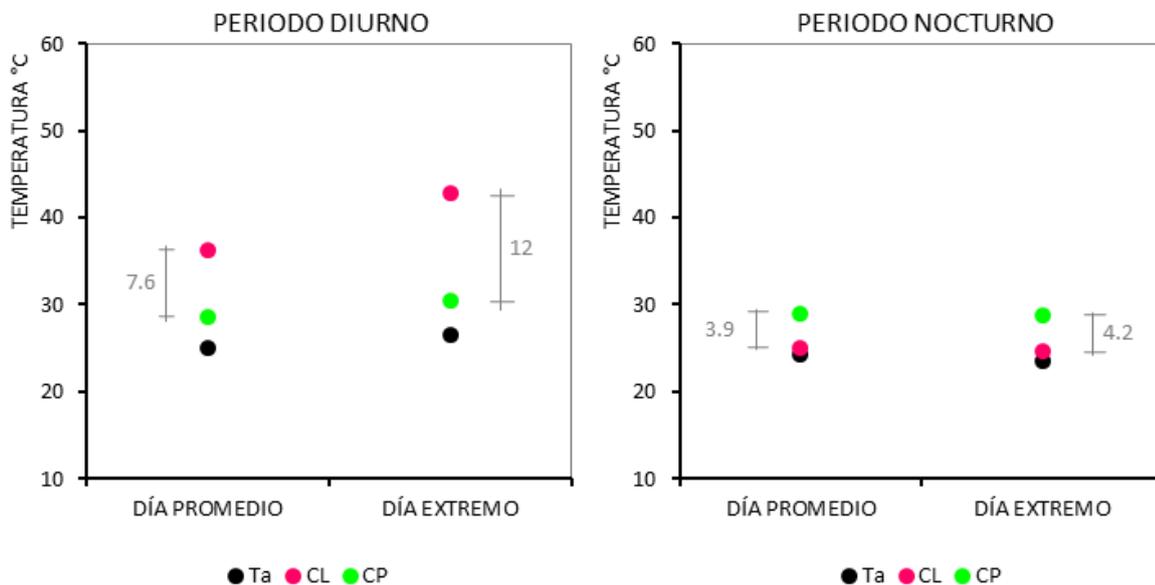


Figura 71 Resultados Base del promedio diurno (izquierda) y nocturno (derecha) de la T_{si} de la CL y CP, y la T_a , en el Día Promedio y el Día Extremo.

En el PERIODO DIURNO (**Figura 71 izquierda**), la T_{si} en el Día Promedio es de 36°C en la CL y 29°C en la CP. Mientras que en el Día Extremo la CL alcanza los 43°C y la CP los 30 °C.

La diferencia entre estas dos cubiertas en este periodo ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es de **7.6°C** en el Día Promedio y **12°C** en el Día Extremo.

En el PERIODO NOCTURNO (**Figura 71 derecha**), la T_{si} en el Día Promedio es de 25°C en la CL y 28.9°C en la CP. Mientras que en el Día Extremo la CL alcanza los 24.6°C y la CP 28.8°C.

La diferencia entre estas dos cubiertas en este periodo ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es de **-3.9°C** en el Día Promedio y **-4.2°C** en el Día Extremo. Es decir, la T_{si} de la CL en PERIODO NOCTURNO es 3.9°C inferior a la T_{si} de la CP en el Día Promedio y 4.2°C inferior en el Día Extremo.

Si comparamos los resultados de las temperaturas de las cubiertas con la temperatura del aire exterior (T_a), tenemos que en el periodo diurno, la CL se mantiene entre 11°C y 16°C por encima de la T_a , mientras que la CP la supera en 4 °C, tanto para el Día Promedio como el Día Extremo.

En el periodo nocturno, la CL mantiene temperaturas casi iguales a T_a , y la CP se mantiene 5°C por arriba de la T_a , en el Día Promedio y en el Día Extremo

En busca de tener como parámetro de referencia a la T_a , a partir de aquí, los resultados se evaluarán a través **LA DIFERENCIA ENTRE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR Y LA TEMPERATURA DEL AIRE EXTERIOR ($\Delta T_{si} - T_a$)**, como se muestra en la **Figura 72**.

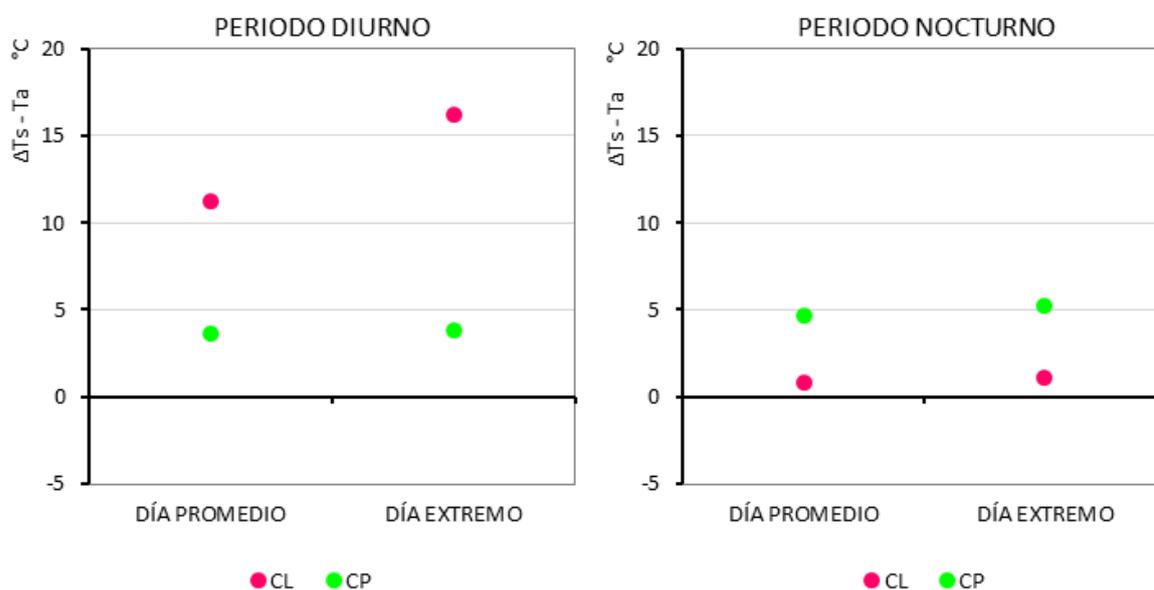


Figura 72 Resultados Base de la CL y CP en el periodo diurno (izquierda) y nocturno (derecha) para el Día Promedio y el Día Extremo, en función de la diferencia entre la temperatura superficial interior y la temperatura del aire exterior ($\Delta T_{si} - T_a$).

A través de todo lo expuesto en este apartado, se han determinado los resultados base del comportamiento térmico de las dos cubiertas, tanto en el periodo diurno como nocturno. Estos resultados se expresan en función de la diferencia entre la temperatura superficial interior de las cubiertas con la temperatura del aire exterior ($\Delta T_{si} - T_a$).

En el periodo diurno, la temperatura superficial interior de la CL se eleva entre **11°C y 16°C** por encima de la temperatura del aire exterior (T_a), mientras que en el periodo nocturno su diferencia con la T_a es mínima, **1°C**.

Por otra parte, la CP tanto en el periodo diurno como en el periodo nocturno permanece alrededor de **4.5°C** por arriba de la T_a .

A partir de estos resultados se evaluará la influencia de cada una de las estrategias planteadas.

Por último, estos resultados han permitido conocer la brecha inicial que separa a estas dos cubiertas térmicamente, de acuerdo a sus características medidas *in situ*. En el periodo diurno, la diferencia entre estas dos cubiertas ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es de **7.6°C** en el Día Promedio y **12°C** en el Día Extremo. En el periodo nocturno esta diferencia está alrededor de **-4°C**, en los dos días de análisis.

Por lo tanto, la CP presenta temperaturas menores que la CL en el periodo diurno, aunque en el periodo nocturno este comportamiento se invierte.

A continuación se muestra un resumen de todos estos resultados en el periodo diurno y en el periodo nocturno, tanto en el Día Promedio, **Tabla 13**, como en el Día Extremo, **Tabla 14**.

Tabla 13 Resultados Base de la T_{si} de la CL y la CP en el Periodo Diurno y Nocturno en el DÍA PROMEDIO.

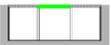
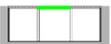
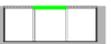
Resultados Base_ DÍA PROMEDIO				
MODELO BASE	PERIODO DIURNO		PERIODO NOCTURNO	
	CL	CP	CL	CP
	 r= 0,52 e=0,3 U= 7,2 W/m2.K	 r= 0,25 e=0,9 U= 2,8 W/m2.K	 r= 0,52 e=0,3 U= 7,2 W/m2.K	 r= 0,25 e=0,9 U= 2,8 W/m2.K
Resultados Base $\Delta T_{si} - T_a$ (°C)	11.3	3.7	0.8	4.3
Diferencia Térmica CL y CP $\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$ (°C)	7.6		-3.5	

Tabla 14 Resultados Base de la T_{si} de la CL y la CP en el Periodo Diurno y Nocturno en el DÍA EXTREMO.

Resultados Base_ DÍA EXTREMO				
MODELO BASE	PERIODO DIURNO		PERIODO NOCTURNO	
	CL	CP	CL	CP
	 r= 0,52 e=0,3 U= 7,2 W/m2.K	 r= 0,25 e=0,9 U= 2,8 W/m2.K	 r= 0,52 e=0,3 U= 7,2 W/m2.K	 r= 0,25 e=0,9 U= 2,8 W/m2.K
Resultados Base $\Delta T_{si} - T_a$ (°C)	16.2	3.8	1.1	5.3
Diferencia Térmica CL y CP $\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$ (°C)	12.4		-4.2	

4.2 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES SOBRE LA CUBIERTA LIGERA Y LA CUBIERTA PESADA

4.2.1 INCLINACIÓN Y ORIENTACIÓN

Como se ha detallado en capítulos anteriores, la inclinación y la orientación de las cubiertas representan una de las estrategias más influyentes sobre el comportamiento térmico de la cubierta en numerosos climas.

La importancia de estas variables radica en que modifican de manera directa la radiación solar recibida por la cubierta, y el flujo de calor (onda larga) emitido por la cubierta.

Dado que el balance de estos flujos influyen en gran medida sobre la **TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR** (T_{si}), además de evaluar la influencia de la inclinación y la orientación sobre la T_{si} , en un apartado anexo se ha evaluado el impacto de estas variables sobre la RADIACIÓN SOLAR recibida y la RADIACIÓN DE ONDA LARGA emitida (ver A4.2 *INCLINACIÓN Y ORIENTACIÓN*).

Para el análisis de la influencia de estas variables se han considerado las siguientes variantes. En el caso de la inclinación: 0%, 15%, 30% y 45%, y en el caso de la orientación: Norte, Sur, Este y Oeste, **Figura 73**.

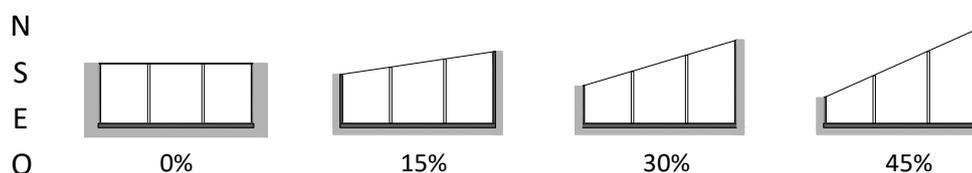


Figura 73 Variantes de análisis de la variable INCLINACIÓN: 0%, 15%, 30% Y 45%, y la variable ORIENTACIÓN: Norte, Sur, Este y Oeste.

Es necesario recalcar que el análisis de todas las variables, incluidas la INCLINACIÓN y la ORIENTACIÓN, se han simulado en el día con el más alto ángulo solar en esta latitud (29 de septiembre).

A continuación se muestran los resultados de la influencia de la inclinación y orientación sobre la temperatura superficial interior de la cubierta en el periodo diurno y nocturno, **Figura 74** y **Figura 75** respectivamente.

De acuerdo a los resultados del **PERIODO DIURNO**, **Figura 74**, en el Día Promedio la máxima reducción con respecto a la INCLINACIÓN del 0% sucede con la inclinación del 45% y la orientación Este. Esta reducción es de 0.7°C para la CL y 0.2°C para la CP. En el Día Extremo la máxima reducción es de 0.9°C para la CL y de 0.5°C para la CP, con la misma inclinación del 45% pero con una orientación Oeste.

En cuanto a la variable de la ORIENTACIÓN, la máxima diferencia se da entre las orientaciones Este y Oeste con una inclinación del 45%. En el Día Promedio esta diferencia es 0.7°C en la CL y 0.1°C en la CP. Mientras que en el Día Extremo, esta diferencia es 0.9°C para la CL y 0.6°C para la CP.

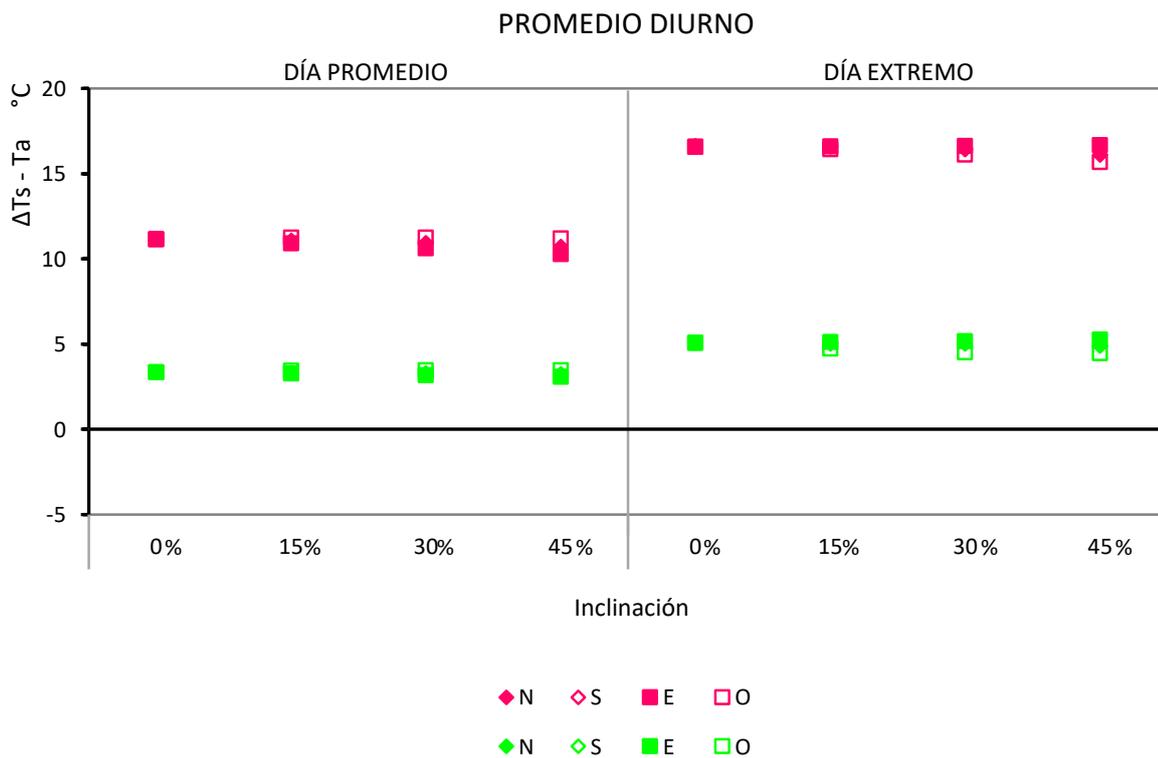


Figura 74 Promedio diario de la temperatura superficial interior de la CL (magenta) y la CP (verde) con diferentes inclinaciones y orientaciones, en el Día Promedio y el Día Extremo.

Conforme a estos resultados, el incremento de la INCLINACIÓN sobre la reducción de la T_{si} de las dos cubiertas es mínimo. Este decremento es correspondiente al comportamiento de la radiación solar recibida.

Debido a la predominancia de la radiación difusa en esta región, la radiación solar recibida depende de manera primordial del porcentaje de bóveda celeste visto y no de los recorridos solares.

Por lo tanto, el incremento de la inclinación muestra una influencia casi nula sobre la reducción de la radiación solar captada por las dos cubiertas tanto en el Día promedio como en el Día Extremo (ver ANEXO A5.2.1 INFLUENCIA SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR)

No obstante, en el caso de algunas orientaciones, la T_{si} experimenta un incremento en ambas cubiertas. Este incremento con la máxima inclinación (45%) alcanza los 0.1°C en la CL y 0.2°C en la CP con respecto a la inclinación del 0%, ambos en el Día Extremo.

Debido a que el incremento de la inclinación reduce el porcentaje de bóveda celeste visto, el flujo de calor emitido hacia el cielo también se reduce (*VER ANEXO A5.2.2 INFLUENCIA SOBRE LA RADIACIÓN DE ONDA LARGA.*)

Por lo tanto, cuando la reducción de la radiación solar debido a la inclinación de la cubierta es prácticamente nula (en algunas orientaciones), y además la emisión de calor se reduce, la temperatura superficial interior de la cubierta se incrementa.

En cuanto a las ORIENTACIONES, debido a la ubicación geográfica de esta región (cerca a la latitud 0°) y al día de simulación (equinoccio), los rayos solares son prácticamente perpendiculares a la horizontal. Por lo tanto, las diferencias entre la orientación Norte y Sur es cero. Debido a las diferentes nubosidades entre la mañana y la tarde, la mayor diferencia se da entre la orientación Este y Oeste, sin embargo es mínima.

Por otra parte, aunque en los solsticios se pueda notar una diferencia entre la orientación norte y sur, la diferencia de radiación recibida entre estas dos orientaciones en estos días no es amplia a causa de la nubosidad del cielo.

Sumado a esto, debido nuevamente a la ubicación geográfica, la radiación recibida en las orientaciones norte y sur es opuesta en cada uno de los solsticios. Por lo que en el promedio anual, las dos orientaciones reciben prácticamente la misma radiación solar. El análisis de la radiación solar recibida en los dos solsticios y el promedio anual se muestra en el *ANEXO A5.2.1 INFLUENCIA SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR.*

Por último, debido a la mayor masa y resistencia térmica que tiene la CP en comparación con la CL, la variación del flujo solar recibido debido a estas variables (inclinación y orientación) tiene un menor impacto en la reducción de la T_{si} de la CP que en la CL.

Por otra parte, debido a mayor emisividad al infrarrojo de la CP que la CL, el incremento de la inclinación tiene un mayor impacto en la reducción del flujo de calor emitido en la CP que en la CL, por lo que su temperatura puede tener un mayor incremento.

De acuerdo con estos resultados, **en el PERIODO DIURNO, LA INFLUENCIA DE LA INCLINACIÓN Y LA ORIENTACIÓN sobre la reducción de la T_{si} es POCO REPRESENTATIVA**, en especial en la CP.

En cuanto al **PERIODO NOCTURNO**, **Figura 75**, tanto en el Día Promedio como en el Día Extremo la máxima reducción con respecto a la **INCLINACIÓN** del 0% sucede con la inclinación del 45% y la orientación Este. Esta reducción es de 0.01 °C en la CL y 0.1°C en la CP en los dos días de análisis.

Con respecto a la **ORIENTACIÓN**, esta variable sólo muestra una influencia en la CP, mientras que en la CL tiene una influencia nula. La máxima diferencia en la CP sucede entre las orientaciones Este y Oeste con una inclinación del 45%. Esta diferencia es 0.5°C en el Día Promedio y 0.2°C en el Día Extremo.

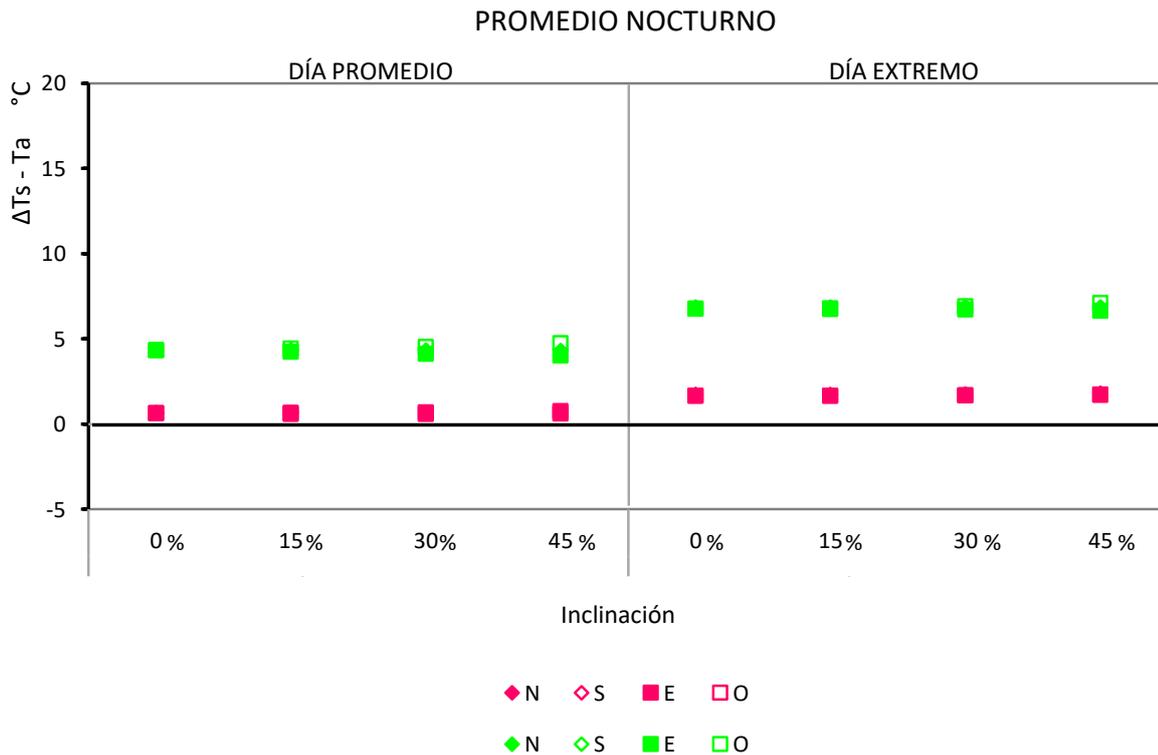


Figura 75 Promedio nocturno de la temperatura superficial interior de la CL (magenta) y la CP (verde) con diferentes inclinaciones y orientaciones, en el Día Promedio y el Día Extremo.

Conforme a estos resultados, en el periodo nocturno, la influencia de la **INCLINACIÓN** y la **ORIENTACIÓN** sobre la reducción de la T_{si} de las dos cubiertas es mínimo. Más aún, en el caso de la CL esta influencia es prácticamente nula. Debido al almacenamiento de calor de la CP, estas variables muestran una influencia ligeramente mayor en esta cubierta que en la CL.

Al igual que en el periodo diurno, en algunas orientaciones se evidencia un incremento de temperatura conforme la pendiente aumenta. Este incremento con la máxima inclinación (45%) alcanza los 0.1°C en la CL y 0.4°C en la CP con respecto a la inclinación del 0%, ambos en el Día Extremo. Debido a que en el periodo nocturno, la temperatura de las cubiertas depende de manera primordial del intercambio por radiación de onda larga, la reducción de este flujo tiene una mayor influencia sobre el incremento de T_{si} en este periodo que en el periodo diurno.

Es más, en el periodo nocturno, el incremento de la inclinación tiene un mayor impacto en el aumento de la temperatura que en la reducción de las temperaturas de las cubiertas.

Conforme a todo lo expuesto en este apartado, en esta región la **INCLINACIÓN Y LA ORIENTACIÓN** tienen una **INFLUENCIA POCO SIGNIFICATIVA** sobre la reducción del calentamiento de la CL y en especial de la CP, tanto en periodo DIURNO como en el periodo NOCTURNO.

Aunque, la variable de la inclinación de las cubiertas muestra una mayor influencia sobre la reducción de la T_{si} que la orientación, esta repercusión es poco significativa.

Inclusive, debido a que esta estrategia tiene un mínimo impacto sobre la reducción de la radiación solar, y además reduce el flujo de calor emitido, el incremento de la inclinación en esta región puede tener un **EFFECTO NEGATIVO** sobre la reducción de la temperatura superficial interior de las cubiertas, en especial en el PERIODO NOCTURNO.

Por último, a causa de que la influencia de estas variables tiene una repercusión casi nula sobre la reducción de la T_{si} de las dos cubiertas, la diferencia térmica inicial entre ellas, correspondiente a los Resultados Base, se mantiene prácticamente igual, tanto en el periodo Diurno como en el periodo Nocturno.

En el anexo A4.2 *INCLINACIÓN Y ORIENTACIÓN* se muestran los resultados horarios del impacto de estas variables sobre la temperatura superficial interior (T_{si}), la temperatura superficial exterior (T_s) y la temperatura del aire interior (T_{ai}), en los dos días de análisis.

4.2.2 REFLECTIVIDAD AL VISIBLE

Para el análisis de este factor se han considerado 3 variantes: 0.25, 0.50 y 0.75, y se han conservado los valores de emisividad al infrarrojo térmico de los modelos base, 0.30 para la CL y 0.90 para la CP, **Figura 76**.



Figura 76 Variantes de análisis de la variable REFLECTIVIDAD AL VISIBLE: 0.25, 0.50 y 0.75

A continuación se muestran los resultados de la influencia de esta variable sobre la T_{si} de la CL y la CP en el periodo diurno y en el periodo nocturno.

En cuanto al **PERIODO DIURNO**, **Figura 77**, el incremento de la reflectividad al visible de 0.25 a 0.75 muestra una reducción de la T_{si} de 10.64°C en la CL y 3.4°C en la CP, en el Día Promedio. Mientras que en el Día Extremo esta reducción es de 16°C para la CL y 4.8°C para la CP.

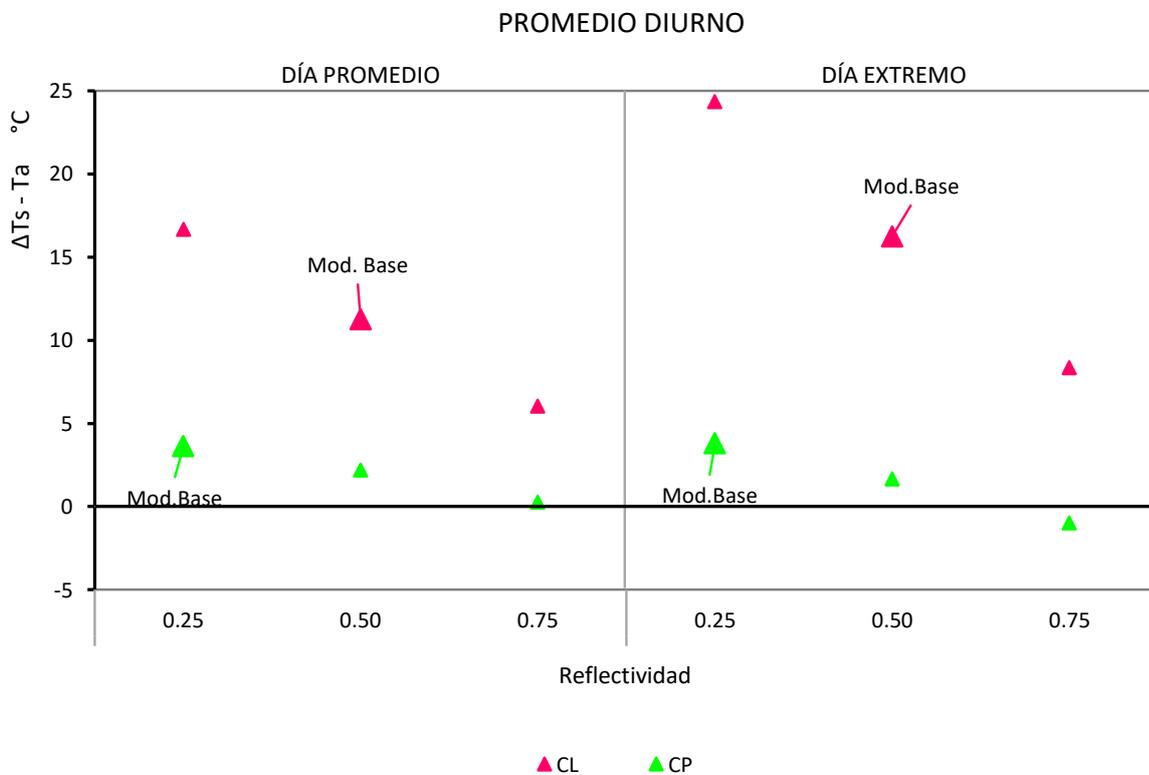


Figura 77 Promedio diurno de la temperatura superficial interior de la CL y CP con diferentes valores de reflectividad al visible, en el Día Promedio y el Día Extremo.

De acuerdo con estos resultados, el incremento de la reflectividad al visible tiene una mayor influencia sobre la CL que en la CP. Sin embargo, dado que las dos cubiertas, de acuerdo a los Modelos Base, tienen diferentes valores de reflectividad, la CL sólo puede tener un incremento posible de 0.25, desde 0.50 a 0.75, mientras que la CP tiene la capacidad de incrementar un valor de 0.50, desde 0.25 a 0.75.

Si analizamos estos incrementos posibles en las dos cubiertas, la CL con un incremento de su reflectividad de 0.50 a 0.75 muestra una reducción de **5.3°C**, y la CP con un incremento de 0.25 a 0.75 tiene una reducción de **3.4°C**, en el Día Promedio. Mientras que en el Día extremo esta reducción es **8°C** para la CL y **4.8°C** para la CP. Por lo tanto, la CL, aún con la mitad del incremento de la reflectividad que la CP, muestra una mayor reducción de su T_{si} .

Aunque el impacto de esta estrategia tiene una mayor influencia sobre la CL que en la CP, el uso de una reflectividad de 0.75 reduce la temperatura de la CP hasta la T_a en el Día Promedio, y 1°C por debajo de la T_o en el Día Extremo.

En consecuencia, el uso de una reflectividad al visible de 0.75 en ambas cubiertas reduce la diferencia térmica inicial entre ellas, correspondiente a los Resultados Base. De acuerdo con estos resultados, esta diferencia ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) se reduce de 7.6°C a **6°C** en el Día Promedio, y de 12.4°C a **9°C** en el Día Extremo.

Tanto en la CL como en la CP, el impacto de esta variable es mayor en el Día Extremo que en el Día Promedio. Es decir **a mayor radiación solar, mayor es la radiación reflejada y mayor es el impacto de la reflectividad al visible sobre la temperatura de la cubierta.**

En lo que respecta al **PERIODO NOCTURNO**, **Figura 78**, el incremento de la reflectividad al visible de 0.25 a 0.75, muestra una reducción de la T_{si} de 1.3°C en la CL y 3.5°C en la CP, tanto en el Día Promedio como en el Día Extremo.

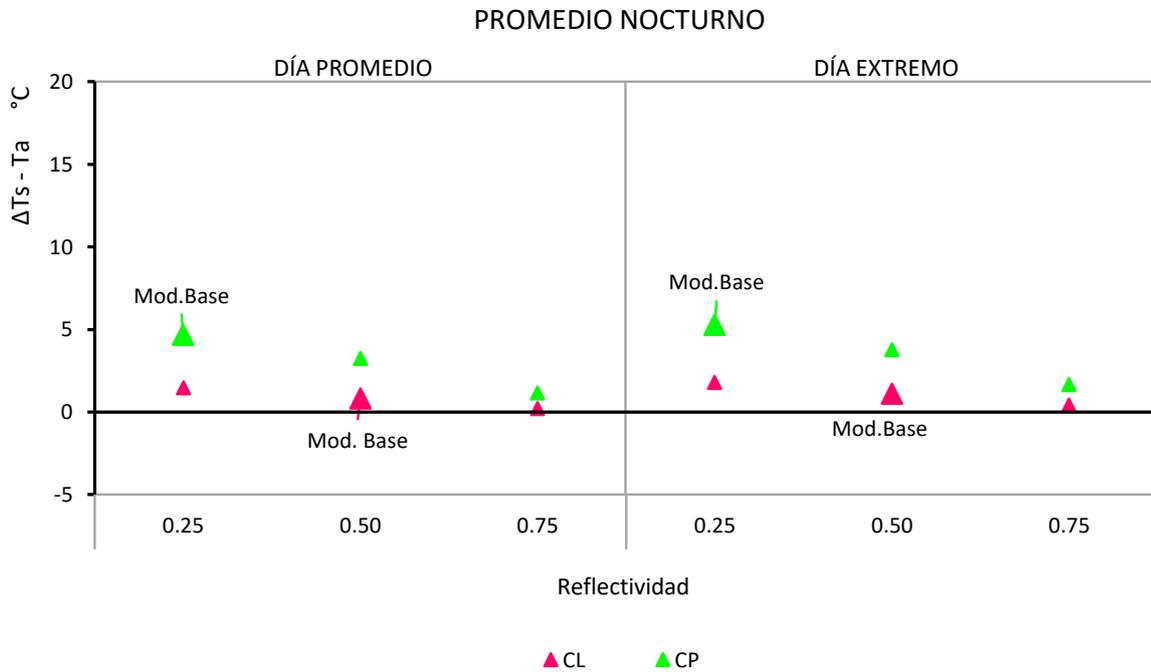


Figura 78 Promedio nocturno de la temperatura superficial interior de la CL y la CP con diferentes valores de reflectividad al visible, en el Día Promedio y el Día Extremo.

De acuerdo con estos resultados, en este periodo, el incremento de la reflectividad muestra una mayor repercusión en la CP que en la CL.

Es más, si analizamos el incremento posible que puede tener la CL de 0.50 a 0.75, la reducción de la T_{si} es de **0.6°C**, en los dos días de análisis. Con lo cual la influencia de esta variable sobre la CL en este periodo es poco significativa.

Aunque el parámetro de la reflectividad no actúa de forma directa en el periodo nocturno, debido al almacenamiento de calor de las propias cubiertas y el espacio interior, la influencia de esta se hace evidente en este periodo.

A causa de la baja masa térmica de la CL, la radiación solar absorbida en el periodo diurno es liberada inmediatamente después de que el sol desaparece. Por lo cual, la repercusión de esta variable en este periodo es poco relevante.

Por el contrario, dada la alta masa térmica de la CP, la influencia de esta variable sobre la radiación solar reflejada en el periodo diurno se muestra intensamente en el periodo nocturno. El incremento de la reflectividad de 0.25 a 0.75 representa una reducción de T_{si} en el periodo nocturno casi igual a la reducción vista en el periodo diurno.

Dada la alta influencia de esta estrategia sobre la CP, la diferencia térmica inicial entre las dos cubiertas, correspondiente a los Resultados Base, se reduce de manera considerable en este periodo. Conforme a estos resultados, esta diferencia ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) se reduce de -3.5°C a -1°C en el Día Promedio y de -4.2°C a -1.3°C en el Día Extremo. Sin embargo, aún con estos resultados, la CL mantiene una temperatura menor que la CP en este periodo.

Conforme a lo expuesto, en el PERIODO DIURNO, **la REFLECTIVIDAD AL VISIBLE tiene una fuerte influencia sobre la reducción de la T_{si} de las dos cubiertas**, pero en especial en la CL.

Mientras que, en el PERIODO NOCTURNO, **la influencia de esta variable sobre la CL es POCO SIGNIFICATIVA, y en la CP tiene un impacto casi igual que en el periodo diurno.**

Además, estos resultados nos han permitido determinar que la efectividad de la reflectividad depende de la cantidad radiación solar recibida. **A mayor radiación solar**, como en el Día Extremo, **mayor es el impacto de esta variable sobre el comportamiento de la cubierta.**

Dado que la radiación solar en esta región no es extrema como en otras latitudes, los resultados de esta investigación muestran que este parámetro tiene una influencia sobre la T_{si} menor que en otros estudios, con cubiertas con las mismas características, [Suehrcke, Peterson and Selby, 2008; Tong *et al.*, 2014; Zingre *et al.*, 2015].

Por lo tanto, debido a la alta nubosidad que reduce el flujo solar, **la efectividad de la REFLECTIVIDAD AL VISIBLE en esta región es menor que en otros climas.**

En el ANEXO A4.3 *REFLECTIVIDAD* se muestran los resultados horarios del impacto de la variable analizada en este apartado sobre la temperatura superficial interior (T_{si}), y además los resultados de la temperatura superficial exterior (T_s) y la temperatura del aire interior (T_{ai}), en los dos días de análisis.

4.2.3 EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO

Al igual que la estrategia anterior, para el análisis del factor de la emisividad al infrarrojo térmico se han considerado 3 variantes: 0.30, 0.60 y 0.90, mientras que los valores de reflectividad al visible se han conservado de acuerdo a los modelos base, 0.50 para la CL y 0.25 para la CP, **Figura 79**.

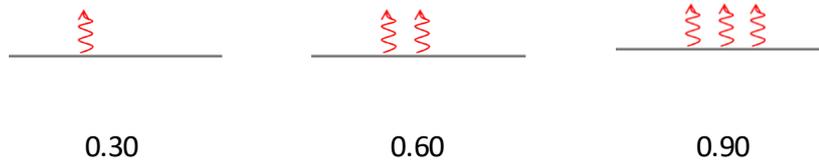


Figura 79 Variantes de análisis de la variable EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO: 0.30, 0.60 y 0.90

En términos prácticos, esta estrategia está dirigida de manera específica a la CL, ya que la CP ya cuenta con un valor de emisividad alto (0.90). No obstante, las mismas variantes se han aplicado a las dos cubiertas con el propósito de hacer una comparación teórica.

A continuación se muestran los resultados de la influencia de esta estrategia sobre la CL y la CP en el periodo diurno y en el periodo nocturno.

En cuanto al **PERIODO DIURNO**, **Figura 80**, el incremento de la emisividad al infrarrojo térmico de 0.3 a 0.9 representa una reducción de la T_{si} de 6.3°C en la CL y 3°C en la CP, en el Día Promedio. Mientras que en el Día Extremo, esta reducción es de 9°C para la CL y 3°C para la CP.

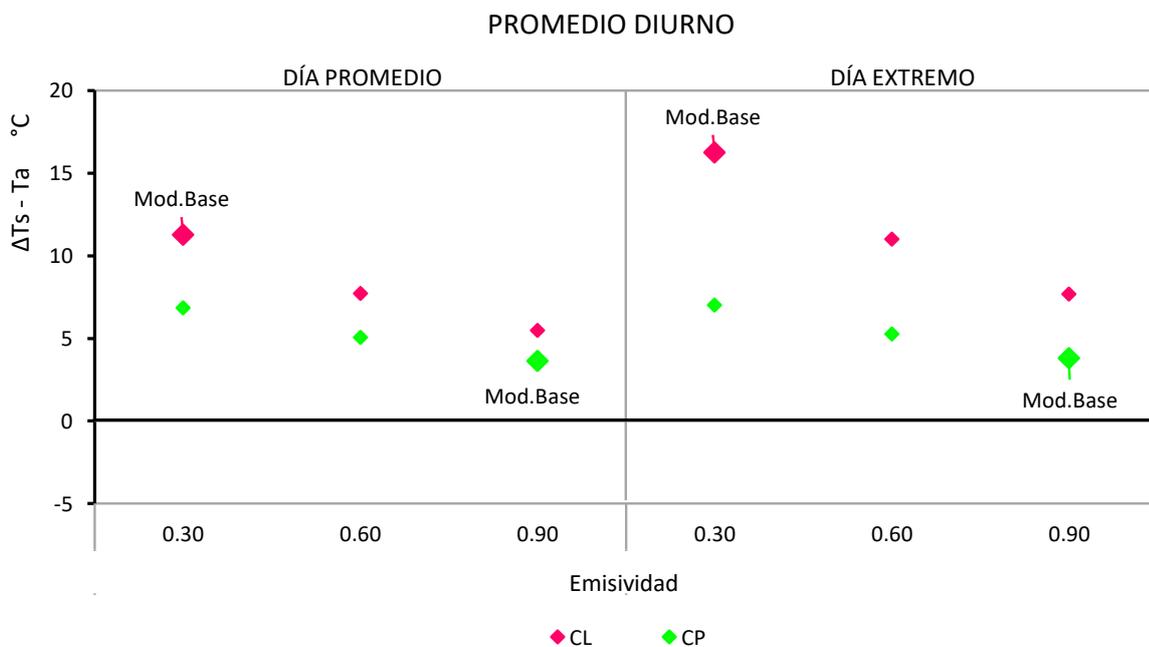


Figura 80 Promedio diurno de la temperatura superficial interior de la CL y CP con diferentes valores de emisividad al infrarrojo térmico, en el Día Promedio y el Día Extremo.

De acuerdo con estos resultados, al igual que en las variables anteriores, la influencia de la emisividad al infrarrojo térmico tiene una mayor repercusión sobre la CL que en la CP.

Aun cuando en este apartado la variación de la emisividad de la CP no sea un caso real, se puede determinar que la disminución de este factor hasta un valor de 0.30, supondría un incremento en su temperatura de 3°C en los dos días de análisis.

En consecuencia, el uso de una emisividad de 0.90 en ambas cubiertas reduce de manera sustancial la diferencia térmica inicial entre ellas, correspondiente a los Resultados Base. Conforme a estos resultados, esta diferencia ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) se reduce de 7.6°C a **2°C** en el Día Promedio, y de 12.4°C a **4°C** en el Día Extremo. Lo cual representa que la CL tenga una temperatura muy similar a la CP en este periodo.

Hasta hora el incremento de la EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO, representa la variable con mayor influencia sobre la reducción de la T_{si} de la CL. Incluso, esta estrategia muestra una efectividad mayor que el incremento de la reflectividad al visible.

En lo que respecta al **PERIODO NOCTURNO**, **Figura 81**, el incremento de la emisividad al infrarrojo térmico de 0.30 a 0.90 muestra una reducción de la T_{si} de 1.2°C en la CL y 3.7°C en la CP, tanto en el Día Promedio como en el Día Extremo.

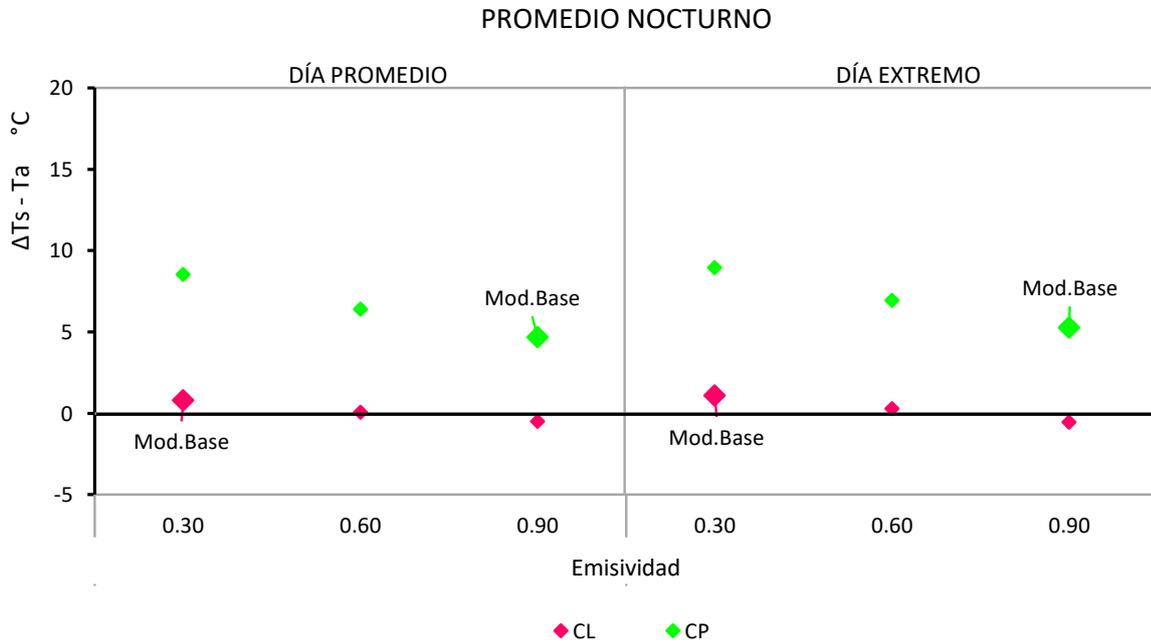


Figura 81 Promedio nocturno de la temperatura superficial interior de la CL y CP con diferentes valores de emisividad al infrarrojo térmico, en el Día Promedio y el Día Extremo.

Aunque es un caso teórico, la emisividad en el periodo nocturno tiene una mayor influencia en la CP que en la CL. Una disminución de la emisividad de la CP de 0.90 a 0.30 representaría una reducción de alrededor de 4°C de la CP.

El incremento de la emisividad en la CL de 0.30 a 0.90 da como resultado que su temperatura se reduzca incluso por debajo de la temperatura del aire.

En este periodo, con el uso de una emisividad de 0.90 para ambas cubiertas se incrementa la diferencia térmica inicial entre ellas, correspondiente a los Resultados Base. De acuerdo con estos resultados, esta diferencia ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) crece de -4.2°C a -5.2°C, en los dos días de análisis.

Debido a que el factor de la emisividad actúa sobre las pérdidas por radiación, y este flujo repercute de manera directa sobre el balance de la cubierta durante todo el día (24h), a diferencia de la radiación solar que actúa sólo durante las horas de sol (12h), esta estrategia tiene una gran influencia sobre la reducción de la T_{si} de la CL en los dos periodos.

En consecuencia, de todas las estrategias analizadas hasta ahora, **el INCREMENTO DE LA EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO ha sido la estrategia con mayor repercusión sobre la reducción de la T_{si} de la CL**, tanto en el periodo diurno como en el periodo nocturno. De manera que, la diferencia de temperaturas de la CL con respecto a la CP ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$), es el más reducido en el día, **Figura 80**, y el más amplio en la noche, **Figura 81**.

4.2.4 DOBLE CAPA

La variable que se analiza en este apartado es la DOBLE CAPA o doble piel (double skin). Para lo cual a los modelos base de cada cubierta se les ha añadido una capa de yeso cartón en el interior separada por una cámara ventilada, **Figura 82**. Los valores de reflectividad al visible y emisividad al infrarrojo térmico se han conservado de acuerdo a los modelos base, $r=0.50$ y $e=0.30$ para la CL, y $r=0.25$ y $e=0.90$ para la CP.

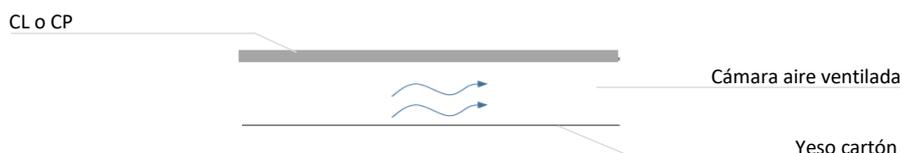


Figura 82 Variable DOBLE CAPA: cámara de aire ventilada + Yeso Cartón.

A continuación se muestran los resultados de la influencia de esta estrategia sobre los modelos base, en el periodo diurno y en el periodo nocturno.

De acuerdo a los resultados en el **PERIODO DIURNO**, **Figura 83**, el uso de esta estrategia muestra una reducción de la T_{si} , con respecto al Modelo Base, de 4.5°C en la CL y 0.75°C en la CP, en el Día Promedio. Mientras que en el Día Extremo, esta reducción es de 8°C para la CL y 1.7°C para la CP.



Figura 83 Promedio diurno de la temperatura superficial interior de la CL y CP, con el Modelo Base y la doble capa, en el Día Promedio y el Día Extremo.

De acuerdo con estos resultados, en el periodo diurno, el uso de la DOBLE CAPA tiene una fuerte influencia sobre la reducción de la T_{si} de la CL. Mientras que en la CP, la influencia de esta estrategia es mínima tanto en el Día Promedio como en el Día extremo.

Al adherir una capa a las cubiertas, el flujo de calor desde el exterior hacia el interior disminuye, debido a que la transmitancia térmica de este elemento se incrementa. Aunque la resistencia conductiva de la segunda capa no es tan significativa sobre el incremento de la resistencia térmica total, el adherir esta capa implica la adición de una segunda resistencia superficial (convectiva y radiativa) tanto exterior como interior, lo cual modifica de manera relevante la transmitancia térmica de la cubierta.

Debido a que el flujo a través de la CP tiene un retraso de 4 horas, la reducción de temperatura provocada por esta segunda capa es poco relevante en el periodo diurno. Sin embargo en la CL, ya que el flujo a través de esta es alto y casi instantáneo, la reducción de temperatura mostrada es mucho mayor que en la CP.

En consecuencia, el uso de esta estrategia en las dos cubiertas reduce de manera sustancial la diferencia térmica inicial entre ellas, correspondiente a los Resultados Base. Conforme a estos resultados, esta diferencia ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) se reduce de 7.6°C a 4°C en el Día Promedio, y de 12.4°C a 6°C en el Día Extremo.

Aunque el uso de la doble capa muestra una gran influencia sobre la reducción de la T_{si} de la CL, 4.5°C y 8°C con respecto al Modelo Base, esta reducción es menor a la que se consigue con el incremento de la EMISIVIDAD y también con el incremento de LA REFLECTIVIDAD, tanto en el Día Promedio como en el Día Extremo.

En lo que respecta a los resultados del **PERIODO NOCTURNO**, **Figura 84**, el uso de la doble capa muestra una reducción con respecto al modelo Base de 0.35°C para la CP, tanto en el Día Promedio como en el Día Extremo.

Sin embargo en el caso de la CL, el uso de esta estrategia en este periodo muestra un incremento de alrededor de 2°C en los dos días de análisis.

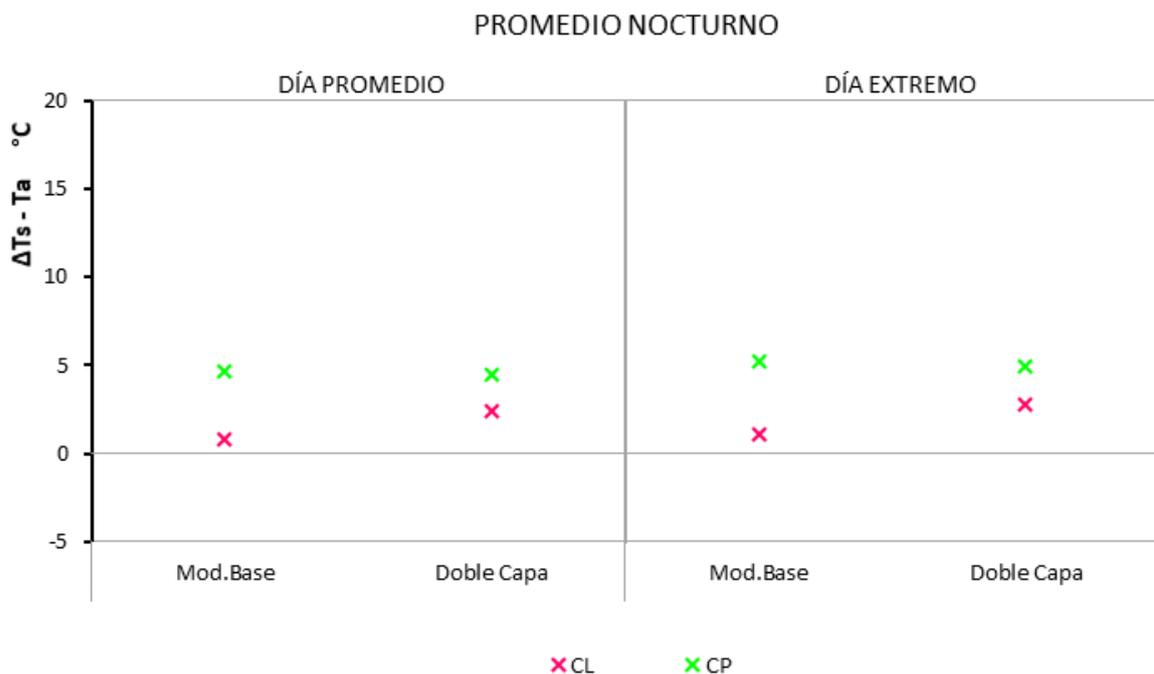


Figura 84 Promedio nocturno de la temperatura superficial interior de la CL y CP, con el Modelo Base y la doble capa, en el Día Promedio y el Día Extremo.

Al igual que en el periodo diurno, la influencia de esta variable sobre la CP en este periodo es muy reducida, tanto en el Día Promedio como en el Extremo.

En cambio, en la CL, a diferencia de la gran reducción de temperatura que ofrece esta variable en el periodo diurno, los resultados muestran que la adición de una segunda capa en el periodo nocturno incrementa su temperatura de manera considerable.

Así como en el periodo diurno, el flujo de calor desde el exterior hacia el interior se reduce con el uso de una segunda capa, sucede lo mismo con el flujo desde el interior hacia el exterior en el periodo nocturno.

En este periodo, la segunda capa de la cubierta ya no pierde calor por radiación con el cielo, como sucede con la primera capa. Aunque las pérdidas por convección sean las mismas que en el modelo base, suponiendo que la temperatura de la cámara sea la misma que la T_a , las pérdidas por radiación son menores, y por tanto la T_{si} se incrementa.

En el caso de la CP, debido a su alta masa térmica, la capa de hormigón aún mantiene una temperatura mayor que la segunda capa en el periodo nocturno, por lo que se muestra una pequeña reducción de la T_{si} en este periodo.

Aún con el incremento que provoca el uso de esta estrategia en la CL en el periodo nocturno, la T_{si} de esta se mantiene por debajo de la CP. La diferencia entre estas dos cubiertas ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$), después de la adición de la segunda piel, es de **-2°C**, tanto en el Día Promedio como en el Día Extremo.

En referencia a todo lo expuesto en este apartado, en esta región, el uso de la DOBLE CAPA muestra **una gran efectividad sobre la reducción de la T_{si} de la CL, en el periodo diurno**. Sin embargo, en el **periodo nocturno, la influencia de esta variable sobre la reducción de la T_{si} es NEGATIVO**.

Por otra parte, **la efectividad de esta variable sobre la reducción de la T_{si} de la CP es casi NULA**, tanto en el periodo diurno como en el nocturno.

En el ANEXO A4.5 DOBLE CAPA se muestran los resultados horarios del impacto de la variable analizada en este apartado sobre la temperatura superficial interior (T_{si}), la temperatura superficial exterior (T_s) y la temperatura del aire interior (T_{ai}), en los dos días de análisis.

4.2.5 RESULTADOS GENERALES

Con el propósito de determinar la estrategia con mayor influencia sobre la reducción de la T_{si} de cada cubierta, en este apartado se comparan los resultados de todas las variables analizadas.

Para simplificar esta comparación se analizan sólo los valores máximos de cada una de las estrategias aplicadas, en comparación con el Modelo Base. Los valores de las variables mostradas corresponden a: una inclinación de 45%, una reflectividad al visible de 0.75, una emisividad al infrarrojo térmico de 0.90 y el uso de la doble capa, tanto en el periodo diurno como en el nocturno.

De acuerdo a los resultados en el **PERIODO DIURNO**, *Figura 85*, todas las estrategias aplicadas, con excepción de la inclinación, tienen una fuerte influencia sobre la reducción de la T_{si} de la CL.

La variable que tiene la mayor repercusión sobre la CL es la **EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO** tanto en el Día Promedio como en el Día Extremo. La efectividad de esta variable es mayor que la reflectividad al visible o el uso de una doble capa.

Por otra parte, la única variable que muestra una reducción importante sobre la T_{si} de la CP es la **REFLECTIVIDAD AL VISIBLE**. La influencia del resto de variables sobre la reducción de la T_{si} de esta cubierta es casi nula, tanto en el Día Promedio como en el Día Extremo.

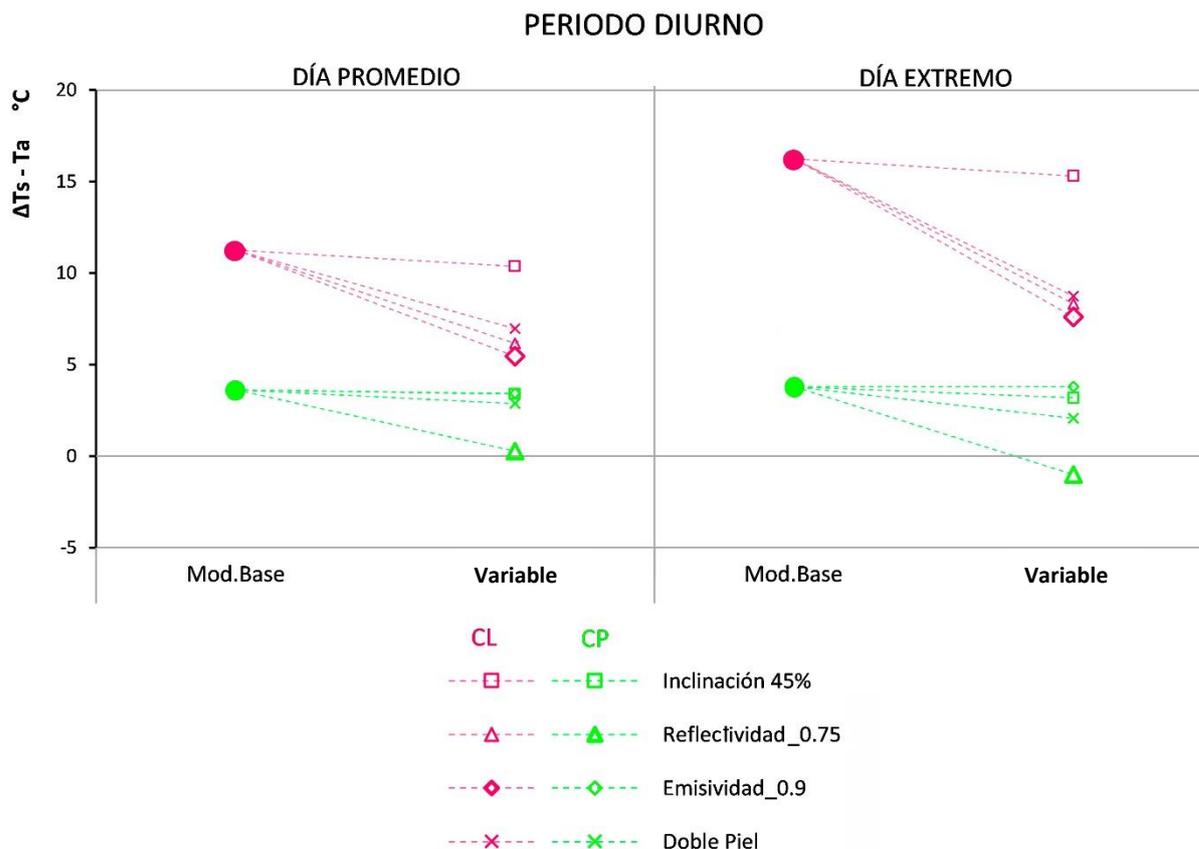


Figura 85 Influencia de todas las variables analizadas en comparación al Modelo Base en el periodo diurno, en el Día Promedio y en el Día Extremo.

En cuanto al **PERIODO NOCTURNO**, **Figura 86**, en referencia a la CL, todas las variables tienen un impacto positivo sobre la reducción de su T_{si} , con excepción del uso de la doble capa que tiene un impacto negativo en este periodo.

Al igual que en el periodo diurno, la variable con mayor influencia sobre la **CL** es la **EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO**, por encima de la reflectividad al visible, la doble capa, y por supuesto de la inclinación y orientación.

En cambio, en la CP, con excepción de la reflectividad, todas estas estrategias tienen un impacto mínimo sobre la reducción de la T_{si} , y hasta negativo en el caso de la inclinación, en los dos días de análisis.

Otra vez, la variable con mayor efectividad sobre la reducción de la T_{si} de la **CP** es la **REFLECTIVIDAD AL VISIBLE**. En el periodo nocturno, esta propiedad radiativa muestra la mayor influencia en reducción de T_{si} entre todas las variables analizadas en las dos cubiertas.

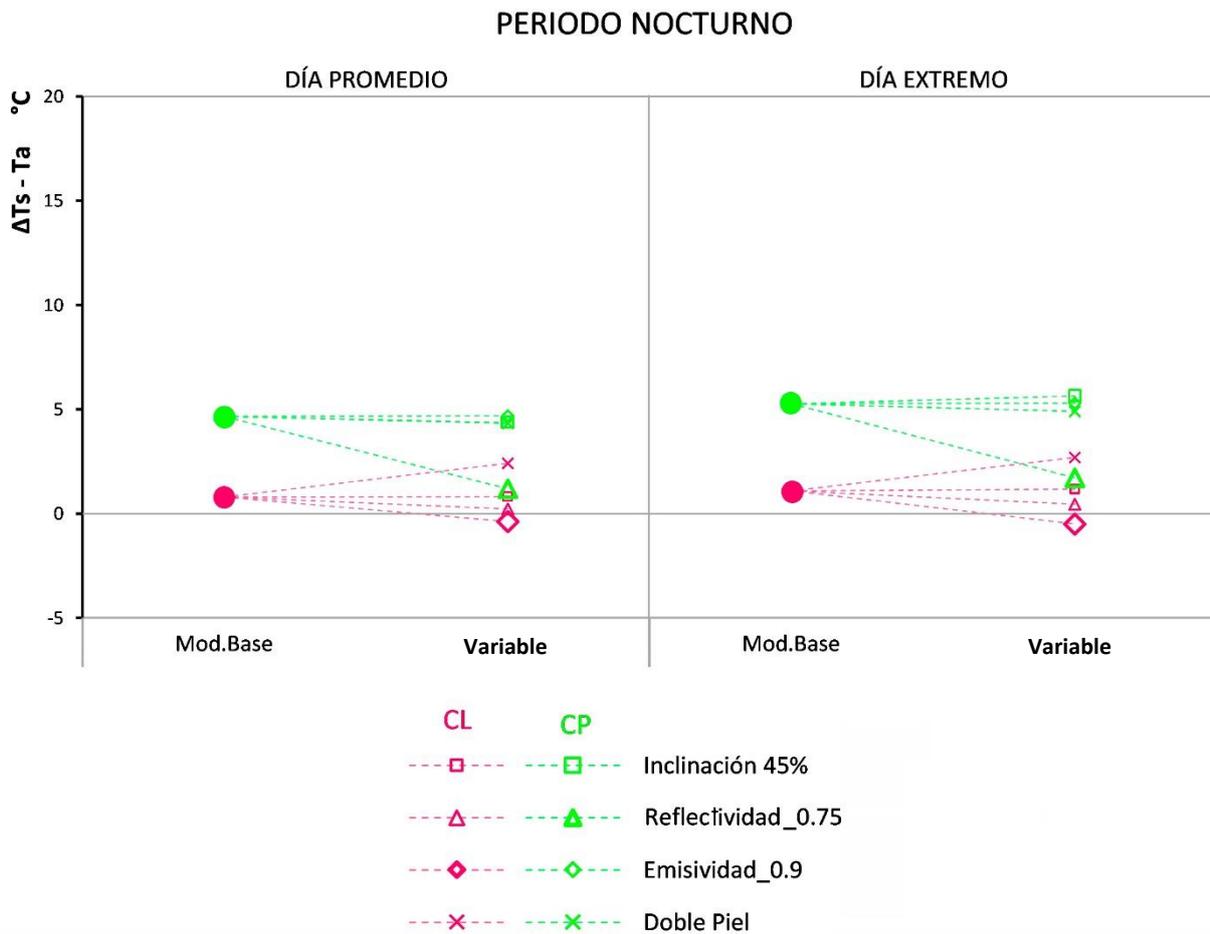


Figura 86 Influencia de todas las variables analizadas en comparación al modelo base en el periodo nocturno, en el Día Promedio y el Día Extremo.

En la **Tabla 15** y **Tabla 16** se muestran los valores cuantitativos de la influencia de los valores máximos de cada una de las estrategias aplicadas, en comparación con los resultados de modelo Base, en el Día Promedio y el Día Extremo.

La tabla utiliza dos escalas de colores para representar la influencia favorable o reducción en azul y la influencia desfavorable o incremento en rojo, de cada variable, tanto en el periodo diurno como en el nocturno.

En base a este análisis integral se pueden realizar varias observaciones generales, en referencia al impacto de las variables sobre el comportamiento térmico de las dos cubiertas.

Tabla 15 Influencia cuantitativa de las variables analizadas sobre la reducción de la T_{si} de la CL y la CP en comparación al Modelo Base en el periodo diurno y nocturno, en el Día Promedio.

		PERIODO DIURNO		PERIODO NOCTURNO	
		CL	CP	CL	CP
	REDUCCIÓN				
	NULA				
	INCREMENTO				
	MODELO BASE	$r=0,52$ $e=0,3$ $U=7,2 \text{ W/m}^2\text{.K}$	$r=0,25$ $e=0,90$ $U=2,8 \text{ W/m}^2\text{.K}$	$r=0,52$ $e=0,3$ $U=7,2 \text{ W/m}^2\text{.K}$	$r=0,25$ $e=0,90$ $U=2,8 \text{ W/m}^2\text{.K}$
	RESULTADO BASE ($\Delta T_{si} - T_a$)	11.3	3.7	0.8	4.3
INCLINACIÓN					
		0.9	0.3	0.0	-0.3
	45%				
REFLECTIVIDAD					
		5.3	3.4	0.6	3.1
	0.75				
EMISIVIDAD					
		6.3	0.0	1.3	0.0
	0.90				
DOBLE CAPA					
		4.5	0.8	-1.5	-0.1

En cuanto a la **CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN**, la variable que tiene la mayor repercusión sobre la reducción de su T_{si} es el factor de la **REFLECTIVIDAD AL VISIBLE**, tanto en el periodo diurno como en el periodo nocturno.

En el PERIODO DIURNO, esta variable muestra una reducción máxima con respecto al Modelo Base de **3.4 °C** en el Día Promedio y **4.8 °C** en el Día Extremo. El resto de variables analizadas tienen una influencia poco significativa sobre la CP, la doble capa 0.8°C y 1.7°C, la inclinación 0.3°C y 0.6°C y la emisividad 0°C.

En el PERIODO NOCTURNO, la reflectividad al visible repercute con una reducción máxima con respecto al Modelo Base de **3.1°C** en el Día Promedio y **3.6°C** en el Día Extremo. Otra vez, el resto de variables muestran un impacto mínimo sobre la reducción de la T_{si} de la CP, la doble capa 0.4°C e inclusive la inclinación tiene una repercusión negativa.

A continuación se muestra un resumen de la efectividad máxima de todas las estrategias en la CL y la CP, tanto en el día como en la noche, en el Día Extremo, **Figura 87**.

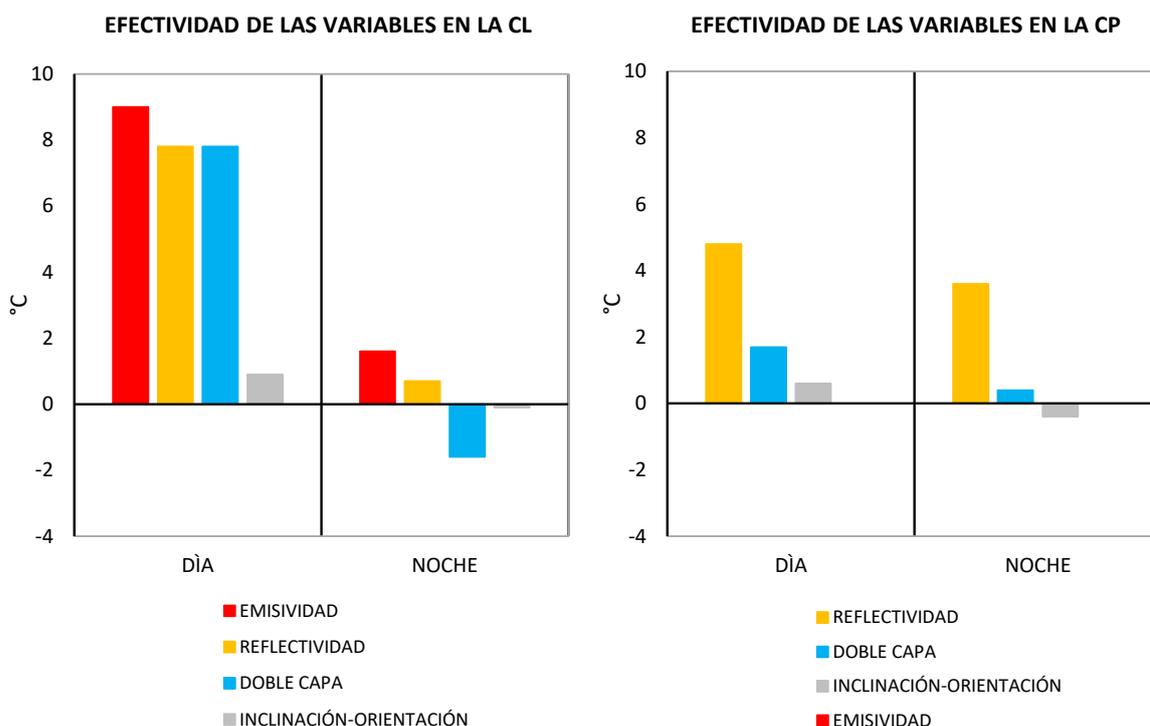


Figura 87 Efectividad de las variables sobre la reducción de la T_{si} de la CL (izquierda) y la CP (derecha) respecto al Modelo Base, en el Día y la Noche, en el Día Extremo.

A través de todo lo expuesto en este apartado, se ha podido determinar que: **LAS PROPIEDADES RADIATIVAS SON LAS VARIABLES CON MAYOR REPERCUSIÓN SOBRE LA REDUCCIÓN DEL CALENTAMIENTO DE LAS CUBIERTAS ANALIZADAS**, la emisividad al infrarrojo térmico para la CUBIERTA LIGERA METÁLICA y la reflectividad al visible para la CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN.

4.3 COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE LA CL Y CP

Hasta ahora, la investigación se ha centrado en la influencia independiente de cada variable sobre la CL y la CP. El impacto de estas variables se ha determinado tomando como punto de referencia las propiedades térmicas del Modelo Base de cada cubierta. Sin embargo, las propias características materiales de la CL y la CP en sus modelos base, la reflectividad al visible y la emisividad al infrarrojo térmico entre estas dos cubiertas han sido diferentes.

Por ello, y para realizar un análisis comparativo en igualdad de propiedades radiativas del desempeño térmico de la CL y la CP, se han igualado su REFLECTIVIDAD AL VISIBLE a un valor de 0.75 y su EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO a un valor de 0.90. Para esta comparación se ha utilizado el mismo modelo de simulación anterior, una cubierta con una inclinación del 0% y una sola capa.

Los únicos parámetros que no son iguales en este análisis son la transmitancia y masa térmica de las cubiertas, **Tabla 17**. De aquí en adelante se hará referencia a este nuevo modelo como **MODELO EQUIVALENTE**.

Tabla 17 Valores de las propiedades radiativas y térmicas de la CL y la CP, de acuerdo al MODELO EQUIVALENTE

	Reflectividad r	Emisividad e	Transmitancia Térmica U (W/m ² .K)	Masa Térmica M (kJ/m ² .K)
CL	0.75	0.90	7.14	0.61
CP	0.75	0.90	2.68	85.60

El Modelo Equivalente de la CL con respecto a su Modelo Base muestra un incremento tanto en su reflectividad al visible, de 0.5 a 0.75, como en su emisividad al infrarrojo térmico, de 0.3 a 0.9. Mientras que la CP incrementa sólo su reflectividad al visible, de 0.25 a 0.75, **Figura 88**.

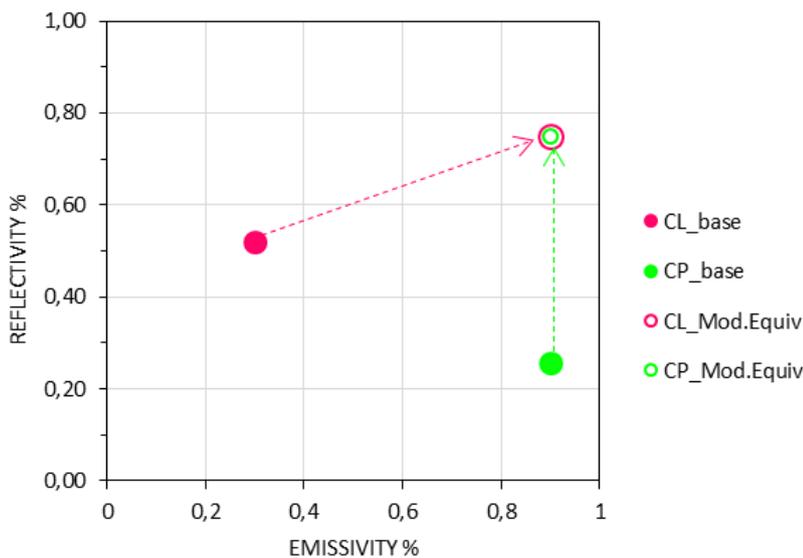


Figura 88 Propiedades radiativas de la CL y la CP de acuerdo al Modelo Base y al Modelo Equivalente.

A través de este análisis se podrán COMPARAR los comportamientos de estas dos cubiertas en función sólo de su masa y transmitancia térmica, y además determinar el objetivo principal de esta investigación: **¿QUE TIPOLOGÍA DE CUBIERTA OFRECE UN MEJOR DESEMPEÑO TÉRMICO EN ESTA REGIÓN?**

Al igual que en el análisis de las variables anteriores, los resultados se muestran tanto para el periodo diurno como para el periodo nocturno, y se comparan con los resultados del Modelo Base.

En cuanto al **PERIODO DIURNO**, **Figura 89**, los resultados muestran que la T_{si} de la CL, con una reflectividad al visible de 0.75 y una emisividad al infrarrojo térmico de 0.90, tiene una reducción con respecto al Modelo Base de **10°C** en el Día Promedio y **15°C** en el Día Extremo, mientras que la CP tiene una reducción de **3°C** y **5°C** respectivamente.

De acuerdo a los resultados del modelo equivalente, la diferencia de la T_{si} entre la CL y la CP ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es de **0.6°C** en el Día Promedio y **1.9°C** en el Día Extremo.

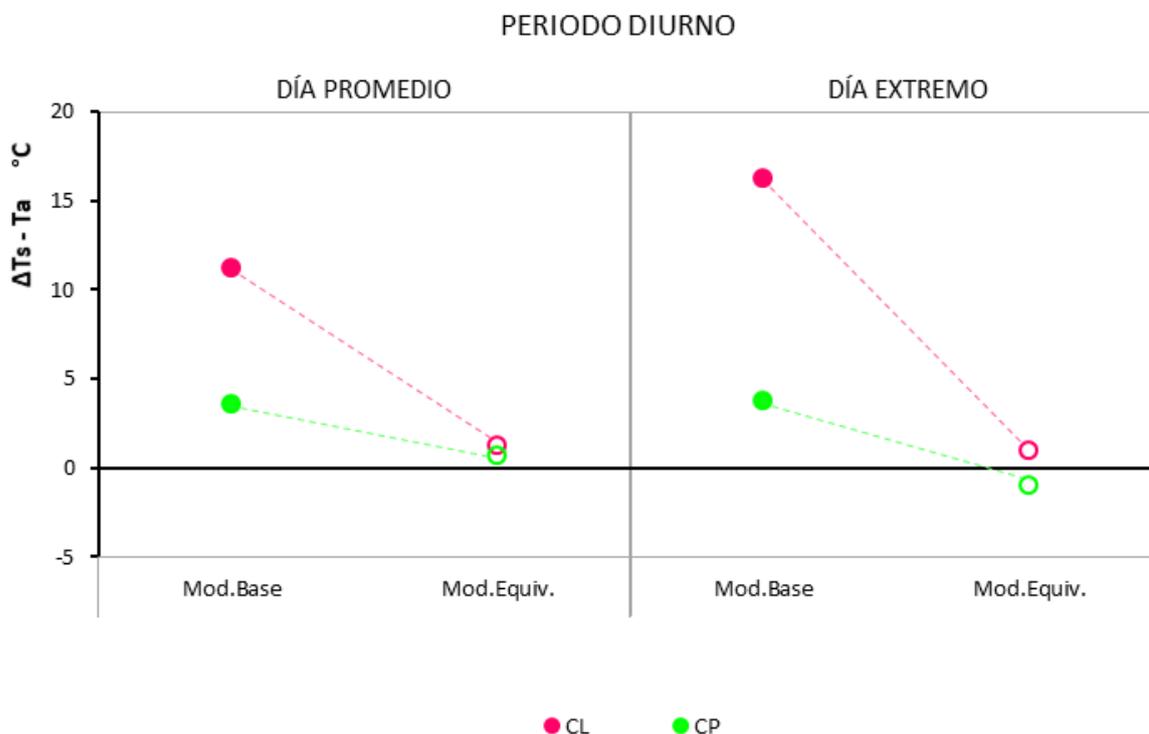


Figura 89 Comparación del promedio diario de la temperatura superficial interior de la CL y CP entre el Modelo Base y el Modelo Equivalente, en el Día Promedio y en el Día Extremo.

El incremento de la reflectividad y el de la emisividad de la CL repercute con una importante reducción de su T_{si} , mucho mayor que el incremento de la reflectividad en la CP. Por lo tanto, en el periodo diurno, la CL tiene un desempeño térmico muy similar al de la CP, tanto en el Día Promedio como en el Día Extremo.

En cuanto al **PERIODO NOCTURNO**, los resultados del Modelo Equivalente muestran que la CL tiene una reducción de **2°C**, con respecto al Modelo Base, y la CP tiene una reducción de **3.5°C**, en los dos días de análisis, **Figura 90**.

De acuerdo a los resultados del modelo equivalente, la diferencia de la T_{si} entre estas dos cubiertas ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) en este periodo es de **-2°C** en el Día Promedio y **-3°C** en el Día Extremo.

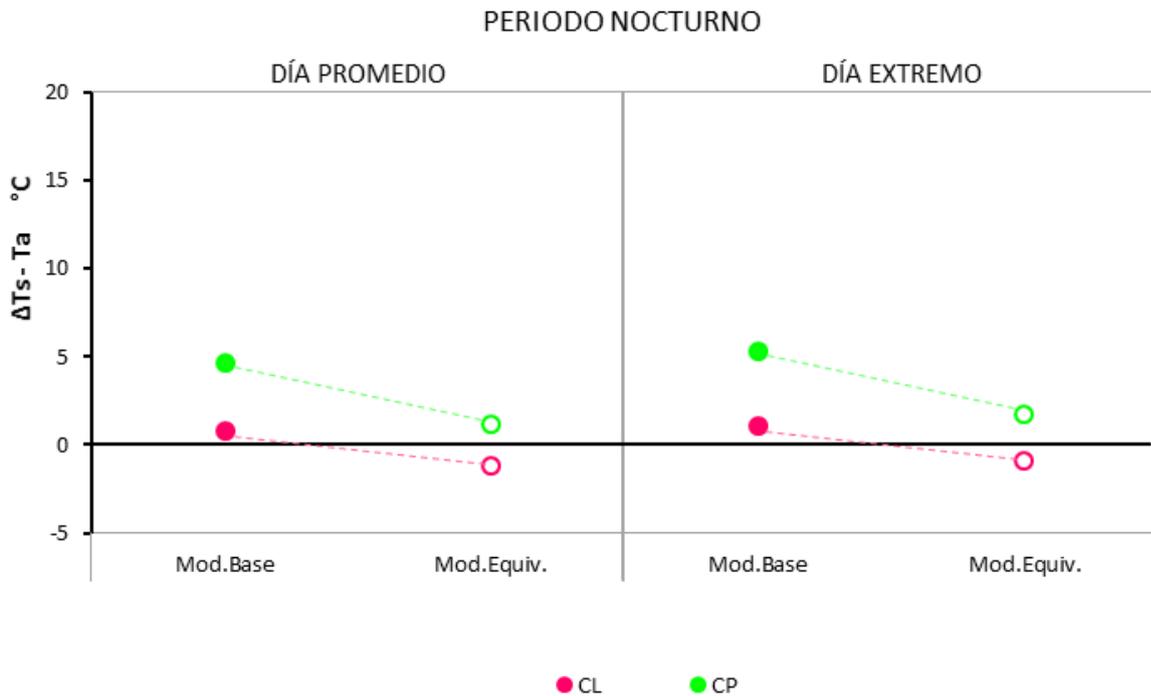


Figura 90 Comparación del promedio nocturno de la temperatura superficial interior de la CL y CP entre el Modelo base y el Modelo Equivalente, en el Día Promedio y en el Día Extremo.

En este periodo, el incremento de la reflectividad al visible en la CP tiene una mayor repercusión en la reducción de su T_{si} que el incremento de ambas propiedades radiativas en la CL.

Debido a la alta masa térmica de la CP, el incremento de la radiación reflejada en el periodo diurno se hace evidente con gran intensidad en el periodo nocturno. Mientras que en la CL, debido a su baja masa térmica, sólo el incremento de la emisividad al infrarrojo térmico es el que tiene una influencia significativa sobre la reducción de la T_{si} en este periodo.

Aunque es la CP la que muestra una mayor reducción en este periodo, la CL aún mantiene una temperatura superficial interior 2°C y 3°C menor que la CP, en el Día Promedio y el Día Extremo respectivamente.

En base a todo lo expuesto en este apartado, en el PERIODO DIURNO, la igualación de las propiedades radiativas de la CL y la CP determina que la diferencia de transmitancia y masa térmica de estas cubiertas no tenga una repercusión importante en el comportamiento térmico de estas. Por lo que, la temperatura superficial interior de las dos cubiertas es muy similar en este periodo, tanto en el Día Promedio como en el Día Extremo.

No obstante, en el PERIODO NOCTURNO, la diferencia de transmitancia y masa térmica de estas cubiertas si representa una diferencia de temperatura entre estas cubiertas más significativa que en el periodo diurno, en los dos días de análisis. Aún con el mismo factor de reflectividad y de emisividad, la alta masa térmica de la CP sumado a la baja capacidad de enfriamiento del cielo en esta región no permite que su temperatura se reduzca tanto como la CL en este periodo.

EN CONSECUENCIA, EN LA REGIÓN COSTA DEL ECUADOR:

LA CUBIERTA LIGERA METÁLICA (CL), con una reflectividad al visible de 0.75 y una emisividad al infrarrojo térmico de 0.90, **TIENE UN DESEMPEÑO TÉRMICO CASI IGUAL A UNA CUBIERTA PESADA DE LOSA DE HORMIGÓN (CP)** con las mismas propiedades radiativas **en el periodo diurno**. Mientras que **en el periodo nocturno, la CL MANTIENE UN MEJOR DESEMPEÑO TÉRMICO QUE LA CP**, al igual que en su estado original.

Hasta ahora todos los resultados analizados reflejan LA IMPORTANCIA DE LAS PROPIEDADES RADIATIVAS sobre el comportamiento térmico de estas dos cubiertas, en el caso de la CL la emisividad y en el caso de la CP la reflectividad.

Además, los resultados muestran que el uso en conjunto de estas dos estrategias anula casi en su totalidad la diferencia de transmitancia y masa térmica de estas cubiertas en el periodo diurno. Aunque en el periodo nocturno predomina la importancia de la baja masa térmica de la CL sobre la CP, la influencia de las propiedades radiativas sigue siendo relevante.

Debido a la importancia de LA REFLECTIVIDAD AL VISIBLE Y LA EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO sobre el comportamiento térmico de las dos cubiertas analizadas, la siguiente y última parte de este capítulo se centra en el análisis detallado de estas dos variables sobre la Cubierta ligera metálica y la Cubierta pesada de hormigón. Este análisis se realiza desde un punto de vista teórico y se complementa con un análisis de trabajo experimental.

4.3.1 PARAMETIZACIÓN DE LA REFLECTIVIDAD Y DE LA EMISIVIDAD.

Para llevar a cabo un estudio detallado de la influencia de la REFLECTIVIDAD AL VISIBLE Y EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO sobre la el comportamiento térmico de la CL y la CP, en este apartado se ha parametrizado la temperatura superficial interior (T_{si}) de cada una de las cubiertas en función de estas dos variables.

Para relacionar estos 3 parámetros (T_{si} , reflectividad y emisividad) se ha utilizado una representación gráfica en base a una escala de colores y a un plano cartesiano, **Figura 91**.

La escala de colores muestra el gradiente de intensidad de la temperatura superficial interior (T_{si}) a través de bandas de colores, que indican áreas "isotermas". En el plano cartesiano se representa la REFLECTIVIDAD AL VISIBLE en el EJE-Y y la EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO en el EJE-X. Los dos ejes tienen un rango de 0.10-1.00, mientras que la escala de colores comprende 15 isotermas, que representa una escala térmica de 20 °C hasta 50°C, con lo cual cada isoterma representa 2°C.

De igual manera que en los análisis anteriores, la parametrización de la T_{si} se ha analizado con los promedio en el periodo Diurno y en el periodo nocturno tanto para el Día Promedio como para el Día Extremo. Para cada cubierta y para cada periodo se utilizó una gráfica independiente, sin embargo se utiliza la misma escala de colores para todas.

En el **PERIODO DIURNO** del Día Promedio, la CUBIERTA LIGERA (CL) muestra una mayor variación que la CUBIERTA PESADA (CP). La diferencia de la T_{si} entre los valores extremos de las propiedades radiativas de esta gráfica, (entre r_0.1 e_0.1 y r_1.00 e_1.00) es de **28°C** en el caso de la CL y **12°C** en el caso de la CP, **Figura 91**.

De acuerdo con estos resultados, en el periodo diurno, tanto la REFLECTIVIDAD (eje Y) como la EMISIVIDAD (eje X) tienen una mayor influencia sobre la CL que en la CP.

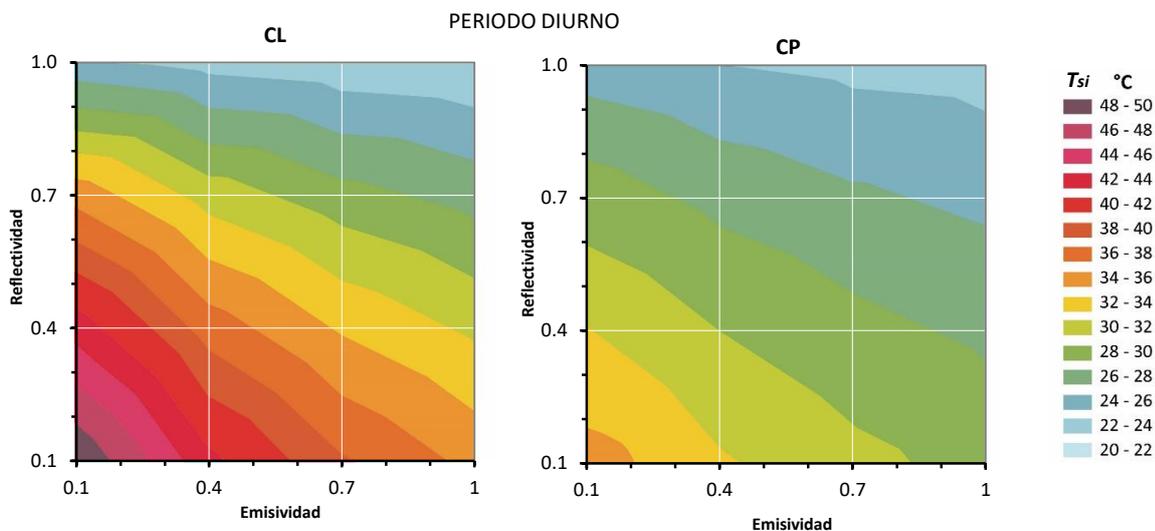


Figura 91 Parametrización de la T_{si} de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en función de la reflectividad al visible y la emisividad al infrarrojo térmico, en el periodo DIURNO del Día Promedio.

Por otra parte, se puede comparar de manera independiente la repercusión de cada propiedad radiativa sobre la T_{si} de cada cubierta. Estos resultados muestran que la REFLECTIVIDAD AL VISIBLE tiene una alta influencia sobre la T_{si} de la CL y la CP, en valores bajos y altos de emisividad al infrarrojo térmico. Mientras que la EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO tiene una fuerte repercusión sobre la T_{si} de estas dos cubiertas en especial en valores bajos de reflectividad al visible.

En la **CL**, el INCREMENTO DE LA REFLECTIVIDAD de 0.10 a 1.00 con una emisividad de 0.10 significa una reducción de temperatura de 26°C (13 isotermas). Este mismo incremento de reflectividad (0.10 a 1.00) pero con una emisividad de 1.00 significa una reducción de 12°C.

El INCREMENTO DE LA EMISIVIDAD en la CL de 0.10 a 1.00 con una reflectividad de 0.10 representa una reducción de 16°C. Este mismo incremento de emisividad pero con una reflectividad de 1.00 representa una reducción de 4°C.

En la **CP**, el INCREMENTO DE REFLECTIVIDAD de 0.10 a 1.00 representa una reducción de 11°C y 7°C para una emisividad de 0.10 y 1.00 respectivamente. En cambio, el INCREMENTO DE LA EMISIVIDAD de 0.1 a 1.00 representa una reducción de 7°C y 3°C para una reflectividad de 0.10 y 1.00 respectivamente.

Estos resultados resaltan que LA REFLECTIVIDAD AL VISIBLE ES LA VARIABLE CON MAYOR INFLUENCIA SOBRE LA T_{si} TANTO DE LA CUBIERTA LIGERA METÁLICA (CL) COMO DE LA CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN (CP).

Por último, al comparar el comportamiento térmico de estas dos cubiertas se han determinado ciertos rangos de estas dos variables que definen la diferencia térmica entre la CL y la CP en este periodo.

Conforme a estas gráficas, en el cuadrante entre 0.7 - 1, la diferencia de la T_{si} entre estas dos cubiertas ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es menor a 2°C.

En cambio, en el cuadrante entre 0.4 - 0.7, la diferencia promedio entre la CL y la CP ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es de 4°C.

Y, en el cuadrante entre 0.1 - 0.4, la diferencia promedio entre estas dos cubiertas ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es de 12°C.

Con estos resultados, se determina que EN EL PERIODO DIURNO la CL tiene un desempeño térmico similar a la CP a partir de valores de reflectividad al visible y emisividad al infrarrojo térmico de **0.7**. Sin embargo, si estas propiedades radiativas se reducen, la diferencia de temperaturas se incrementa. Esto implica que la CL alcance temperaturas mucho más altas que la CP.

En cuanto al **PERIODO NOCTURNO** del Día Promedio, esta vez la CL presenta una baja variación de temperaturas, al contrario de la CP que muestra una alta variación. La diferencia de la T_{si} entre los valores extremos de las propiedades radiativas de esta gráfica, (entre $r_{0.1}$ e $r_{1.00}$ y $e_{0.1}$ e $e_{1.00}$) es de 4°C en el caso de la CL y de 12°C en la CP, **Figura 92**.

De acuerdo con estos resultados, en el periodo nocturno tanto la REFLECTIVIDAD AL VISIBLE (eje X) como la EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO (eje Y) tienen una mayor influencia sobre la CP que en la CL.

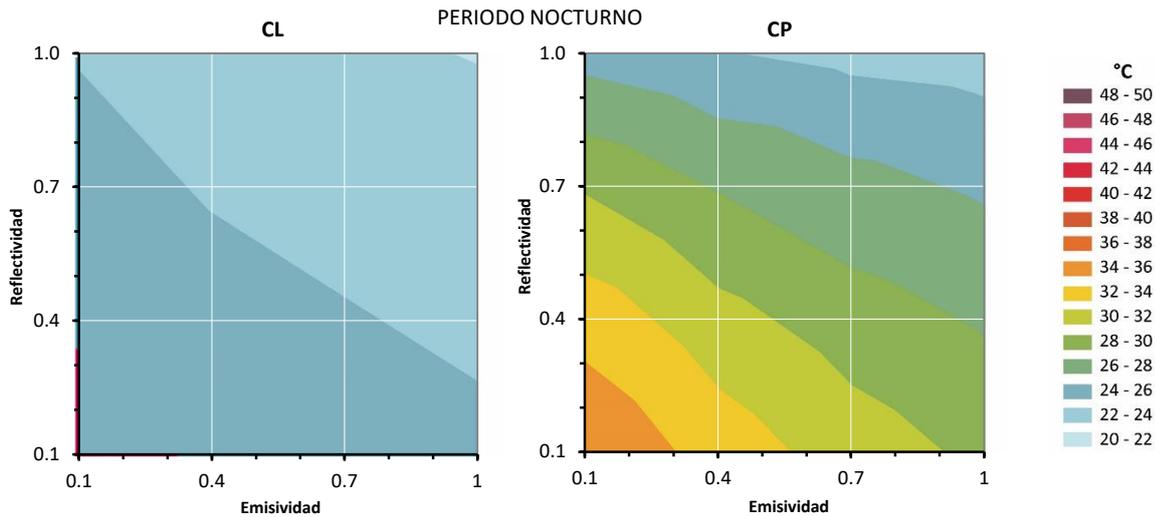


Figura 92 Parametrización de la T_{si} de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en función de la reflectividad al visible y la emisividad al infrarrojo térmico, en el periodo NOCTURNO del Día Promedio.

A continuación se compara de manera independiente la repercusión de cada propiedad radiativa sobre la T_{si} de cada cubierta.

En cuanto a la **CP**, el incremento de la reflectividad de 0.10 a 1.00, significa una reducción de temperatura de 12°C y 8°C para una emisividad de 0.10 y 1.00 respectivamente. En cambio, el incremento de la emisividad de 0.10 a 1.00 representa una reducción de 7°C y 4°C para una reflectividad de 0.10 y 1.00 respectivamente.

En referencia a la **CL**, el incremento de la reflectividad de 0.10 a 1.00, significa una reducción de temperatura de 2°C para una emisividad de 0.10 y 1.00 respectivamente. En cambio, el incremento de la emisividad de 0.10 a 1.00 representa una reducción de 0.5°C y 2°C para una reflectividad de 0.10 y 1.00 respectivamente.

Aunque en este periodo el único parámetro que tiene una repercusión directa es la emisividad, debido al almacenamiento de calor de la propia cubierta y el espacio interior, la influencia de la reflectividad también se hace evidente en este periodo, con mayor intensidad en la CP.

Al igual que en el periodo diurno, LA VARIABLE CON MAYOR INFLUENCIA SOBRE LA T_{si} DE LAS CUBIERTAS EN EL PERIODO NOCTURNO ES LA REFLECTIVIDAD AL VISIBLE, inclusive en la CL.

Al comparar el comportamiento térmico de estas dos cubiertas se ha determinado ciertos rangos de estas dos propiedades que definen la diferencia térmica entre la CL y la CP en el periodo nocturno.

La menor diferencia de la T_{si} entre estas dos cubiertas ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es de -0.8°C , y sólo sucede con valores de reflectividad y emisividad por arriba de 0.90.

En el cuadrante entre 0.70 - 1.00 la diferencia promedio de la T_{si} entre la CL y la CP ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es de -2°C .

En cambio, en el cuadrante entre 0.40 - 0.70 la diferencia promedio entre la CL y la CP ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es de -5°C .

Y, en el cuadrante entre 0.1 - 0.4 la diferencia promedio entre estas dos cubiertas ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es de -8°C .

Debido a la baja masa térmica de la CL, al desaparecer el flujo solar su T_{si} se reduce de manera inmediata casi hasta la T_a , por lo que el incremento de la reflectividad al visible tiene poco impacto en la reducción de la temperatura de esta cubierta.

Además, a causa de las altas temperaturas que tiene el cielo en esta región sumado a la reducción de temperatura que tiene la CL en este periodo, el flujo por radiación entre la cubierta y el cielo no es significativo. Por lo tanto, **el incremento de la emisividad al infrarrojo térmico tampoco tiene una gran repercusión sobre la reducción de la T_{si} de la CL, aun con los valores más altos de esta variable.**

El impacto de la reflectividad al visible y la emisividad al infrarrojo térmico en el periodo nocturno es mucho mayor en la CP que en la CL, sin embargo, debido a la baja masa térmica de la CL su T_{si} se mantiene por debajo de la CP para todos los valores de reflectividad y emisividad analizados.

En cuanto a los resultados en el **DÍA EXTREMO**, **Figura 93**, el comportamiento de la T_{si} de las dos cubiertas es muy similar que en el Día Promedio, por lo que las tendencias vistas en el análisis anterior se repiten en este día.

En el PERIODO DIURNO, debido a la mayor radiación solar en el Día Extremo, el impacto de las variables analizadas se intensifica, al igual que la diferencia de temperatura entre las dos cubiertas. Sin embargo, aún en este día, el uso de valores altos de reflectividad al visible y emisividad al infrarrojo térmico (0.70-1.00) da como resultado una diferencia promedio entre estas dos cubiertas ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) de 2°C.

En el PERIODO NOCTURNO, se mantiene prácticamente el mismo comportamiento que en el Día Promedio, tanto en la CL como en la CP. Por lo tanto, la CL mantiene temperaturas menores que la CP sin importar los valores de reflectividad y emisividad.

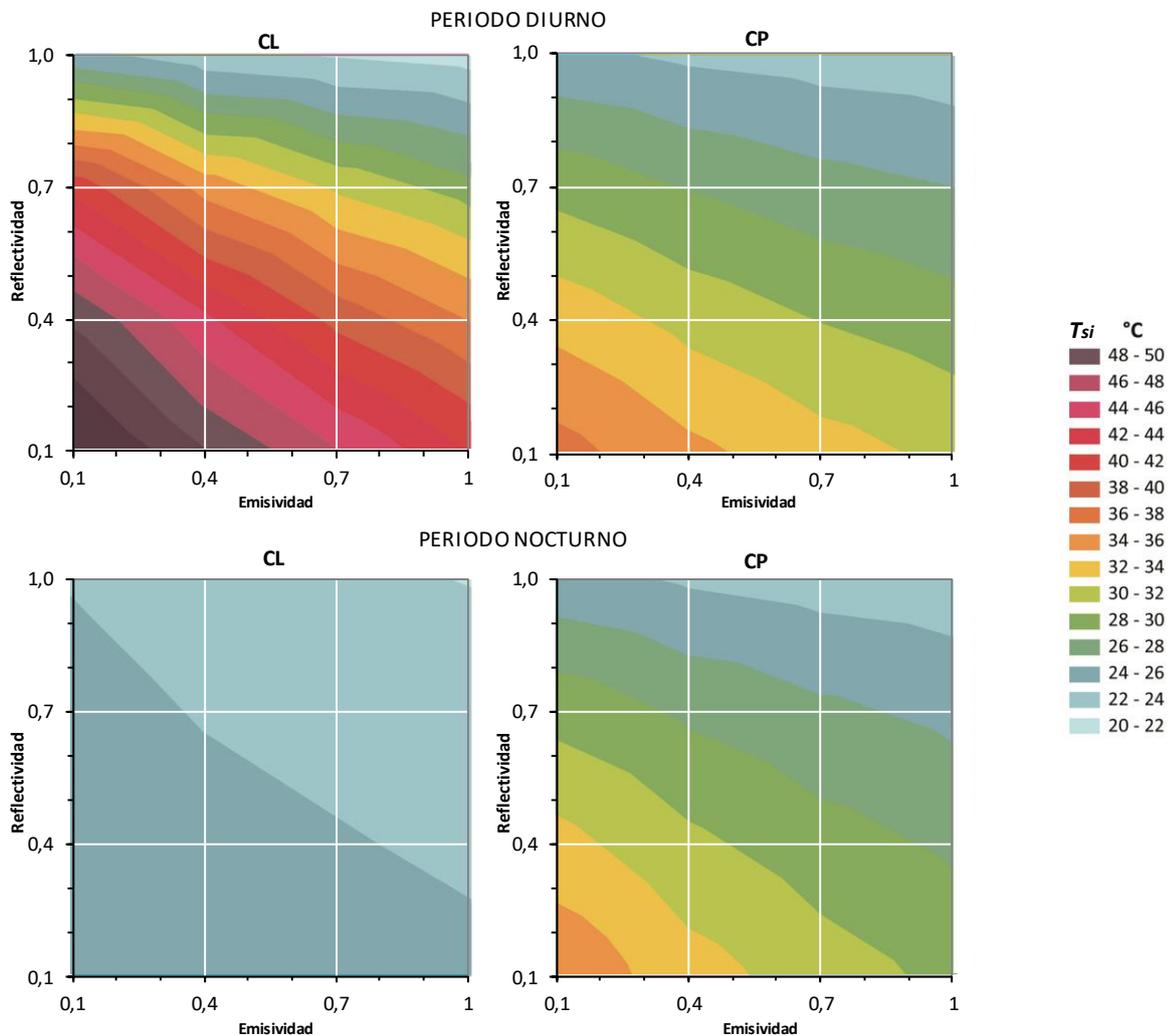


Figura 93 Parametrización de la T_{si} de la CL y la CP en función de la reflectividad al visible y al infrarrojo térmico en el promedio diurno (arriba) y en el periodo nocturno (abajo) del DÍA EXTREMO.

En base al análisis de LA PARAMETRIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CL Y LA CP, se pueden resaltar varios aspectos relevantes.

El factor de **la REFLECTIVIDAD AL VISIBLE es el parámetro radiativo con mayor influencia sobre el comportamiento térmico de la CL y la CP**, tanto en el periodo diurno como en el periodo nocturno.

En el periodo diurno, **las dos cubiertas, con valores de reflectividad al visible y emisividad al infrarrojo térmico por arriba de 0.70, tienen un desempeño térmico muy similar**. Sin embargo, si estas propiedades radiativas se reducen, la CL tiene un incremento de temperatura mayor que la CP.

Por otra parte, en el periodo nocturno, **la CL mantiene temperaturas menores que la CP para cualquier valor de estas dos propiedades radiativas**.

A través del análisis de la parametrización de la T_{si} de las dos cubiertas en función de la reflectividad y la emisividad se han definido ciertos rangos de estas propiedades que definen el comportamiento térmico de estas cubiertas en esta región.

NO OBSTANTE, aunque los resultados térmicos de las cubiertas se basan y han sido validados con mediciones reales, los valores definidos de las propiedades radiativas corresponden a valores impuestos y teóricos. Por lo que, antes de responder el cuestionamiento principal de esta tesis: ¿QUE TIPOLOGÍA DE CUBIERTA, LA CL O LA CP TIENE UN MEJOR DESEMPEÑO TÉRMICO EN ESTA CLIMA?, es necesario saber el comportamiento real de las propiedades radiativas de estas cubiertas.

Por lo tanto, el siguiente apartado se centra en un análisis del comportamiento térmico de diferentes muestras de la cubierta ligera metálica y la cubierta pesada de hormigón con diferentes propiedades radiativas medidas *in situ*.

4.3.2 DESEMPEÑO TÉRMICO DE LAS MUESTRAS MEDIDAS DE LA CL Y LA CP.

Hasta este punto de la investigación, las variables de reflectividad al visible y emisividad al infrarrojo térmico de las dos cubiertas han sido definidas de manera teórica. Para comparar el comportamiento térmico de la CL y la CP en base a condiciones reales, este apartado evalúa varias muestras de estas cubiertas con diferentes propiedades radiativas que han sido medidas *in situ*.

Las propiedades radiativas de todas estas muestras fueron analizadas en capítulos anteriores (ver 3.3.2 PARÁMETROS DE LA CUBIERTA).

Para el análisis térmico de estas muestras se utiliza la parametrización de la T_{si} en el periodo diurno y nocturno, en el Día Extremo.

El análisis de estas muestras se centra en dos grupos. En el primer grupo, se comparan varias muestras de la CL y la CP en su estado actual con varios años de uso, **Tabla 18**. Todas las muestras de las dos cubiertas son comparadas con sus respectivas muestras en su estado original nuevo.

Tabla 18 Reflectividad al visible y Emisividad al infrarrojo térmico de diferentes muestras de la CL y la CP en su estado actual con varios años de uso.

CUBIERTAS	CÓDIGO GRÁFICO	REFLECTIVIDAD (r)	EMISIVIDAD (ε)	Especificación
CL_new	○	0.75	0.13	Estado nuevo
CL_old1	●	0.63	0.26	1 año de uso
CL_old5a	●	0.52	0.30	5-10 años de uso
CL_old5b	●	0.52	0.50	5-10 años de uso
CL_old5c	●	0.60	0.55	5-10 años de uso
CL_old5d	●	0.57	0.65	5-10 años de uso
CP_new	□	0.40	0.90	Estado nuevo
CP_old	■	0.25	0.90	5-10 años de uso

En el segundo grupo se compara el comportamiento de estas cubiertas con varios tipos de recubrimiento de pintura. Todas las muestras de las dos cubiertas son comparadas con sus respectivas muestras en su estado original nuevo.

Tabla 19 Reflectividad al visible y Emisividad al infrarrojo térmico de diferentes muestras de la CL y la CP con diferentes recubrimiento de pintura.

CUBIERTAS	CÓDIGO GRÁFICO	REFLECTIVIDAD (r)	EMISIVIDAD (ε)	Especificación
CL_new	○	0.75	0.13	Estado nuevo
CL_cool	●	0.86	0.90	Pintura cool roof
CL_white	○	0.78	0.95	Pintura blanca
CL_green	●	0.30	0.95	Pintura verde
CP_new	□	0.40	0.90	Estado nuevo
CP_white	□	0.77	0.95	Pintura blanca

MUESTRAS EN SU ESTADO ACTUAL TRAS VARIOS AÑOS DE USO (Día Extremo), **Figura 94**

En cuanto a la CL, en el PERIODO DIURNO, esta cubierta en su estado nuevo (CL_new) tiene una T_{si} de 39°C. La muestra con un año de uso (CL_old1) tiene 40°C. Y, las cubiertas con más de 5 años de uso (CL_old5a, CL_old5b, CL_old5c, CL_old5d) tienen 43°C, 39°C, 36°C y 35°C respectivamente.

En el PERIODO NOCTURNO, todas las muestras tienen una T_{si} alrededor de 24°C. Sin embargo, CL_new, CL_old1, CL_old5a y CL_old5b están por arriba de 24°C. Mientras que, CL_old5c y CL_old5d están por debajo de 24°C.

En cuanto a la CP, en el PERIODO DIURNO, la cubierta en su estado nuevo (CP_new) tiene una T_{si} de 29°C, mientras que la cubierta con varios años de uso (CP_old) tiene 31°C.

En el PERIODO NOCTURNO, la cubierta en su estado nuevo (CP_new) tiene una T_{si} de 28°C, mientras que la cubierta con varios años de uso (CP_old) tiene 29°C.

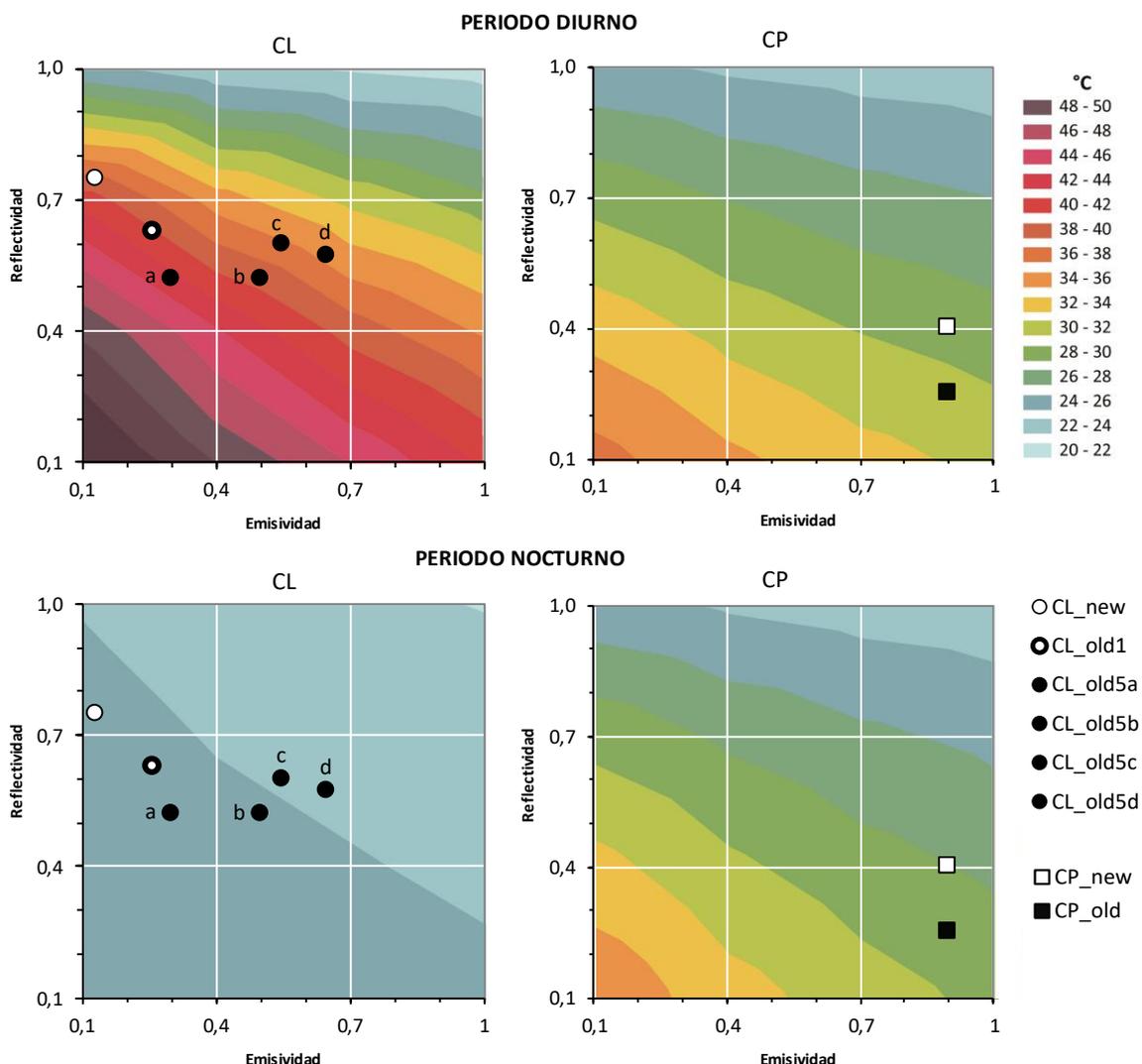


Figura 94 Comportamiento térmico de las muestras de la CL (izquierda) y la CP (derecha) en su estado actual con varios años de uso, en el periodo diurno (arriba) y en el periodo nocturno (abajo). Valores del Día Extremo.

En cuanto a los resultados de la CL, las cubiertas con menores temperaturas son CL_old5c y CL_old5d, dos de las cubiertas con más años de uso. Estas cubiertas tienen una temperatura incluso menor que la CL_new, la muestra en su estado nuevo. En cuanto a CL_old5b, otra de las muestra con más años de uso, tiene la misma temperatura que la CL_new.

Aunque las muestras con más años de uso tienen una reflectividad al visible menor que la de la cubierta en su estado nuevo (CL_new), la emisividad al infrarrojo térmico de estas es mucho más alta. Lo que da como resultado que las temperaturas de estas cubiertas tiendan a ser iguales o menores que la CL_new, tanto en el periodo diurno como en el periodo nocturno.

En el caso de CL_old1 y CL_old5a, la cubierta con un año de uso y una de las cubiertas con más años de uso respectivamente, aunque muestran una mayor T_{si} que la CL_new, estas diferencias no son tan marcadas. En el periodo diurno, la diferencia de temperatura de estas cubiertas con respecto a su estado nuevo es de 1°C y 4°C respectivamente, mientras que en el periodo nocturno esta diferencia es casi nula.

Otra vez, aunque estas cubiertas tienen una reflectividad menor que la CL_new, también tienen una emisividad mayor que esta. Sin embargo, estas cubiertas muestran menores valores de emisividad que las muestras anteriores (CL_old5c, CL_old5d, CL_old5b). Por lo tanto, tienden a tener un ligero incremento de su temperatura con respecto a la CL_new.

Como se ha descrito en capítulos anteriores, debido al paso del tiempo, los materiales tienden a reducir su reflectividad, sin embargo en el caso de la lámina de acero el factor de emisividad también se modifica, pero con un incremento.

En consecuencia, debido a que el efecto del paso del tiempo tiene un mayor impacto sobre el incremento de la emisividad al infrarrojo térmico que en la reducción de la reflectividad al visible, **LAS CUBIERTAS METÁLICAS CON MÁS AÑOS DE USO TIENEN UN DESEMPEÑO TÉRMICO MUY SIMILAR A LAS CUBIERTAS EN SU ESTADO NUEVO**. Incluso, las cubiertas envejecidas pueden tener menores temperaturas que las cubiertas nuevas, en función de su incremento de emisividad.

En cuanto a los resultados de la CP, la cubierta con varios años de uso, CP_old, muestra una T_{si} 2°C y 1°C mayor que la cubierta en su estado nuevo, CP_new, en el periodo diurno y en el periodo nocturno respectivamente.

En el caso de esta cubierta, el efecto del paso del tiempo sólo reduce su reflectividad al visible, de 0.4 a 0.25, mientras que el factor de emisividad al infrarrojo térmico permanece igual. En consecuencia, **LAS CUBIERTAS PESADAS DE HORMIGÓN CON VARIOS AÑOS DE USO SÓLO TIENDEN A INCREMENTAR SU TEMPERATURA CON RESPECTO A LAS CUBIERTAS EN SU ESTADO NUEVO**.

De acuerdo con los resultados en el DÍA EXTREMO, **LA DIFERENCIA TÉRMICA ENTRE UNA CUBIERTA LIVIANA Y UNA CUBIERTA PESADA CON VARIOS AÑOS DE USO ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es de 4°C en el periodo diurno, y -6°C en el periodo nocturno**. Estos resultados se refieren a CL_old5d y a CP_old.

MUESTRAS CON RECUBRIMIENTO DE PINTURA, Figura 95.

En cuanto a la CL, en el PERIODO DIURNO, la muestra pintada de blanco (CL_white) alcanza una temperatura superficial interior (T_{si}) de 27°C, mientras que la cubierta con pintura cool roof (CL_cool) tiene una T_{si} de 26°C, y la cubierta pintada de verde (CL_green) alcanza los 36.5°C. Por último la cubierta en su estado nuevo (CL_new) tiene una T_{si} de 39°C.

En el PERIODO NOCTURNO, CL_white y CL_cool tienen temperaturas casi iguales, cercanas a 22°C, mientras que CL_green y CL_new tienen temperaturas cercanas a 24°C.

En cuanto a la CP, la cubierta pintado de blanco (CP_white) alcanza una T_{si} de 25°C tanto en el día como en la noche. Por otro lado, la cubierta pesada en su estado nuevo tiene una T_{si} de 29°C.

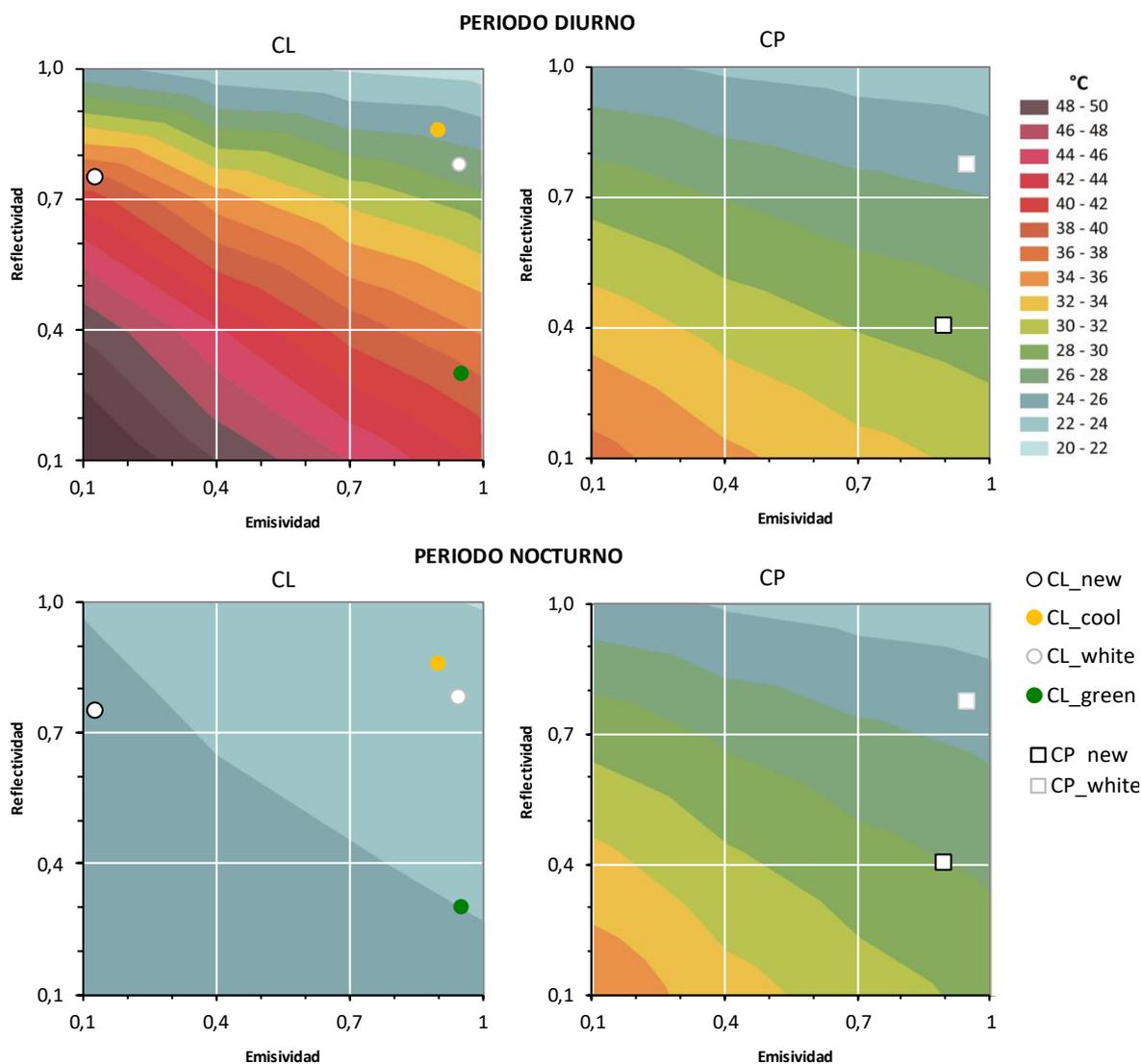


Figura 95 Comportamiento térmico de las muestras de la CL (izquierda) y la CP (derecha) con diferentes recubrimientos de pintura, en el periodo diurno (arriba) y en el periodo nocturno (derecha). Valores del Día Extremo.

De acuerdo con los resultados de la CL, el uso de un recubrimiento de pintura modifica en gran medida las dos propiedades radiativas de esta cubierta, lo cual tiene una alta repercusión sobre la T_{si} de esta cubierta.

El uso de una pintura blanca y una pintura cool roof no representan un gran incremento de la reflectividad al visible con respecto a la CL en su estado nuevo, 0.11 y 0.03 respectivamente. Sin embargo, el incremento de la emisividad al infrarrojo térmico debido al uso de estas pinturas sí es de total relevancia, 0.77 y 0.82 respectivamente. En consecuencia, CL_white muestra una reducción de 12°C y CL_cool de 13°C con respecto a CL_new en el periodo diurno, y una reducción de 2°C para las dos cubiertas en el periodo nocturno.

Por otra parte, el uso de la pintura verde representa una gran reducción de la reflectividad con respecto a la CL en su estado nuevo (0.50), sin embargo, el incremento de su emisividad es mucho mayor (0.82). En consecuencia, CL_green, en el periodo diurno tiene la misma temperatura que CL_new, y en el periodo nocturno una temperatura ligeramente menor.

El mayor impacto que tienen estos recubrimientos sobre la reducción de la T_{si} de la CL se debe al incremento de la emisividad. En consecuencia, el uso de cualquier pintura en la CL tiende a mejorar el desempeño térmico de esta cubierta en comparación a su estado nuevo.

En cuanto a la CP, con el uso de la misma pintura blanca usada en la CL, CP_white muestra una reducción de temperatura de 4°C, en comparación con la muestra en su estado nuevo (CP_new), tanto en el periodo diurno como en el nocturno.

Aunque el uso de esta pintura incrementa la emisividad al infrarrojo de esta cubierta con respecto a su estado nuevo, este incremento es mínimo (de 0.90 a 0.95). Sin embargo, el incremento de la reflectividad al visible es de total relevancia para la reducción de su temperatura (0.40 a 0.77).

De acuerdo a los resultados en el DÍA EXTREMO, la diferencia entre CL_white y CP_white ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es de **0.8°C**, y entre CL_cool y CP_white es de 0°C, en el periodo diurno. Mientras que en el periodo nocturno, tanto la diferencia entre CL_white y CP_ como entre CL_cool y CP_white ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es de **-3°C**.

De acuerdo a los resultados de las muestras medidas de la CL y la CP con diferentes propiedades radiativas nos ha permitido resaltar varios aspectos del comportamiento térmico de estas cubiertas.

En primer lugar, **EL ENVEJECIMIENTO** de cualquier superficie y en especial de la cubierta en climas cálidos tiene un impacto negativo en su desempeño térmico.

En la CP, en efecto, el paso del tiempo incrementa el calentamiento de esta cubierta, debido a que reduce su factor de reflectividad en comparación a sus condiciones en su estado nuevo.

No obstante en la CL, aunque el envejecimiento reduce la capacidad de reflejar la radiación visible de esta superficie, también incrementa su capacidad de emitir radiación en el infrarrojo térmico. Por lo que, en estos climas las cubiertas envejecidas tienden a tener un calentamiento similar o menor a la cubierta en su estado nuevo. Estos resultados ponen en relevancia el incremento del factor de la emisividad sobre la reducción de la T_{si} de la CL.

En segundo lugar, **EL USO DE PINTURAS** representa una gran modificación de las propiedades radiativas de las dos cubiertas.

En el caso de la CP, este recubrimiento sólo tiene un gran impacto en el incremento de la reflectividad al visible.

En el caso de la CL, aunque este recubrimiento puede incrementar ambas propiedades radiativas con respecto a las condiciones en su estado nuevo, el gran impacto sobre la reducción de la T_{si} de esta cubierta se debe al incremento de su emisividad al infrarrojo térmico. Estos resultados nuevamente ponen en relevancia al factor de la emisividad en el comportamiento térmico de la CL.

Aunque en el análisis teórico de la parametrización de estas propiedades radiativas, la variable con mayor impacto sobre la reducción del calentamiento de las cubiertas es la reflectividad al visible, **en el caso de la CL los resultados experimentales resaltan a la EMISIVIDAD AL INFRARROJO como la variable con mayor influencia sobre el comportamiento térmico de esta cubierta.**

FINALMENTE, con el uso del recubrimiento de pinturas sobre las dos cubiertas se han conseguido valores de reflectividad al visible y emisividad al infrarrojo térmico iguales e incluso mayores a los planteados en el análisis teórico del apartado anterior ($r > 0.75$ y $e > 0.90$).

De acuerdo a un análisis tanto teórico como experimental, se ha determinado que una CUBIERTA LIGERA METÁLICA PUEDE TENER EL MISMO COMPORTAMIENTO QUE UNA CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN EN EL PERIODO DIURNO, Y UN MEJOR DESEMPEÑO TÉRMICO EN EL PERIODO NOCTURNO.

Por lo tanto, **ESTA TESIS SOSTIENE QUE UNA CUBIERTA METÁLICA OFRECE UN MEJOR DESEMPEÑO TÉRMICO QUE UNA CUBIERTA DE HORMIGÓN EN EL CLIMA DE LA REGION COSTA DE ECUADOR.**

4.4 SÍNTESIS DE LOS RESULTADOS

– EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CL Y LA CP EN SU ESTADO ORIGINAL.

El primer análisis de las dos cubiertas en su estado original, realizado a través de mediciones en campo, muestra que en el periodo diurno una Cubierta Pesada de Hormigón (CP) ofrece mejores condiciones ambientales en el espacio interior que una Cubierta Ligera Metálica (CL), sin embargo, en el periodo nocturno estos comportamientos se invierten.

Debido a la mayor resistencia y masa térmica de la Cubierta Pesada de Hormigón, en el periodo diurno, esta cubierta mantiene menores temperaturas que la Cubierta Ligera Metálica. Sin embargo, en el periodo nocturno, estas mismas características sumadas a la baja capacidad de enfriamiento del cielo no permiten que la Cubierta de Hormigón reduzca su temperatura tanto como la Cubierta Metálica.

No obstante, la ventaja que tiene la Cubierta de Hormigón en el periodo diurno pesa más que la relevancia de Cubierta Metálica en el periodo nocturno. La sensación de disconfort en el periodo diurno, debido a las altas temperaturas de la Cubierta Metálica, es mayor que el disconfort interior en el periodo nocturno, a causa de las altas temperaturas de la Cubierta de Hormigón. Además, aunque las temperaturas del aire interior promedio (T_{ai}) de los espacios que cubren estas dos cubiertas son similares, la oscilación diaria de la T_{ai} de la Cubierta Metálica (10°C) es mayor que la de la Cubierta de Hormigón (6°C).

Por lo tanto, de acuerdo al análisis de las dos cubiertas en su estado original se ha podido determinar que: LA CUBIERTA QUE OFRECE UN MEJOR DESEMPEÑO TÉRMICO EN ESTA REGIÓN ES LA CUBIERTA DE HORMIGÓN. Esto sustenta que el incremento del uso de las cubiertas de hormigón en estas regiones en efecto tenga un propósito térmico.

– EL IMPACTO DE LAS VARIABLES EN LA CUBIERTA LIGERA METÁLICA Y LA CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN.

De acuerdo a los resultados obtenidos, de manera general se puede afirmar que todas las variables analizadas tienen un mayor impacto en la Cubierta Ligera Metálica que en la Cubierta Pesada de Hormigón. El impacto de cada una de las variables sobre la reducción del calentamiento de las dos cubiertas se detalla a continuación:

Inclinación y Orientación

Aunque en numerosos climas estas dos variables representan una de las estrategias más efectivas en la reducción del sobrecalentamiento de la cubierta, en esta región la inclinación y la orientación tienen una repercusión casi nula sobre la reducción de la Temperatura superficial interior (T_{si}) de la Cubierta Metálica y de la Cubierta de hormigón.

Debido a que en este clima predomina la radiación difusa, a causa de la alta nubosidad del cielo, la radiación recibida por la cubierta no depende de manera principal de los recorridos solares sino del porcentaje de bóveda celeste visto por esta. Esto determina que la inclinación y la orientación tengan una influencia mínima sobre la reducción de la radiación solar recibida. Además, el incremento de la inclinación de la cubierta repercute de manera directa sobre la reducción del SVF, lo que a su vez reduce el flujo de calor emitido hacia el cielo por las cubiertas

Por lo tanto, la baja reducción del flujo solar recibido junto a la reducción de flujo de calor emitido, hacen que la efectividad de estas estrategias sobre la reducción de la T_{si} sea casi nula. Incluso en algunas ocasiones resulta ser negativa, en específico en el periodo nocturno.

Reflectividad al visible.

El incremento de la reflectividad al visible representa una de las estrategias con mayor efectividad sobre la reducción de la T_{si} en la Cubierta Metálica y en la Cubierta de Hormigón en esta región.

En el periodo diurno, la reflectividad tiene un mayor impacto en la Cubierta Metálica que en la Cubierta de Hormigón. Por el contrario, en el periodo nocturno, la repercusión de esta variable es mayor en la Cubierta de Hormigón, mientras que en la Cubierta Metálica esta repercusión es mínima. Debido al almacenamiento de calor de los espacios interiores, y de la propia cubierta, el efecto de la reflectividad también se hace evidente en el periodo nocturno, en especial en la CP.

Es necesario mencionar, dado que el flujo de radiación solar en esta región es menor que en otros climas, la efectividad de esta variable también resulta menor que la que se registra en otros estudios, [Suehrcke, Peterson and Selby, 2008] [Zingre *et al.*, 2014].

Emisividad al infrarrojo térmico.

La estrategia con mayor efectividad sobre la reducción de T_{si} de la Cubierta Metálica, entre las variables analizadas, es el incremento de la emisividad al infrarrojo térmico, tanto en el periodo diurno como en el periodo nocturno.

La baja emisividad de la Cubierta Metálica en su estado original, característica propia de los metales, determina que el flujo de onda larga emitido por esta cubierta sea muy reducido. Por tanto, el incremento de este factor significa un incremento de este flujo y por ende una reducción de la temperatura de esta cubierta, de manera especial en el periodo diurno.

Sin embargo, aunque en el periodo nocturno esta estrategia muestra la mayor eficacia de todas las variables analizadas, la reducción de temperatura no es tan significativa como en el periodo diurno. Este comportamiento se debe a la baja capacidad de enfriamiento del cielo en este periodo y a la baja masa térmica de la Cubierta Metálica, que reduce su temperatura casi hasta la T_a .

En el caso de la Cubierta de Hormigón, dado que ya posee un factor de emisividad al infrarrojo térmico alto, esta estrategia no tiene ninguna repercusión en este análisis.

Doble Capa

La última variable es la adición de una segunda capa a las cubiertas separada por una cámara ventilada. Esta variable tiene una alta repercusión sobre la reducción de T_{si} de la Cubierta Metálica en el periodo diurno. Sin embargo, en el periodo nocturno el efecto de esta doble capa es opuesto, lo que da como resultado un incremento de la T_{si} de esta cubierta en este periodo.

Por otra parte, el impacto de esta variable en la Cubierta de Hormigón representa una reducción casi nula de su T_{si} , tanto en el día como en la noche.

Aunque la adición de una capa a estas cubiertas repercute con una reducción del flujo de calor desde el exterior hacia el interior, el flujo desde el interior hacia el exterior también disminuye. Debido a que en el periodo nocturno, la segunda capa de la cubierta ya no intercambia radiación con el cielo, como sucede con la primera capa, las pérdidas por radiación se reducen. Por tanto, en el caso de la Cubierta Metálica, la T_{si} muestra un incremento, mientras que en la Cubierta de Hormigón, debido a su alta masa térmica, su T_{si} no muestra cambios significativos.

RESULTADOS GENERALES

De acuerdo al análisis de todas estas estrategias, la variable con mayor impacto sobre la reducción de la temperatura superficial interior de la **CUBIERTA LIGERA METÁLICA** es la **EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO**, por arriba de la reflectividad al visible e inclusive del uso de una segunda capa, tanto en el periodo diurno como en el periodo nocturno.

De acuerdo a la efectividad que tienen sobre la reducción de la T_{si} de la Cubierta Metálica, estas estrategias se organizan de la siguiente manera: Emisividad al infrarrojo térmico, Reflectividad al visible, Doble Piel y por último la inclinación y la orientación.

En la CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN, la única variable que tiene una repercusión importante sobre la reducción de su T_{si} es el factor de la **REFLECTIVIDAD AL VISIBLE**, tanto en el periodo diurno como en el periodo nocturno. El resto de variables analizadas no tienen una influencia relevante en la reducción del calentamiento de esta cubierta, e inclusive, la inclinación puede tener una repercusión opuesta.

En base a estos resultados, se ha determinado que en esta región los parámetros con mayor repercusión sobre la reducción de la T_{si} son las propiedades radiativas de las superficies de las cubiertas: la emisividad al infrarrojo térmico para la Cubierta Metálica y la Reflectividad al visible para la Cubierta de Hormigón.

– COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE LA CUBIERTA METÁLICA Y LA CUBIERTA DE HORMIGÓN.

Después de la igualación de las propiedades radiativas de las dos cubiertas: $r=0.75$ y $e=0.90$, se ha determinado que en este clima:

En el periodo diurno una CUBIERTA LIGERA METÁLICA (**CL**), con baja masa y baja resistencia térmica, mantiene un promedio de temperatura casi igual a una CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN (**CP**), con mayor masa y resistencia térmica. Mientras que en el periodo nocturno, la **CUBIERTA LIGERA METÁLICA** mantiene temperaturas menores que la CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN, sin importar sus propiedades radiativas.

Estos resultados se contraponen a los obtenidos en el estudio de [Zingre *et al.*, 2014] en Singapur, donde la cubierta de forjado de hormigón ofrece temperaturas mucho menores que la cubierta metálica tanto en el periodo diurno como en el nocturno, aún con valores de sus propiedades radiativas altos.

Debido a la influencia de la reflectividad al visible y la emisividad al infrarrojo térmico en el comportamiento térmico de las cubiertas, la relevancia de la mayor resistencia térmica de la Cubierta de hormigón sobre la Cubierta Metálica en el periodo diurno queda anulada. En cambio, en el periodo nocturno prevalece la importancia de la baja masa térmica de la Cubierta Metálica. La influencia de este parámetro sobre la liberación de calor en este periodo, predomina sobre todas las estrategias analizadas.

Por último, se ha determinado que, a través de un recubrimiento de pintura, la Cubierta Metálica y la Cubierta de Hormigón pueden alcanzar los valores de reflectividad y emisividad planteados en el análisis teórico, e inclusive más elevados: $r=0.86$ y $e=0.95$, con lo cual los resultados teóricos se validan.

El uso del recubrimiento de pintura representa un mayor impacto en la reducción de la T_{si} de la Cubierta Metálica que en la Cubierta de Hormigón, ya que incrementa su reflectividad al visible y en especial su emisividad al infrarrojo térmico, mientras que en la CP sólo incrementa su reflectividad al visible.

Este análisis experimental nos ha permitido determinar el impacto del paso del tiempo sobre la reducción de la reflectividad al visible de las dos cubiertas. Y aún más importante, este análisis refleja el impacto de esta condicionante sobre el incremento de la emisividad al infrarrojo térmico de la Cubierta Metálica.

Dado que el paso del tiempo tiene un mayor impacto en el aumento de la emisividad al infrarrojo térmico que en la reducción de la reflectividad al visible, las Cubiertas Metálicas con varios años de uso tienden a tener una temperatura similar que en su estado nuevo, y en algunos casos una menor temperatura, en función del incremento de su capacidad de emitir calor. Por otra parte, el impacto del envejecimiento en las Cubiertas de Hormigón sólo tiene un efecto negativo.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

Capítulo 5
CONCLUSIONES



COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

La presente tesis doctoral se ha centrado en el análisis del COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA en las regiones con un clima cálido húmedo cercanas a la latitud 0°. Con este propósito, se ha tomado como clima de referencia a la región Costa del Ecuador.

La tipología urbana predominante en estas regiones son las edificaciones de baja altura. Este hecho sumado a la alta y constante radiación solar, característica predominante en estas latitudes, determina que LA CUBIERTA ES LA PRINCIPAL FUENTE DE GANANCIAS DE CALOR EN EL INTERIOR DE LAS VIVIENDAS.

En las últimas décadas, la Región Costa del Ecuador ha experimentado un cambio significativo en el uso de los materiales de cubiertas, de ligeros a pesados. Los datos censales muestran un incremento del uso de las cubiertas pesadas de hormigón 4 veces mayor que el incremento del uso de las cubiertas ligeras metálicas. Este incremento de las cubiertas de hormigón corresponde a edificaciones nuevas como a la sustitución de las cubiertas ligeras metálicas en edificaciones ya construidas.

Esta sustitución “parece ser” que se debe a que las cubiertas de hormigón ofrecen mejores condiciones ambientales que las cubiertas metálicas, y por ende una menor demanda energética. Sin embargo, estas cubiertas tienen un mayor costo de inversión para el usuario, y además, y muy importante, tienen una mayor energía incorporada.

El comportamiento térmico de la cubierta, además de estar condicionado por el flujo de radiación solar, depende de las características de la bóveda celeste. Dentro de estas características, LA NUBOSIDAD DEL CIELO juega un papel fundamental sobre las condiciones climáticas de una región. Por tanto, la presencia o ausencia de este factor puede modificar de manera sustancial el desempeño térmico de la cubierta.

En las regiones cercanas al Ecuador, la alta nubosidad del cielo es un factor predominante a lo largo de todo el año. Aunque con frecuencia no es considerado en los análisis energéticos de las edificaciones, esta variable climática resulta esencial para la evaluación del desempeño térmico de la cubierta metálica y la cubierta de hormigón en esta región.

En base a lo expuesto, el objetivo general de esta investigación ha sido analizar y comparar el desempeño térmico de estas dos cubiertas, con el fin de responder a la pregunta: ¿QUE TIPOLOGÍA DE CUBIERTA TIENE UN MEJOR DESEMPEÑO TÉRMICO EN EL CLIMA DE LA REGIÓN COSTA DE ECUADOR, LA LIGERA METÁLICA O LA PESADA DE HORMIGÓN?

Para alcanzar el objetivo general de esta tesis, se han abordado dos objetivos específicos. En primer lugar, esta investigación se centra en determinar ¿cuál de las condicionantes climáticas de esta región tiene la mayor influencia sobre el comportamiento térmico de las cubiertas?

Y por último, se ha analizado y valorado la eficacia de diferentes variables sobre la reducción de la temperatura de cada una de las cubiertas.

5.1 CONCLUSIONES FINALES

Conforme a todo lo expuesto en esta tesis, se pueden extraer las siguientes conclusiones finales:

– LA ALTA NUBOSIDAD DEL CIELO ES EL FACTOR CON MAYOR INFLUENCIA EN EL BALANCE ENERGÉTICO DEL CLIMA DE LA REGIÓN COSTA DEL ECUADOR, y por tanto del comportamiento térmico de la cubierta.

De acuerdo a las mediciones de las condiciones climáticas de esta región realizadas *in situ*, se ha determinado que este factor climático influye con una reducción promedio anual del 50% de la radiación solar recibida en las cubiertas, así como una reducción del 17% de la capacidad de enfriamiento, en comparación con las condiciones de un cielo despejado.

Por tanto, la nubosidad del cielo influye de manera determinante sobre el desempeño térmico de las variables de las cubiertas, con lo cual la efectividad de ciertas estrategias quedan anuladas en este clima, como: la inclinación, orientación y resistencia térmica.

– LOS PARÁMETROS MÁS RELEVANTES SOBRE LA REDUCCIÓN DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR DE LAS CUBIERTAS ANALIZADAS SON SUS PROPIEDADES RADIATIVAS: la emisividad al infrarrojo térmico en el caso de la cubierta ligera metálica (CL) y la reflectividad al visible para la cubierta pesada de hormigón (CP).

De manera frecuente la reflectividad al visible de la cubierta (o de cualquier elemento de la envolvente) resalta como una de las estrategias más efectivas sobre la reducción del sobrecalentamiento interior. Sin embargo, la capacidad de reflejar la radiación solar de los materiales y en especial de la cubierta disminuye con el paso del tiempo. Sumado a esto, dado que en esta región la radiación solar no es extrema y la capacidad de enfriamiento del cielo es baja, la importancia de la reflectividad queda en un segundo plano.

Bajo este contexto, esta tesis soporta que la ALTA EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO de manera conjunta con la BAJA MASA TÉRMICA de los materiales son los FACTORES PRIMORDIALES a considerar en esta región, en busca de reducir el calentamiento de la cubierta y por ende el discomfort interior de las viviendas en estos climas.

– Por último, UNA CUBIERTA LIGERA METÁLICA CON VALORES DE EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO Y REFLECTIVIDAD AL VISIBLE POR ARRIBA DE 0.70 TIENE UN MEJOR DESEMPEÑO TÉRMICO QUE LA CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN con las mismas propiedades radiativas y con una mayor resistencia térmica.

En el periodo nocturno, la cubierta ligera metálica tiene una menor temperatura interior que la cubierta de hormigón sin importar sus propiedades radiativas, no obstante, a pesar de lo que comúnmente se cree, durante el día la cubierta metálica tiene una temperatura interior casi igual a la de la cubierta de losa de hormigón, dado el incremento de la reflectividad al visible y en especial al incremento de la emisividad al infrarrojo térmico aportado por el uso de pinturas adecuadas.

En consecuencia, las CUBIERTAS METÁLICAS en esta región, además de que requieren un menor costo de instalación y tienen una menor energía incorporada que la Cubierta de hormigón, también ofrecen mejores condiciones de confort interior y por ende una menor demanda energética de refrigeración.

En conclusión, esta tesis sostiene que **la CUBIERTA LIGERA METÁLICA presenta mayores ventajas que la Cubierta de hormigón, tanto en el aspecto térmico, energético, económico y medio ambiental.**

5.2 INVESTIGACIONES FUTURAS.

A lo largo de esta investigación se ha resaltado la importancia de la adecuada elección de los materiales de la cubierta y en especial de sus propiedades radiativas, en el confort interior de las viviendas en un clima cálido húmedo. Además, esta tesis enfatiza la relación de estas propiedades radiativas con las características térmicas del cielo de esta región.

Los resultados y conclusiones descritas en esta tesis pretenden servir como lineamientos para el arquitecto, constructor o usuario, con el fin de evitar el sobrecalentamiento interior de las viviendas en la Región Costa del Ecuador.

Los aportes entregados pueden tener un gran impacto en el campo energético y económico de este país, dado que el clima de análisis corresponde a la región más poblada del Ecuador y la de mayor consumo energético.

No obstante, existe otra región natural del Ecuador que no ha sido abordada en esta tesis: la Sierra. Esta región es la responsable del segundo mayor consumo energético del Ecuador, y nuevamente, las tipologías de cubiertas más usadas son las metálicas y las losas de hormigón. Sin embargo, la Región Sierra, ubicada entre 750 a 6.000 msnm, posee un clima totalmente opuesto al de la Región Costa.

Dentro de este marco, las líneas futuras de investigación pretenden abordar el comportamiento térmico de la cubierta ligera metálica y la cubierta pesada de hormigón, con un enfoque especial en sus propiedades radiativas, en el clima de la Región Sierra del Ecuador. Este clima se caracteriza por sus temperaturas bajas, baja humedad, alta radiación solar y una alta capacidad de enfriamiento del cielo.

Tanto los resultados de estas tesis como los planteados para futuras investigaciones, tienen el objetivo de profundizar la relación entre las propiedades radiativas y térmicas de la cubierta con los flujos de radiación solar y onda larga del cielo de cada región. La visión general del autor es extrapolar dichos resultados a diferentes regiones y latitudes.

Chapter 5
CONCLUSIONS



COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

The present doctoral thesis has focused on the assessment of ROOF THERMAL BEHAVIOR in the regions with a warm and humid climate near latitude 0°. For this purpose, the Costa region of Ecuador has been taken as a reference climate.

The predominant urban typology in these regions are low-rise buildings. This fact added to the high and constant solar radiation, a predominant characteristic in these latitudes, determines that THE ROOF IS THE MAIN SOURCE OF HEAT GAINS IN THE INTERIOR OF RESIDENTIAL BUILDINGS.

In the last decades, the Costa Region of Ecuador has experienced a significant change in the use of roofing materials, from light to heavy. The census data show an increase in the use of heavy concrete roofs 4 times greater than the increase in the use of metal light roofs. This increase in concrete roofs corresponds to new buildings as well as the replacement of metal light roofs in buildings already built.

This substitution "seems to be" due to the fact that concrete roofs offer better environmental conditions than metal roofs, and thereby, a lower energy demand. However, the concrete roofs have a higher investment cost for the user, and in addition, and very important, they have a higher embodied energy than metal light roofs.

The roof thermal behaviour, in addition to being conditioned by the flux of solar radiation, depends on the characteristics of the sky vault. Within these characteristics, THE CLOUD COVER plays a fundamental role on the climatic conditions of a region. Therefore, the presence or absence of this factor can substantially modify the thermal performance of the roof.

In the regions near the Equator, the high cloudiness of the sky is a predominant factor throughout the year. Although it is often not considered in the energy analysis of buildings, this climatic variable is essential for the evaluation of the thermal performance of the metal roof and the concrete roof in this region.

Based on the above, the general objective of this research has been to analyse and compare the thermal behaviour of these two roofs, in order to answer the question: **WHAT ROOF TIPOLOGY HAS A BETTER THERMAL PERFORMANCE IN THE CLIMATE OF THE COAST REGION OF ECUADOR, THE LIGHT METAL ROOF OR THE HEAVY CONCRETE ROOF?**

To achieve the general objective of this thesis, two specific objectives have been addressed. In the first place, this research focuses on determining: which of the climatic conditions of this region has the greatest influence on the thermal behaviour of these roofs?

And finally, the effectiveness of different variables on the reduction of the temperature of each one of the roofs has been analysed and evaluated.

5.3 FINAL CONCLUSIONS

In accordance with all that has been stated in this thesis, the following final conclusions can be drawn:

- THE HIGH CLOUD COVER OF THE SKY IS THE FACTOR WITH THE HIGHEST INFLUENCE ON THE ENERGY BALANCE OF THE CLIMATE OF THE ECUADOR COSTA REGION, and therefore on the thermal behaviour of the roof.

According to the measurements of the climatic conditions of this region made *in situ*, it has been determined that this climatic factor influences with an average annual reduction of 50% of the solar radiation received in the roofs, as well as a reduction of 17% of the cooling capacity, compared to the conditions of a clear sky.

Therefore, the cloudiness of the sky has a decisive influence on the thermal performance of the roofs variables, with which the effectiveness of certain strategies are cancelled in this climate, such as: inclination, orientation and thermal resistance.h

- THE MOST RELEVANT PARAMETERS ON THE REDUCTION OF THE INTERIOR SURFACE TEMPERATURE OF THE ANALYZED ROOFS ARE THEIR RADIATIVE PROPERTIES: the thermal infrared emissivity in the case of the metal light roof and the visible reflectivity for the heavy concrete ROOF.

Frequently, the visible reflectivity of the roof (or any element of the envelope) stands out as one of the most effective strategies for reducing internal overheating. However, the ability to reflect the solar radiation of materials and especially the roof decreases with the passage of time. Added to this, since in this region the solar radiation is not extreme and the cooling capacity of the sky is low, the importance of the reflectivity remains in the background.

In this context, this thesis supports that the HIGH EMISSIVITY TO THE THERMAL INFRARED together with the LOW THERMAL MASS of the materials are the PRIMARY FACTORS to be considered in this region, in order to reduce the heating of the roof and therefore the inner discomfort of the houses in these climates.

- Finally, A METAL LIGHT ROOF WITH EMISSIVITY VALUES TO THE THERMAL INFRARED AND REFLECTIVITY TO THE VISIBLE ABOVE 0.70 HAS A BETTER THERMAL PERFORMANCE THAN THE HEAVY CONCRETE COVER with the same radiative properties and with a higher thermal resistance.

In the night period, the light metal roof has a lower indoor temperature than the concrete roof regardless of its radiative properties, however, despite what is commonly believed, during the day the metal roof has an indoor temperature almost equal to that of the concrete slab roof, given the

increase of the reflectivity to the visible and in particular to the increase of the thermal infrared emissivity contributed by the use of suitable paints.

Consequently, the METAL ROOFS in this region, in addition to requiring a lower installation cost and have a lower built-in energy than the concrete roof, also offer better indoor comfort conditions and therefore a lower energy demand for cooling.

In conclusion, this thesis maintains that **the METAL LIGHT ROOF has greater advantages than the concrete roof, both in the thermal, energy, economic and environmental aspects.**

5.4 FUTURE INVESTIGATIONS.

Throughout this research the importance of the adequate choice of roofing materials and especially their radiative properties, in the interior comfort of homes in a warm-humid climate has been highlighted. In addition, this thesis emphasizes the relationship of these radiative properties with the thermal characteristics of the sky in this region.

The results and conclusions described in this thesis are intended to serve as guidelines for the architect, building manager or user, in order to avoid internal overheating of homes in the Coast Region of Ecuador.

The contributions delivered can have a great impact in the energy and economic field of this country, given that the analysis climate corresponds to the most populated region of Ecuador and the one with the highest energy consumption.

However, there is another natural region of Ecuador that has not been addressed in this thesis: the Sierra. This region is responsible for the second largest energy consumption in Ecuador, and again, the most commonly used types of roofs are metal and concrete slabs. However, the Sierra Region, located between 750 and 6000 meters above sea level, has a climate totally opposite to the Coast Region.

Within this framework, the future lines of research aim to address the thermal behaviour of the light metal roof and the heavy concrete roof, with a special focus on its radiative properties, in the climate of the Sierra Region of Ecuador. This climate is characterized by its low temperatures, low humidity, high solar radiation and a high cooling capacity of the sky.

Both the results of this thesis and those proposed for future research are aimed at deepening the relationship between the radiative and thermal properties of the roof with the solar radiation and long wave radiation of the sky of each region. The general vision of the author is to extrapolate these results to different regions and latitudes.

ANEXOS

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

ANEXO 1

LA CUBIERTA EN ECUADOR

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

A1.1 LA CUBIERTA EN EL CONTEXTO URBANO DE ECUADOR

La trama urbana que se ha implementado en las ciudades de la Costa del Ecuador, se caracteriza por viviendas adosadas en manzanas rectangulares de 40m x 100m aproximadamente. Estas manzanas han sido divididas en lotes de 10m de frente y 20 de fondo. La **Figura 96** muestra las diferentes tramas de la ciudad de Santa rosa y la ciudad de Machala. Estas imágenes muestran zonas donde la cubierta ligera metálica es predominante, sin embargo también existen zonas enteras de las ciudades donde predominan el concreto, el fibrocemento y hasta la teja.

Figura 96 Tramas urbanas de las ciudades de la Costa del Ecuador (Machala y Santa Rosa-El Oro Ecuador). Imágenes tomadas de google earth (las imágenes están orientadas al norte)



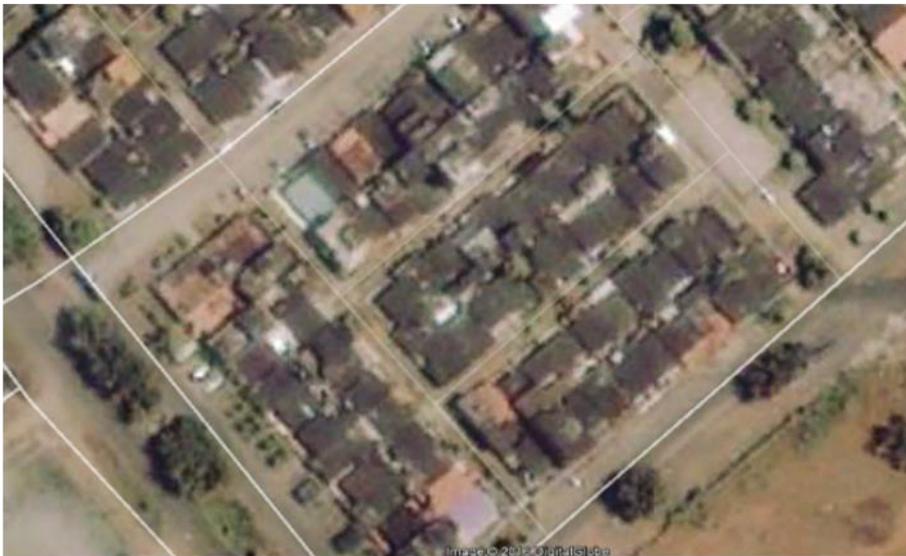
Trama Urbana del caso de análisis de la cubierta pesada. (Santa Rosa)



Trama urbana del caso de análisis de la cubierta liviana. (Santa Rosa)



Zonas urbanas con predominancia de las cubiertas metálicas (Machala)



Zonas urbanas con la predominancia de cubiertas de concreto y fibrocemento. (Machala)



Viviendas con cubiertas de teja. (Machala)

Otra característica del contexto urbano de esta región, son sus viviendas de baja altura. La **Figura 97** muestra diferentes tipologías de viviendas en la ciudad de Santa Rosa-El Oro-Ecuador. Las viviendas por lo general no sobrepasan los dos pisos de altura, y su cañón urbano tiene una relación altura/ancho de 0.25 aproximadamente, con viviendas entre 3 m de altura y calles de 12 m. Estas imágenes muestran también, las dos tipologías de cubierta predominantes de la región: la cubierta metálica y la cubierta de hormigón. Los dos tipos de cubiertas se usan tanto en viviendas de un piso como de dos pisos de altura.

Figura 97 Tipologías de viviendas en la Región Costa del Ecuador.



Viviendas de dos pisos, cubierta de concreto y metálica



Viviendas de un piso, cubierta de concreto.



Viviendas de uno y dos pisos, cubierta de concreto y metal



Viviendas de uno y dos pisos, cubierta de concreto y metal.



Vivienda de un piso, cubierta de concreto.



Vivienda de un piso, cubierta de metal.

A1.2 CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS Y ENERGÉTICAS DE LA CL Y LA CP

LA CUBIERTA LIGERA METÁLICA

La cubierta ligera metálica con frecuencia esta soportada por una estructura metálica, aunque en algunas ocasiones se soporta por estructuras de madera. Tanto el cálculo económico y de energía incorporada lo haremos con la primera opción.

La estructura metálica compuesta de vigas principales colocadas cada 4 m, y unas apoyos transversales cada 1.2 m. Las láminas de acero están sujetadas a la estructura con pernos de fijación (tipo J).

Con frecuencia el dimensionamiento de las vigas es una caja metálica cuadrada de 100x100 mm de 2 mm de espesor, y los apoyos transversales son perfiles metálicos G de 80x40x15 mm por 2 mm de espesor.

Como ya se ha mencionado la cubierta ligera metálica utilizada es una lámina de acero de 0.3 mm de espesor, con un recubrimiento de zinc o una aleación de aluminio y zinc (55%-45%). Las planchas metálicas tienen un dimensionamiento de 6m de longitud por 0.90 m de ancho útil, **Figura 98**.

El peso de esta lámina de acero es de 2.6 kg/m² [NOVACERO, 2016].

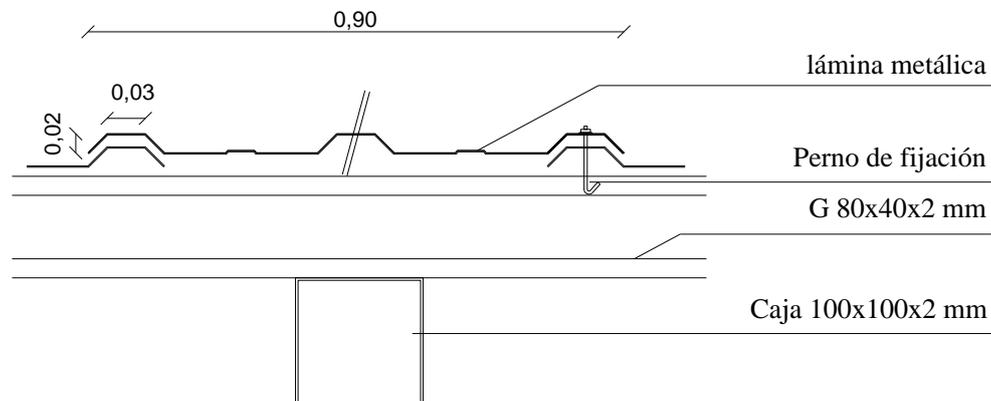


Figura 98 Detalle de instalación de la cubierta ligera metálica, de acuerdo a los sistemas constructivos de la zona de análisis.

LA CUBERTA PESADA DE LOSA DE HORMIGÓN

La cubierta de losa de hormigón tiene un espesor de 22 cm y un peso aproximado de 2000 kg/m³, y está compuesta por una chapa de hormigón de 5 cm, bloque aligerado de piedra pómez de 15 cm.

Además, esta cubierta cuenta con una malla electro-soldada (r-183) en la chapa de hormigón de 5 cm, y refuerzos inferiores en cada nervio (varilla corrugada de 12 mm).

Con frecuencia, la estructura principal cuenta con una viga de 6 varillas de hierro de 12 mm de diámetro, y de manera frecuente se utiliza luces de 4m.

Por último, dado que estas cubiertas no suelen tener cielo raso, las instalaciones van embebidas en la losa y la parte inferior de esta cuenta con un enlucido de mortero de cemento de 2cm de espesor, **Figura 99.**

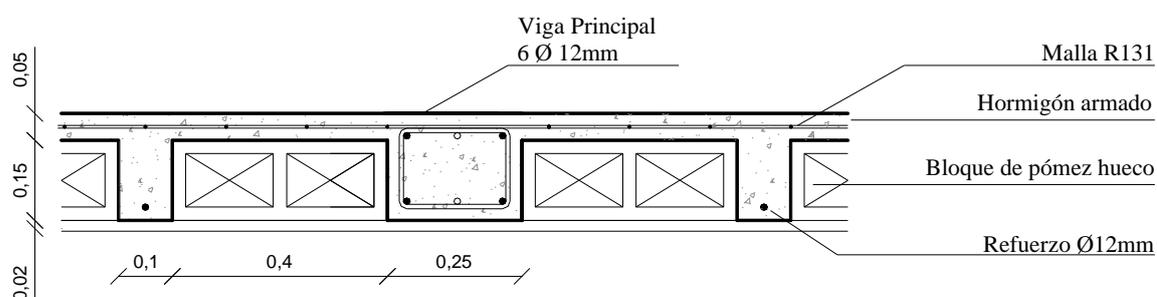


Figura 99 Detalle de construcción de la cubierta de losa de hormigón, de acuerdo a los sistemas constructivos de la zona de análisis.

A1.2.1 CÁLCULO ECONÓMICO DE INSTALACIÓN Y CONTRUCCIÓN DE UNA CL Y UNA CP

A continuación se presentan los cálculos detallados del costo de instalación de la CL y el costo de construcción de una CP. Los cálculos han sido realizados en base a los sistemas constructivos de la región Costa del Ecuador (dimensionamiento y materiales), ya mencionados en los párrafos anteriores. Los rubros para el cálculo del costo de cada cubierta han sido tomados del listado de precios unitarios de la cámara de la construcción, [CCE(Cámara de la Construcción de Ecuador), 2014].

LA CUBERTA LIGERA METÁLICA

El costo de instalación de 1 m² de una cubierta metálica se ha calculado a partir de los resultados totales de una cubierta de 130 m² instalada en una vivienda de la región de análisis, **Tabla 20**.

Tabla 20 Cálculo del costo de construcción de 1m² de una CUBIERTA LIGERA METÁLICA

ÁREA CUBIERTA		130 m ²		COSTO(dólares)			
		PESO TOTAL (130 M2)		Costo/u	Costo	Costo/m ²	Costo
		Unidad	kg	nidad	Total		Total x
							1m ² CL
ESTRUCTURA	VIGA PRINCIPAL 75x75x2	kg	238,205	3,15	750	5,8	23,9
	CORREAS 40x80x15x2	kg	258,54	3,15	814	6,3	
LÁMINA DE ACERO	0,3mm	m ²	312	4,95	1544	11,9	

Datos calculado a partir de una cubierta METÁLICA modelo de esta región.

LA CUBERTA PESADA DE HORMIGÓN

El costo de construcción de 1 m² de una cubierta de losa de hormigón se ha calculado a partir de los resultados totales de una cubierta de 90 m² construida en una vivienda de la región de análisis, **Tabla 21**.

Tabla 21 Cálculo del costo de construcción de 1m² de una CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN

ÁREA CUBIERTA		90 m ²		COSTO(dólares)			
		Unidad	Cantidad	Costo/	Costo	Costo/m ²	Costo Total
				unidad	Total		x 1m ² CP
HORMIGÓN (incluido encofrado)	m ³	13	175,77	2285,01	25,4	74,7	
BLOQUES	U	530	0,85	450,5	5,0		
HIERRO	kg	1556	2,35	3656,6	40,6		
ENLUCIDO	m ³	1,8	6,13	0,6	3,678		

Datos calculado a partir de una cubierta de LOSA de HORMIGÓN modelo de esta región.

A1.2.2 CÁLCULO DE ENERGÍA INCORPORADA DE LA CL Y LA CP

A continuación se presentan los cálculos detallados de la energía incorporada de la CL y la CP. Los cálculos han sido realizados en base a los sistemas constructivos de la región Costa del Ecuador (dimensionamiento y materiales), ya mencionados en los párrafos anteriores. Los valores de energía incorporada de cada material han sido obtenidos de [Cabeza *et al.*, 2013][Pagés-Ramon, 2014][Chastas, Theodosiou and Bikas, 2016]

LA CUBERTA LIGERA METÁLICA

Los cálculos de la energía incorporada de 1 m² de una cubierta metálica se han realizado a partir de los resultados totales de una cubierta de 130 m² instalada en una vivienda de la región de análisis, **Tabla 22**.

Tabla 22 Cálculo de la energía incorporada de 1m² de una CUBIERTA LIGERA METÁLICA

ÁREA CUBIERTA		130			ENERGÍA INCORPORADA			
		PESO TOTAL (130 M2)			ENERGÍA INCORPORADA			
		m	kg/m	kg	MJ/kg	MJ	MJ/m ²	MJ X 1m ² CL
ESTRUCTURA	VIGA PRINCIPAL 75x75x2	35,5	6,71	238,205	35	8337	64,1	227,3
	CORREAS 40x80x15x2	93	2,78	258,54	35	9049	69,6	
LÁMINA DE ACERO	3mm			312	39	12168	93,6	

Datos calculado a partir de una cubierta METÁLICA modelo de esta región.

LA CUBERTA PESADA DE HORMIGÓN

Los cálculos de la energía incorporada de 1 m² de una cubierta de losa de hormigón se han realizado a partir de los resultados totales de una cubierta de 90 m² construida en una vivienda de la región de análisis, **Tabla 23**.

Tabla 23 Cálculo de la energía incorporada de 1m² de una CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN.

ÁREA CUBIERTA		90		ENERGÍA INCORPORADA			
		PESO TOTAL (90m2)		ENERGÍA INCORPORADA			
		Cantidad	kg	MJ/kg	MJ	MJ/m ²	MJ x 1 m ² CP
HORMIGÓN (m3)	13	26000	0,6	15600	173,3333	871	
BLOQUES (u)	530	4240	1,5	6360	70,66667		
HIERRO (Kg)	1452	1556	35	54460	605,1111		
MORTERO (m3)	1,8	3240	0,6	1944	21,6		

Datos calculado a partir de una cubierta de LOSA de HORMIGÓN modelo de esta región.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

ANEXO 2:
MEDICIONES

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

A2.1 FACTORES CLIMÁTICOS

Este apartado se centra en la obtención de los datos climáticos de la ciudad de análisis (Santa Rosa – El Oro – Ecuador), los cuales han sido utilizados como datos de entrada para el archivo climático (EPW) de las simulaciones.

Los datos climáticos recolectados han sido: la temperatura del aire, °C (T_a); humedad, % (H); temperatura del rocío, °C (T_{dp}); presión atmosférica, Pa (Pa); velocidad del viento, m/s (v); dirección del viento, ° (dv); radiación solar global, W/m² (RS); y además dos parámetros adicionales han sido medidos por el autor: la cobertura del cielo, décimas (cloud cover); y la temperatura del cielo, °C (T_{sky}).

Todos los datos fueron recolectados durante todo el año 2016. La cobertura del cielo y la temperatura del cielo (T_{sky}) fueron medidos durante una semana del mes de octubre (06-12) y del mes de diciembre (04-10).

A través del análisis de todos los datos recolectados, se han definido las condiciones climáticas los días tipo de análisis: Día Promedio y Día Extremo.

En los siguientes apartados se detalla el proceso de medición y los valores de los datos climáticos medidos. Además se muestra el análisis realizado para definir el Día Tipo Promedio y el Día Tipo Extremo.

A2.1.1 PROCESO DE MEDICIÓN

– TEMPERATURAS, HUMEDAD, VIENTOS, PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y PRECIPITACIONES.

La información de todos estos parámetros se ha recolectado de los datos medidos de la estación meteorológica del aeropuerto Víctor Larrea de la ciudad de Santa Rosa ($3^{\circ}26'39''S$, $79^{\circ}59'38''O$), ubicado a 5 km de la ciudad de Santa Rosa. Esta información ha sido obtenida por medio de la plataforma online Wunderground, [WeatherCompanyLLC, 2016a]. Todos estos datos han sido recogidos durante todo el año 2016.

– RADIACIÓN SOLAR

La información de este parámetro se ha recolectado de la estación meteorológica ID: IELOROEL2 localizada a 15 km de la ciudad de Santa Rosa (El Cambio), a una latitud de $-3^{\circ}18'3''$, longitud de $-79^{\circ}53'53''$, y una altitud de 20 msnm. Esta información ha sido obtenida por medio de la plataforma online Wunderground, [WeatherCompanyLLC, 2016b]. Todos estos datos han sido recolectados durante todo el año 2016 en intervalos de 15min.

La radiación solar medida ha sido comparada con los datos generados por simulación (software Heliodon) [Beckers and Masset, 2003] y los valores obtenidos del atlas solar del Ecuador [Conelec, 2008].

– COBERTURA Y TEMPERATURA DEL CIELO.

Para una propia caracterización de la radiación solar y la radiación emitida por el cielo, la cobertura y la temperatura del cielo son parámetros indispensables para este análisis. Dado que son factores poco evaluados, la información disponible en esta región de estos parámetros es casi inexistente.

En cuanto al porcentaje de cobertura de cielo, la información cuantitativa disponible son sólo promedios trimestrales [EOSDIS, 2018] o mensuales [Wilson and Jetz, 2016]. Aunque ciertas estaciones meteorológicas ofrezcan información horaria de este parámetro son sólo aproximaciones cualitativas (despejado, poco nublado, nublado y muy nublado). Mientras que la información de la temperatura del cielo en esta región es inexistente. De acuerdo a la bibliografía revisada, la obtención de este parámetro casi siempre es obtenida por aproximaciones matemáticas.

Bajo estas circunstancias se planteó desarrollar una campaña de medición *in situ* que nos permita caracterizar estos parámetros durante periodos diarios y horarios. Los procedimientos utilizados se basaron en estudios previos realizados en otras regiones, [Wacker *et al.*, 2015][Luiz *et al.*, 2018][Metoffice, 2015].

Las mediciones fueron realizadas durante una semana del mes de octubre, del 06 al 12 de octubre de 2016, con un intervalo de horas, tanto en el periodo diurno como en el nocturno. Además, otras mediciones se realizaron del 04 al 10 de diciembre de 2016, para tener una mayor muestra de los resultados y corroborar estas mediciones.

COBERTURA DEL CIELO

La medición de la cobertura del cielo se llevó a cabo a través del método de la observación. El procedimiento utilizado consiste en dividir la bóveda celeste en 4 cuadrantes iguales, con el uso de dos ejes: norte-sur y este-oeste. De cada uno de estos cuadrantes se estimó el porcentaje de cielo cubierto por nubes. Finalmente se realizó el promedio total y se recopiló los datos en la unidad de décimas, magnitud que utiliza el archivo climático. Este proceso fue apoyado con una base fotográfica realizada simultáneamente, **Figura 100** y **Figura 101**.

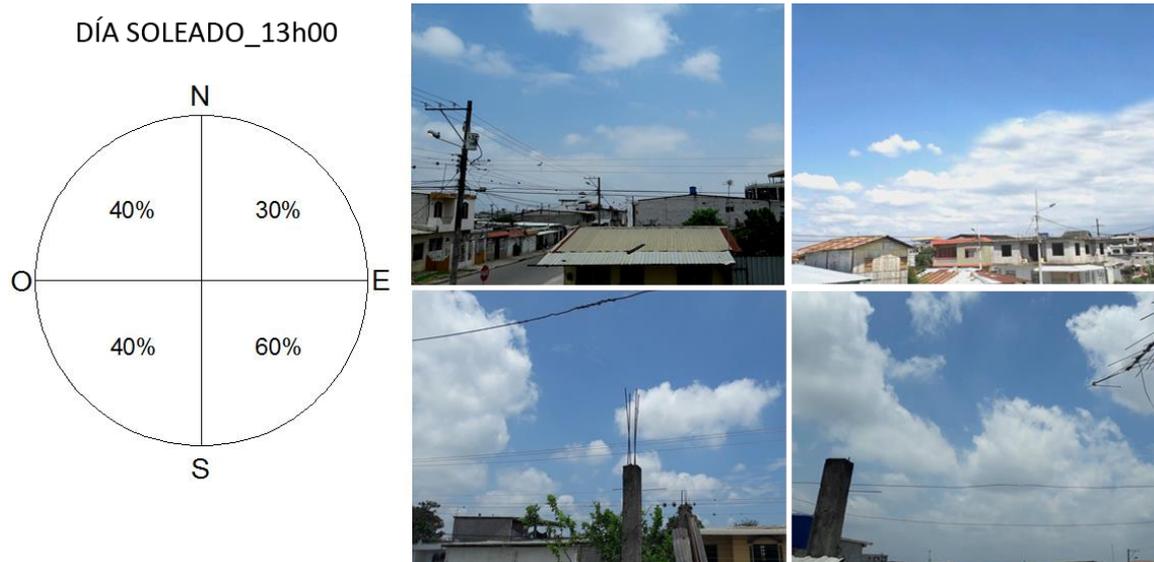


Figura 100 Proceso de medición de la cobertura de cielo en un día con radiación solar diaria de 4.5 kWh/m², 13h00 (10 de Octubre), valor 4/10.



Figura 101 Proceso de medición de la cobertura de cielo en un día con radiación solar diaria de 4.45 kWh/m², 16h00 (10 de Octubre), valor 9/10.

TEMPERATURA DEL CIELO

Para la medición de la temperatura del cielo se dividió la bóveda celeste en dos partes iguales. En sección se tomó un ángulo de 45°, dividiendo a la bóveda en una porción pegada al horizonte y la otra al cénit, **Figura 102**.

Dado que las temperaturas de la bóveda celeste tienen una distribución anisotrópica, el proceso de medición de este parámetro pretende dar un promedio de temperatura que describa esta característica, en función del rango de temperaturas entre el horizonte y el cenit.

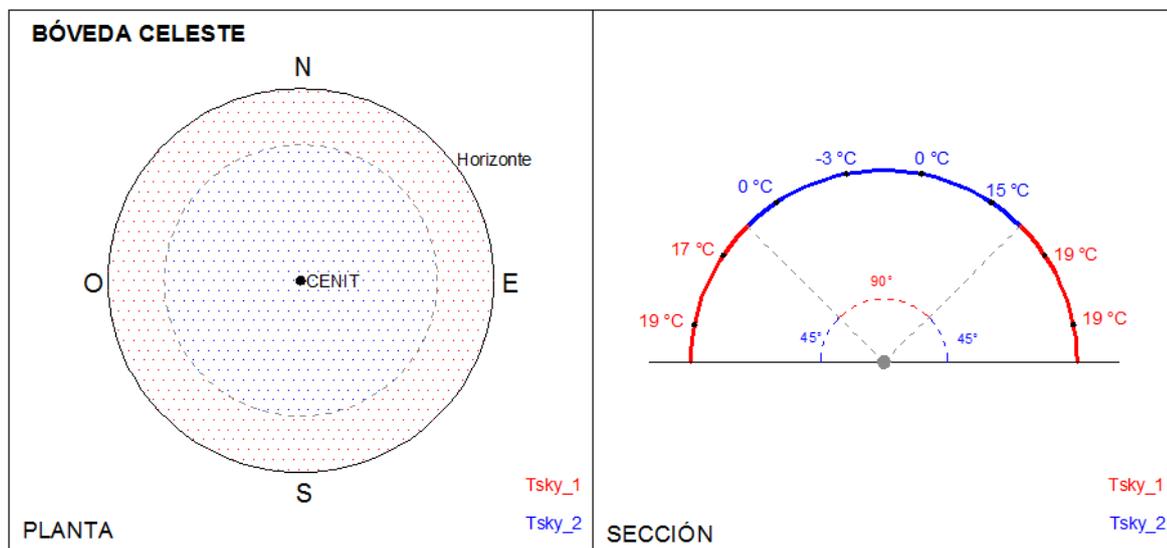


Figura 102 Proceso de medición de la temperatura del cielo, T_{sky} .

De cada una de estas dos porciones de la bóveda celeste se tomaron varios puntos de medición. Estos datos se promediaron para obtener dos temperaturas, T_{sky_1} y T_{sky_2} . Con lo cual se pudo diferenciar las temperaturas del cielo cercanas al cenit (T_{sky_1}) y las temperaturas del cielo cercanas al horizonte (T_{sky_2}), que tienen diferentes repercusión sobre la cubierta.

Para obtener la temperatura promedio de toda la bóveda celeste se calculó a través de sistemas informáticos el factor de vista cada una de estas porciones. Para la T_{sky_1} se obtuvo un factor de vista del 40% y para T_{sky_2} del 60% aproximadamente. Este resultado promedio es el que se utilizó para los datos de entrada del software.

La medición de este parámetro se la realizó a través del uso del termómetro por infrarrojos TESTO 830-T4, rango infrarrojo -30 a +400 °C, rango espectral 8-14 μm , óptica 30:1, y una emisividad al infrarrojo térmico calibrada a 0.90, **Figura 103**.

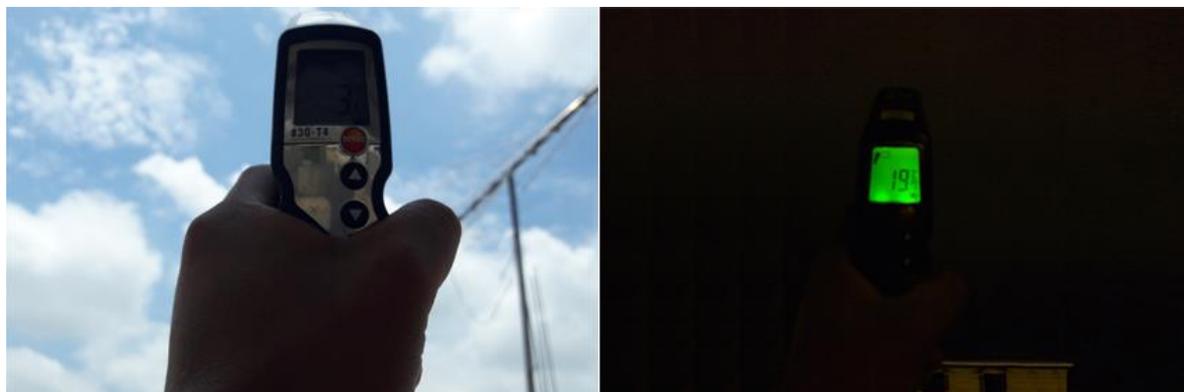


Figura 103 Medición temperatura radiante del cielo a través del termómetro por infrarrojo, en el periodo diurno (izquierda) y nocturno (derecha).

Adicionalmente de estas mediciones puntuales, se evaluó el comportamiento térmico del cielo a través de imágenes térmicas, tanto en el día **Figura 104** como en la noche **Figura 105**.

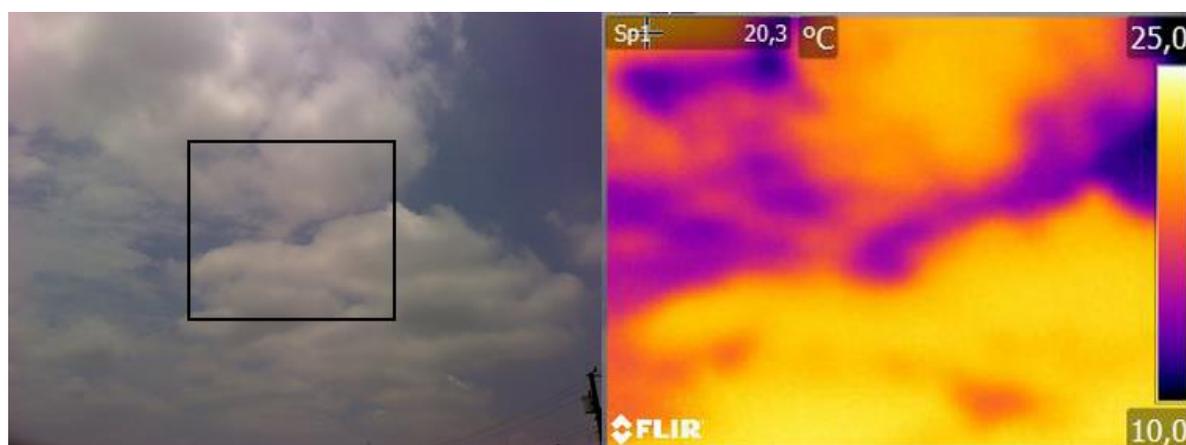


Figura 104 Medición temperatura radiante del cielo a través de la cámara térmica, en el periodo diurno.



Figura 105 Medición temperatura radiante del cielo a través de la cámara térmica, en el periodo nocturno.

Para conseguir una imagen térmica continua de los semi-arcos de la bóveda celeste, se realizaron varias imágenes desde cénit hasta el horizonte. Estas mediciones se realizaron en momentos puntuales del periodo diurno y nocturno del 10 y 12 de octubre de 2016.

La toma de estas imágenes térmicas se realizó con una cámara termográfica FLIR E40. Rango de temperatura -20°C a 650°C , rango espectral $7.5\text{-}13\ \mu\text{m}$, vista de campo $25^{\circ} \times 19^{\circ}$ y emisividad al infrarrojo térmico calibrada a 0.9. Las especificaciones técnicas de la instrumentación utilizada se muestran en el apartado *A2.4 INSTRUMENTACIÓN*

A2.1.2 RESULTADOS FACTORES CLIMÁTICOS

– RADIACIÓN SOLAR

A continuación se muestra la radiación solar obtenida a través de mediciones por la estación meteorológica (RS_medic) y la radiación solar teórica simulada con un cielo totalmente despejado (RS_sim), obtenida con el uso del software Heliodón, a lo largo de cada día de varios meses del año 2016: marzo, octubre y diciembre, **Figura 106**, **Figura 107** y **Figura 108**.

Estos resultados muestran la irregularidad de la radiación solar en esta región, tanto en los meses con mayor radiación (marzo y diciembre), y en el mes con menor radiación (octubre)

MARZO 2016

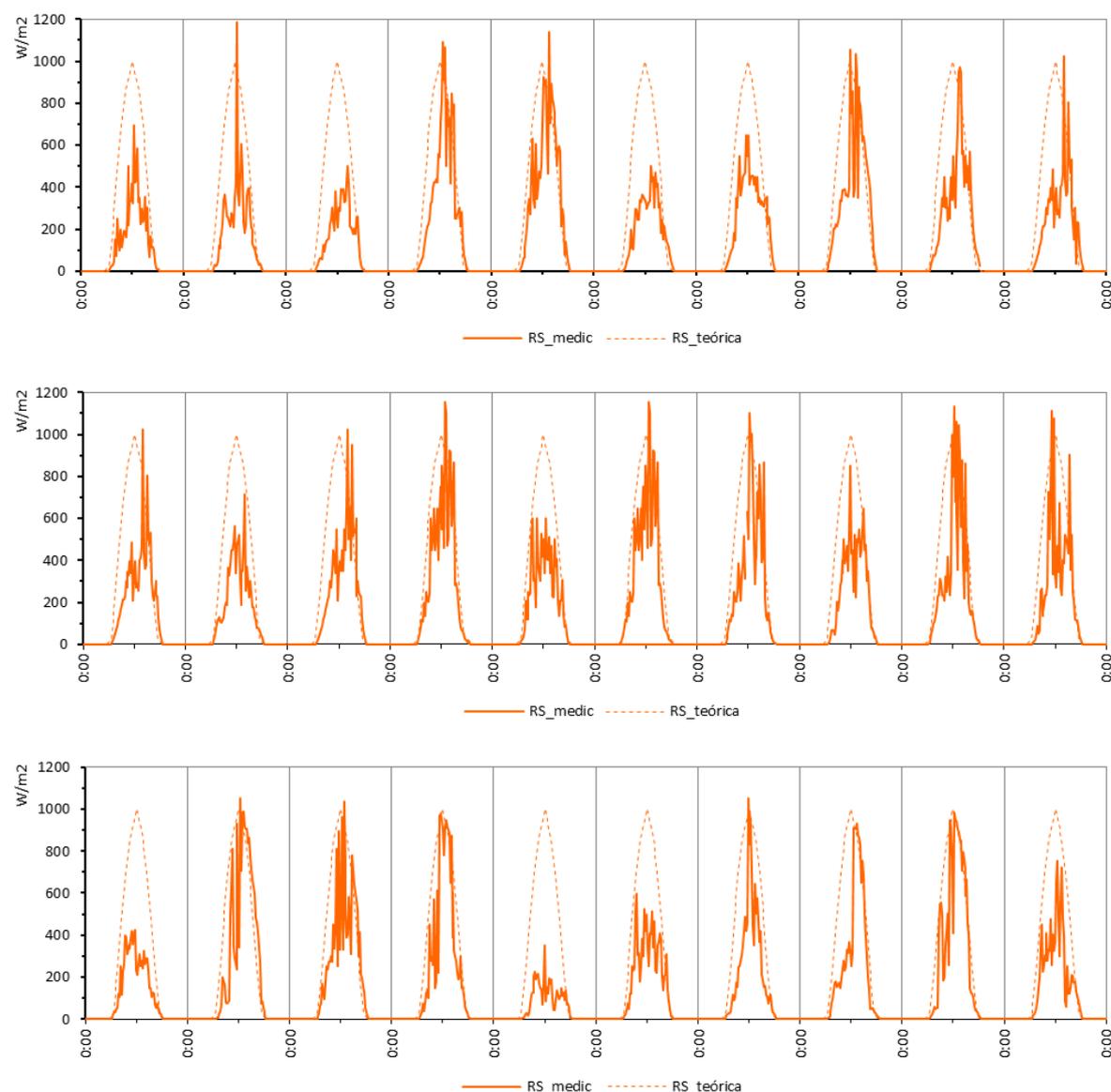


Figura 106 Valores horarios de Radiación Solar medida en el mes de MARZO 2016.

OCTUBRE 2016

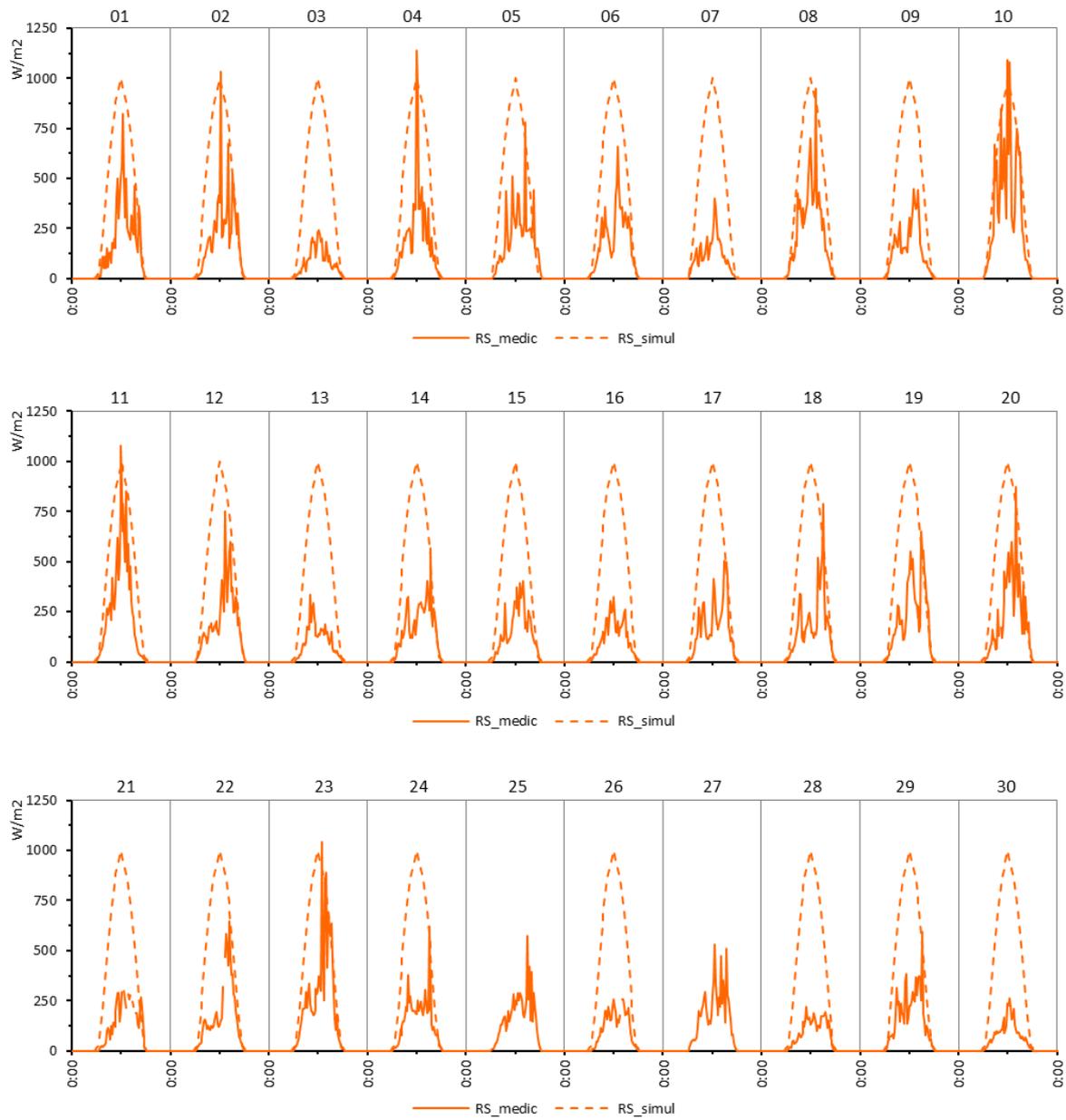


Figura 107 Valores horarios de Radiación Solar medida en el mes de OCTUBRE 2016.

DICIEMBRE 2016

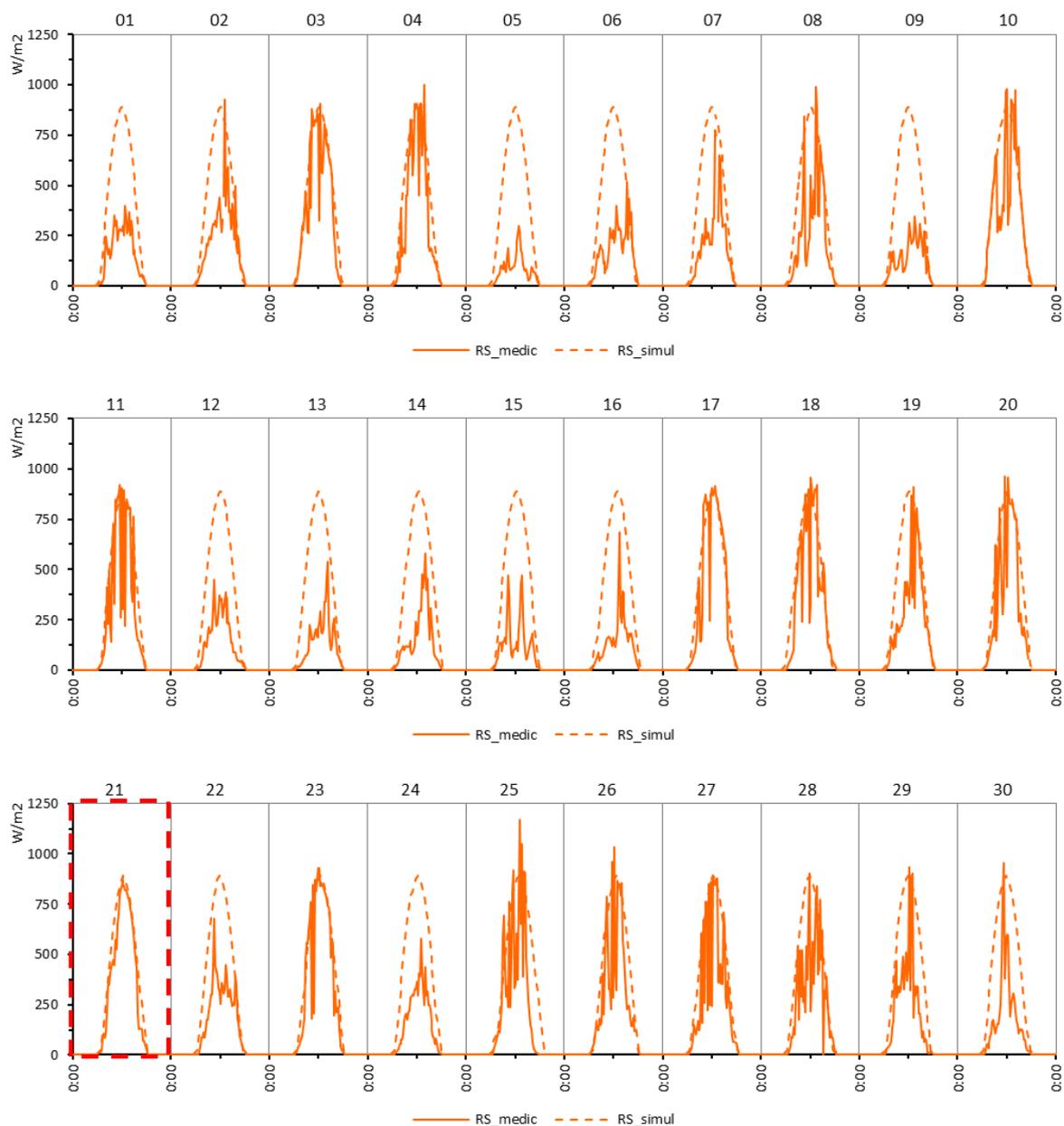


Figura 108 Valores horarios de Radiación Solar medida en el mes de DICIEMBRE 2016.

De esta gráfica se resalta el día 21 de diciembre, dado que es el único día en todo el año que alcanza la radiación teórica, con lo cual es el único día con condiciones de cielo casi totalmente despejadas.

– **RADIACIÓN SOLAR COBERTURA Y TEMPERATURA DEL CIELO: OCTUBRE Y DICIEMBRE**

A continuación se muestran los datos medidos de la radiación solar, la cobertura y temperatura del cielo en el mes de **OCTUBRE y DICIEMBRE**, con los correspondientes datos de temperatura del aire, **Figura 109 y Figura 110** respectivamente.

Figura 109 Mediciones de los Factores c Factores climáticos en la semana de OCTUBRE 2016, a) radiación solar y cobertura del cielo b) Temperatura promedio del cielo cercana al horizonte (Tsky_1) y temperatura promedio del cielo cercana al cénit (Tsky_2), porcentaje de cobertura del cielo, y la temperatura del aire exterior.

MEDICIONES SEMANA DE OCTUBRE

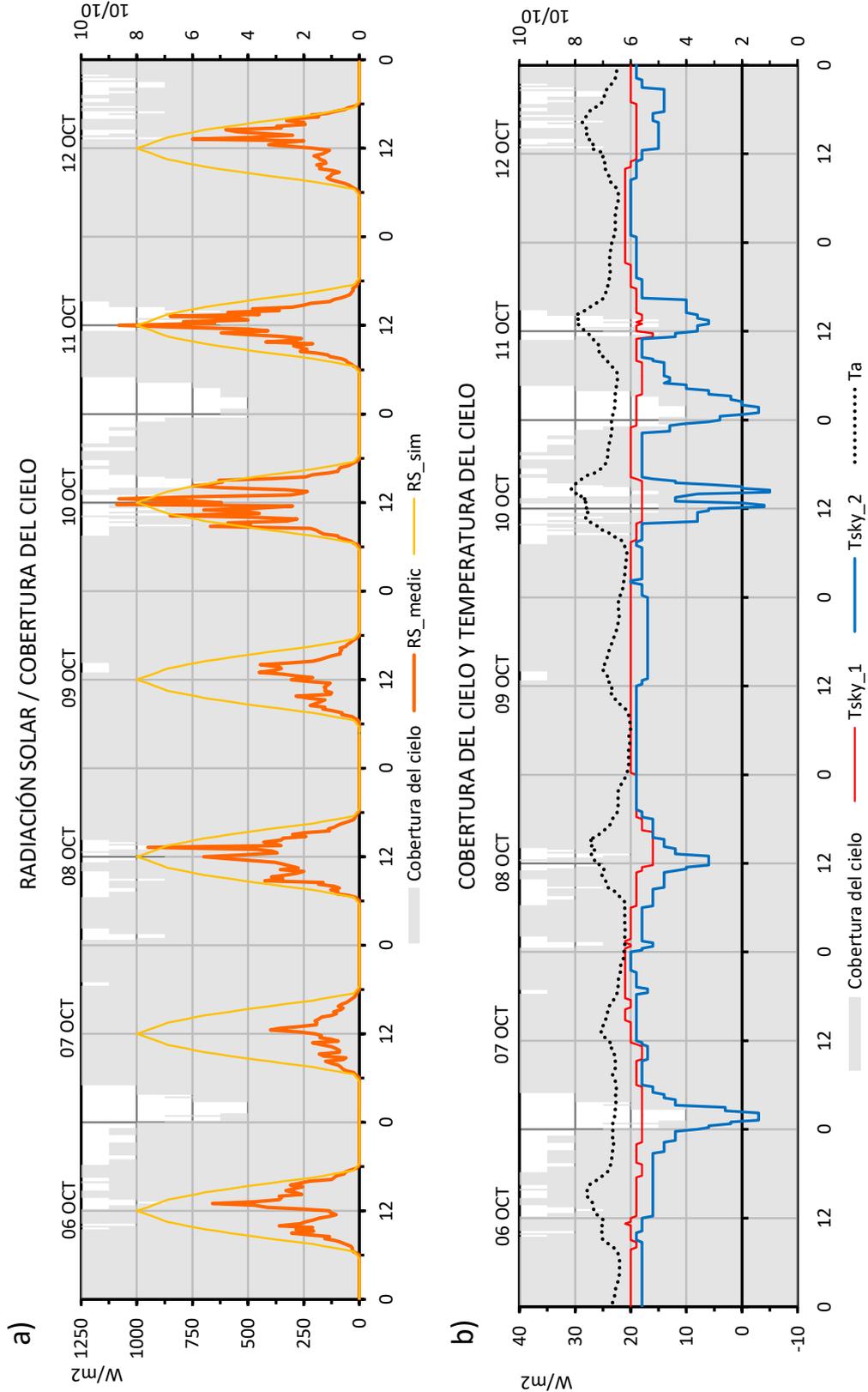
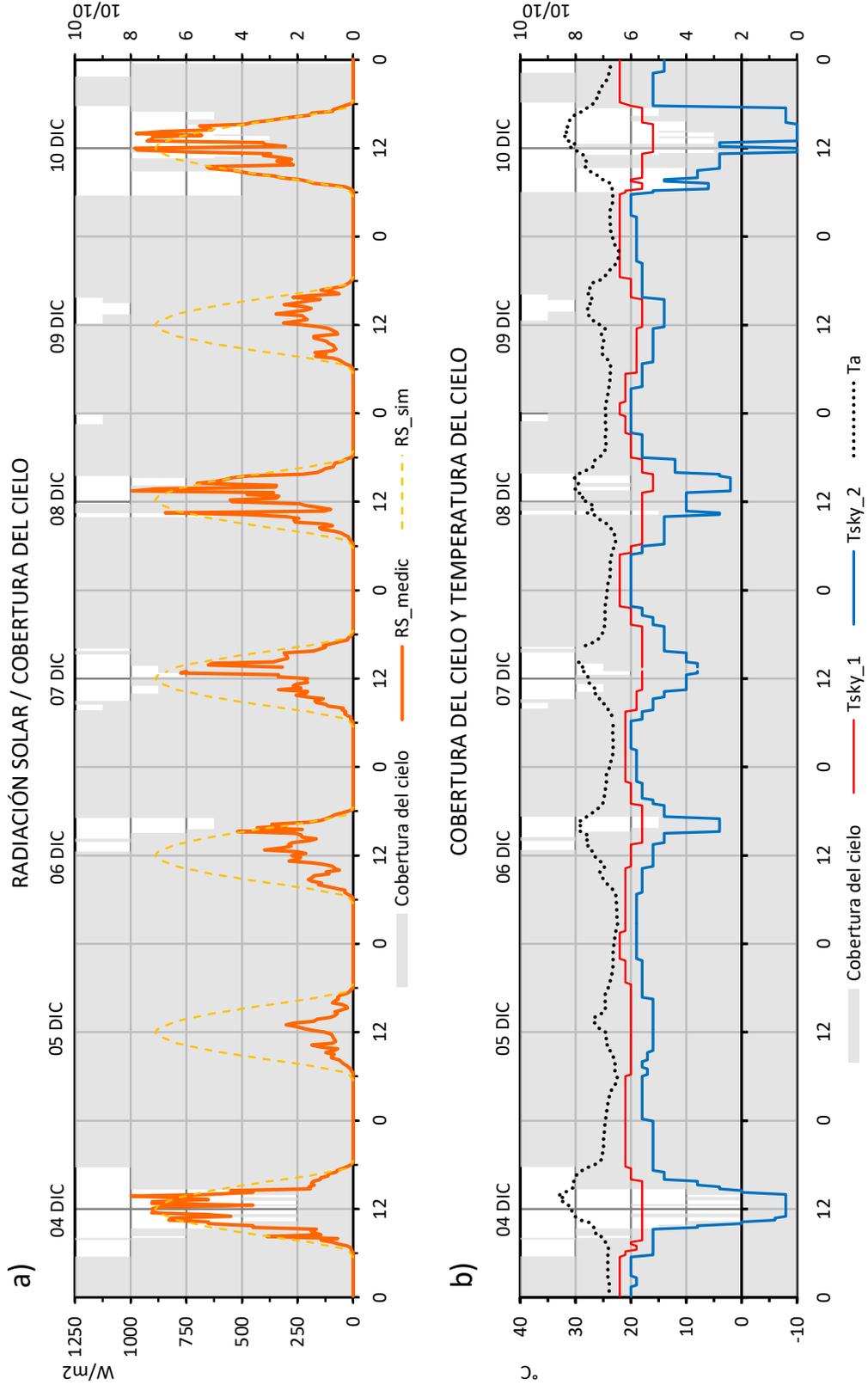


Figura 110 Mediciones de los Factores climáticos en la semana de DICIEMBRE 2016, a) radiación solar y cobertura del cielo b) Temperatura promedio del cielo cercana al horizonte (Tsky_1) y temperatura promedio del cielo cercana al cénit (Tsky_2), porcentaje de cobertura del cielo, y la temperatura del aire exterior.

MEDICIONES SEMANA DE DICIEMBRE



La **Figura 109** y **Figura 110** relaciona la radiación solar medida con la cobertura del cielo y la temperatura del cielo medida en la semana del mes de octubre y diciembre de 2016.

LA RADIACIÓN SOLAR Y LA COBERTURA DEL CIELO.

Al igual que los datos recolectados a lo largo del año, los resultados de estas dos semanas de mediciones muestran que la radiación solar a lo largo del día tiene un comportamiento errático en esta región. El flujo solar cambia drásticamente de un instante a otro, de 300 a 1000 W/m² y viceversa en una misma hora. La variabilidad de este flujo se debe a la influencia de la alta nubosidad del cielo en esta región, **Figura 109a** y **Figura 110a**.

En términos generales, los resultados muestran un CIELO MUY NUBLADO a lo largo de los dos periodos de medición (octubre y diciembre), con un promedio total de 9.3 décimas en el mes de octubre y un promedio de 8.8 décimas en el mes de diciembre.

En el mes de octubre, el promedio diurno de la cobertura del cielo varía desde un cielo totalmente nublado con un promedio de 10 décimas (09 de octubre) hasta 8.3 décimas el día menos nublado (10 de octubre). El valor mínimo absoluto en el periodo diurno fue de 5 décimas y corresponde al día menos nublado (10 de octubre) a las 12h30 cuando la radiación solar alcanza los 1075 W/m².

En el mes de diciembre, el promedio diurno de la cobertura del cielo varía desde 10 décimas (05 de diciembre) hasta 5.5 décimas en el día menos nublado (10 de diciembre). El valor mínimo absoluto en el periodo diurno fue de 3 décimas (10 de octubre) a las 12h30 cuando la radiación solar alcanza los 1000 W/m². El 10 de diciembre, el día con la menor cobertura del cielo (55%) de los dos periodos de medición, la radiación solar promedio es de 5 kWh/m².

Aunque en el mes de diciembre el promedio diurno de la cobertura del cielo es menor que en el mes de octubre, en ambos meses el promedio de nubosidad son bastante altos, 93% y 88% respectivamente.

En cuanto a este factor en el periodo nocturno, aunque no tenga ninguna relación con la radiación solar, si repercutirá sobre la temperatura del cielo en este periodo.

En el mes de octubre, el valor mínimo absoluto en la noche es de 4 décimas, (07 y 10 de octubre) sin embargo el resto de noches el cielo mantiene un porcentaje de cobertura alto, por encima de las 8 décimas. En cambio, en el mes de diciembre, el valor mínimo es de 8 décimas (10 de diciembre), y el resto de noches, el cielo se mantiene totalmente cubierto.

Aunque el mes de octubre presente mínimos absolutos menores que en el mes de diciembre, estos valores son puntuales. En los dos meses de mediciones el promedio nocturno de la cobertura del cielo está por arriba del 90%.

De acuerdo con estos resultados el porcentaje de cobertura del cielo en esta esta región es alto tanto en el día como en la noche, sin embargo tiene una mayor intensidad en el periodo nocturno.

LA COBERTURA DEL CIELO Y LA TEMPERATURA DEL CIELO

La **Figura 109b** y **Figura 110b** comparan las temperaturas del cielo, T_{sky_1} , T_{sky_2} , con el porcentaje de cobertura del cielo en la semana de medición del mes de octubre y diciembre. Además se muestra la temperatura del aire exterior como un valor de referencia.

Dada la anisotropía del cielo, para obtener un promedio de su temperatura se han medido diferentes partes de la bóveda celeste, de lo cual se obtuvieron: T_{sky_1} que representa el promedio de temperaturas medidas más cercanas al Horizonte y T_{sky_2} que representa los valores medidos más cercanos al cénit.

De acuerdo a estos resultados, **Figura 109b** y **Figura 110b**, todos los valores de T_{sky_1} son mayores a T_{sky_2} , es decir el cielo está más caliente en el horizonte que en el cénit.

T_{sky_1} muestra un comportamiento muy constante durante todos los días analizados. El promedio de toda la muestra es de 19.3 °C en el mes de octubre y 19.6 °C en el mes de diciembre.

Por otra parte, T_{sky_2} presenta un comportamiento mucho más variable, al igual que la cobertura del cielo. Cuando la cobertura del cielo se reduce, T_{sky_2} se reduce, principalmente en el periodo diurno. Por tanto T_{sky_2} tiene una relación más directa con el porcentaje de cobertura del cielo. A menor nubosidad menor es T_{sky_2} y viceversa, por el contrario T_{sky_1} se mantiene muy constante durante todo el periodo de análisis, a causa de su cercanía con el suelo.

La máxima diferencia entre la temperatura más cercana al horizonte (T_{sky_1}) y la más cercana al cénit (T_{sky_2}) es de 25 °C, cuando existe un porcentaje de cobertura del cielo de 3 décimas en el periodo diurno del 10 de diciembre. Existen otros momentos de estos dos periodos de mediciones cuando la diferencia entre estas dos temperaturas es mayor a 15 °C, sin embargo son escasos. La diferencia promedio entre estas dos temperaturas es de 5°C en octubre y 6°C en diciembre.

Debido a la alta nubosidad del cielo en esta región, la diferencia de temperaturas entre estas dos partes de la bóveda celeste no es tan marcada.

Para dar una descripción más detallada de cómo se distribuyen las temperaturas del cielo, a continuación se muestran los resultados de las imágenes térmicas tomadas de un semi arco de la bóveda celeste, desde el cénit hasta el horizonte, en el periodo diurno y nocturno, **Figura 111**.

Estas dos imágenes térmicas muestran dos porcentajes de cobertura del cielo diferentes. La imagen del Día fue tomada a las 10h00 cuando el porcentaje de cielo cubierto era de 8 décimas. Mientras que la imagen de la noche fue tomada a las 24h00 cuando el porcentaje de cielo cubierta era de 5 décimas. Las dos imágenes fueron tomadas el 10 de octubre.

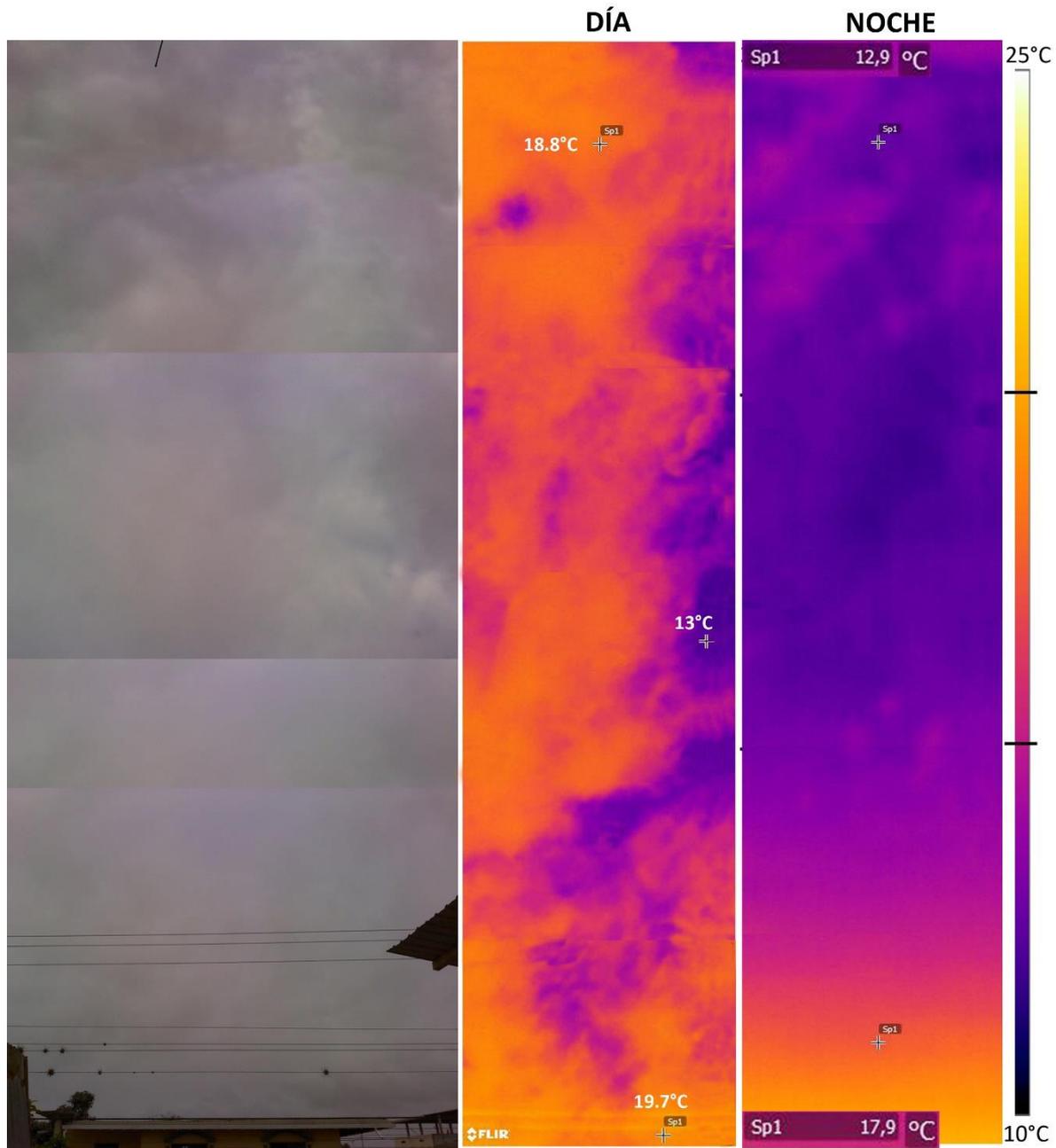


Figura 111 Imagen fotográfica y térmica de un semi-arco de la bóveda celeste en el periodo diurno y nocturno del 10 de octubre de 2016.

De acuerdo a estos resultados, en el DÍA cuando la cobertura del cielo fue de 8 décimas, la temperatura del cielo más cercana al cénit es 18.8°C y la más cercana al horizonte es 19.7°, una diferencia de 1°C. Por lo tanto, cuando hay un alto porcentaje de cobertura del cielo, la diferencia de temperatura entre estos dos extremos de la bóveda celeste no es significativo.

En esta imagen (DÍA), las mayores diferencias de temperatura del cielo se muestran entre la parte de la bóveda celeste con menor y mayor nubosidad. Las temperaturas más bajas de esta imagen térmica son de 13°C, y la integral de toda la imagen tiene un promedio de 17.5 °C.

Por otra parte, la imagen de la NOCHE cuando la nubosidad fue de 5 décimas, la diferencia de temperatura entre el cénit y el horizonte es 5 °C (12.9°C y 17.9°C respectivamente). Aunque esta diferencia es mayor que en la imagen del Día (1°C) aún es poco significativa en comparación con otras latitudes, [Nahon, Blanpain and Beckers, 2016].

Como se explicó en el proceso de medición, se ha determinado un promedio de la temperatura de cielo a partir de los valores obtenidos de T_{sky_1} y T_{sky_2} tomando en cuenta los diferentes porcentajes de influencia de cada una de estas partes de la bóveda celeste sobre un punto, 40% T_{sky_1} y 60% T_{sky_2} , **Figura 112**.

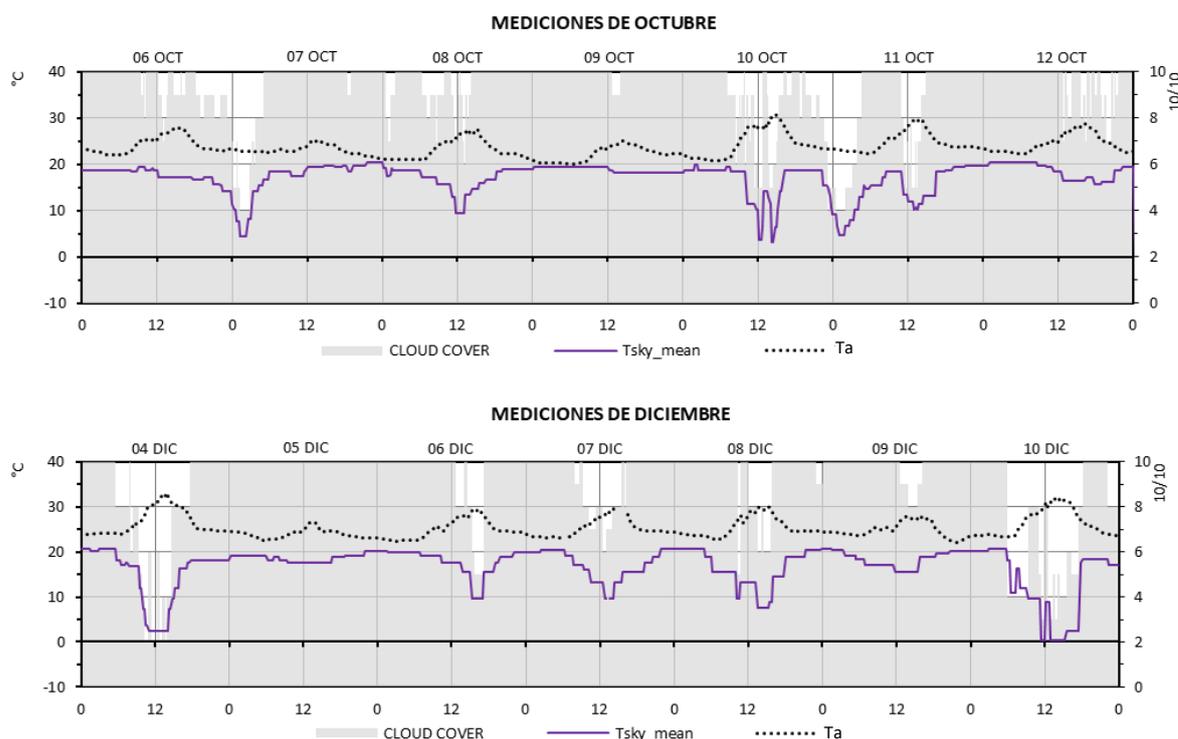


Figura 112 Mediciones de octubre (arriba) y diciembre (abajo) de la Temperatura promedio del cielo (T_{sky_mean}), porcentaje de cobertura del cielo, y la temperatura del aire exterior (T_a).

De acuerdo con estos resultados, el valor mínimo de la temperatura del cielo es de 3°C en el mes de octubre y de 0°C en el mes de diciembre. Sin embargo, estos valores se registran por periodos muy cortos, cuando la cobertura del cielo se reduce hasta sus mínimos valores (5 y 3 décimas respectivamente), en especial en el periodo diurno. Los mínimos valores del resto de días de medición van de 10 °C a 5 °C.

Estas temperaturas se contrastan con los de un clima de latitudes medias (Terrassa-España), donde las temperaturas pueden llegar hasta los -30°C tanto en el periodo diurno como en el nocturno, de acuerdo a mediciones realizadas por el autor en el verano de 2015, [Torres-Quezada *et al.*, 2016].

Debido a que el cielo en la Costa del Ecuador mantiene un alto porcentaje de cielo cubierto, las temperaturas promedio del cielo son de 17°C en el mes de octubre y en el mes de diciembre, de acuerdo a las mediciones realizadas.

Si comparamos la temperatura del aire exterior con las temperaturas de cielo, la diferencia promedio diaria es de 7 °C en octubre y 8 °C en diciembre. Esta diferencia se incrementa en el periodo diurno hasta 10 °C y 11 °C, y se reduce en el periodo nocturno hasta 4 °C y 5°C respectivamente en los dos meses de medición.

Por lo tanto, debido a la reducida diferencia entre la temperatura del cielo y la temperatura del aire, el flujo radiativo hacia el cielo es reducido en esta región. Aunque este flujo puede ser mayor en el periodo diurno, en el periodo nocturno el enfriamiento por radiación será casi nulo.

De acuerdo a estudios realizados por el autor, la radiación de onda larga hacia el cielo en este clima llega a ser la mitad del flujo que se tiene en climas de latitud media [Torres-Quezada *et al.*, 2016].

A2.1.3 DEFINICIÓN DEL DÍA DE ANÁLISIS

Con el fin de determinar las condiciones climáticas de los **DÍAS DE ANÁLISIS** para esta investigación, nos hemos enfocado en evaluar los datos medidos de todo el año 2016.

Dado que las temperaturas del aire y humedad en esta región son muy constantes a lo largo del año, se ha considerado los valores de la radiación solar para la determinación del día tipo.

De acuerdo a las simulaciones teóricas con un modelo de cielo sin nubes, la radiación solar promedio anual en esta latitud sería 6 kWh/m^2 . No obstante, de acuerdo a los datos medidos, el promedio anual es de 3 kWh/m^2 , y los promedios mensuales varían desde 2.3 kWh/m^2 en el mes de octubre hasta 3.7 kWh/m^2 en el mes de marzo.

Por tanto, aún con los recorridos solares más perpendiculares de todas las latitudes, debido a la alta nubosidad, esta región no se caracteriza por valores extremos de radiación.

Si comparamos el promedio anual de radiación solar en esta región (3 kWh/m^2) con los datos de radiación de una ciudad de latitud media (Barcelona latitud 41°N), este valor corresponde a la radiación de un mes de invierno de esta ciudad (febrero) [Agencia Estatal de Meteorología, 2012].

En busca de profundizar la evaluación del comportamiento de este flujo, a continuación se muestra un análisis de los valores de radiación promedio diaria a lo largo de todo el año medido, **Figura 113**.

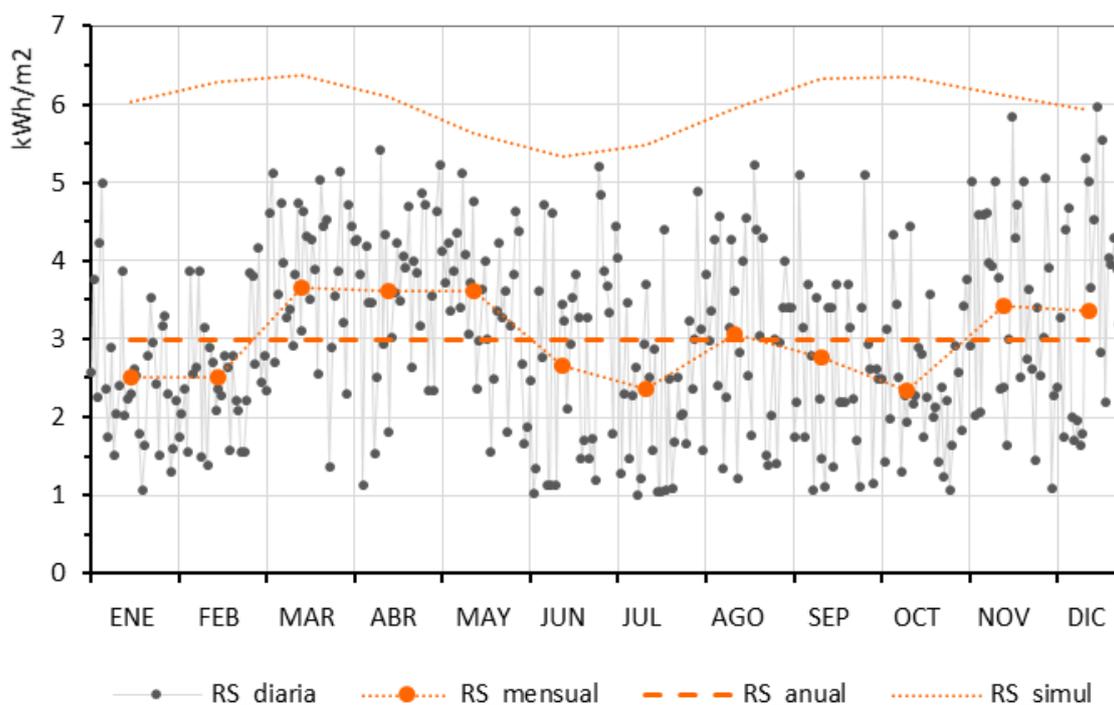


Figura 113 Promedio diario, mensual y anual de la radiación solar medida (2016)

A diferencia de lo que podría pensarse a cerca del flujo solar en Ecuador (alto y constante a lo largo del año), de acuerdo a los datos de la estación meteorológica, la radiación promedio diaria (RS_diaria) a lo largo del año muestra un comportamiento errático y con una variación muy pronunciada.

La variación anual entre los valores absolutos es de 4kWh/m^2 , con un mínimo absoluto en varios meses de 1kWh/m^2 (abril, junio, julio septiembre y octubre), y un máximo absoluto en el mes de diciembre de 6kWh/m^2 . Variaciones similares se registran en un mismo mes y hasta en días consecutivos. La menor variación mensual de este flujo es de 2kWh/m^2 y la mayor de 4kWh/m^2 . Conforme a estos datos, cualquier valor de radiación se puede registrar en cualquier mes del año.

A través de este análisis se ratifica que la radiación solar en esta región no depende principalmente de la geometría solar, y además no responde a un promedio mensual de la cobertura del cielo, sino al comportamiento de la nubosidad en cada día del año.

Esta investigación se plantea determinar dos días tipo de radiación que delimiten un rango de análisis, con lo cual se puede dar una visión más amplia del flujo solar en esta región.

Este rango de análisis estará delimitado por un día que describa las condiciones climáticas promedio a lo largo del año, referido como **DÍA PROMEDIO**. Y por otra parte, dado que en este clima el objetivo es evitar el sobrecalentamiento, se pretende determinar un día que describa las condiciones climáticas extremas de esta región, referido como **DÍA EXTREMO**.

Varios estudios optan por utilizar las características climáticas de los días con mayor radiación como días de análisis. Sin embargo, de acuerdo a los datos analizados en esta región, el máximo absoluto registrado, 6kWh/m^2 , sucede un solo día en toda la muestra (21 de diciembre), **Figura 113**. Por lo que, este día no representa una muestra fiable para nuestro análisis.

En el siguiente análisis se pretende determinar LOS DÍAS CON MAYOR RÉCURRENCIA A LO LARGO DEL AÑO de acuerdo a varios rangos de radiación solar, **Figura 114**.

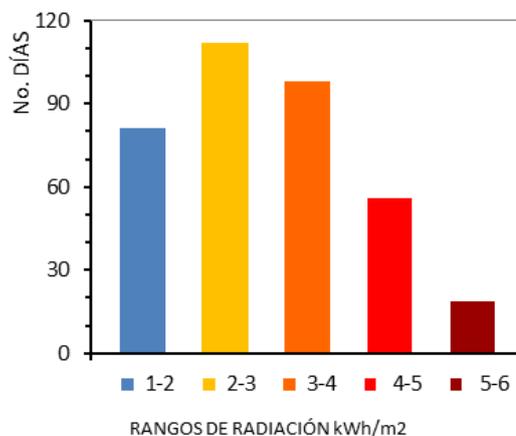


Figura 114 Número de días a lo largo del año 2016 con diferentes rangos de radiación solar.

Conforme a este análisis, se observa que hay 112 días del año que tienen una radiación entre 2-3 kWh/m², 98 días entre 3-4 kWh/m² y 82 días entre 1-2 kWh/m², que representan el 31%, 27% y 22% de todo el año respectivamente. Mientras que el número de días con una radiación entre 4-5 kWh/m² y 5-6 kWh/m² son 55 y 19 días, 15% y 5%.

De acuerdo a este análisis, los días más recurrentes a lo largo del año son los que tienen una radiación en el rango de **2 a 3 kWh/m²**, lo que se puede determinar como el rango de radiación del **DÍA PROMEDIO**.

Por otra parte, los días con valores mayores a 5 kWh/m², aunque son los valores máximos de radiación, no representan un porcentaje representativo en la muestra. Por el contrario, los días con una radiación en el rango de **4-5 kWh/m²** se repiten 55 días al año, lo que representa un porcentaje del 15% del total de la muestra. Por tanto, este rango de radiación define las condiciones del **DÍA EXTREMO**.

Con el fin de ratificar estos rangos, y obtener valores más precisos del día promedio y el día extremo, todos los datos de radiación solar han sido evaluados estadísticamente en periodos mensuales. Los datos analizados son los valores medios, la desviación estándar y los máximos y mínimos de este factor, **Figura 115**.

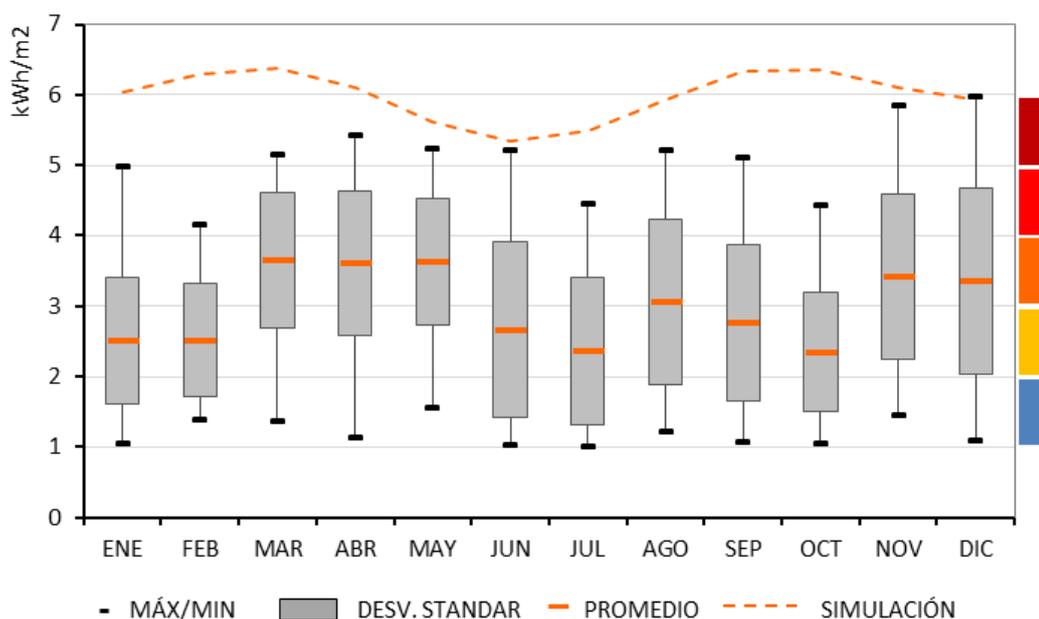


Figura 115 Valor promedio mensual, desviación estándar y valores absolutos (máximo y mínimo) de la radiación solar mensual en Ecuador.

De acuerdo a este análisis, la mayoría de los valores medios mensuales se encuentra en el rango de 2-3 kWh/m², lo que coincide con los días más recurrentes en el año, **Figura 114**. Todos estos valores promedios dentro de este rango están alrededor de los 2.5 kWh/m².

Por otra parte, este análisis corrobora que los valores máximos absolutos a lo largo del año, por arriba de los 5kWh/m², difieren ampliamente de la media y corresponden a días puntuales que no tienen relevancia en la muestra. Bajo estas circunstancias, los valores de desviación estándar máxima proveen una descripción más acertada de un día extremo a lo largo del año. La mayoría de estos valores se encuentran en el rango de 4-5 kWh/m², con un valor promedio de 4.5 kWh/m².

Conforme a lo expuesto, los valores de radiación solar que determinan el rango de análisis son: para el Día Promedio un valor de 2.5kWh/m², mientras que para el Día Extremo se ha tomado un valor de 4.5kWh/m², **Figura 116**.

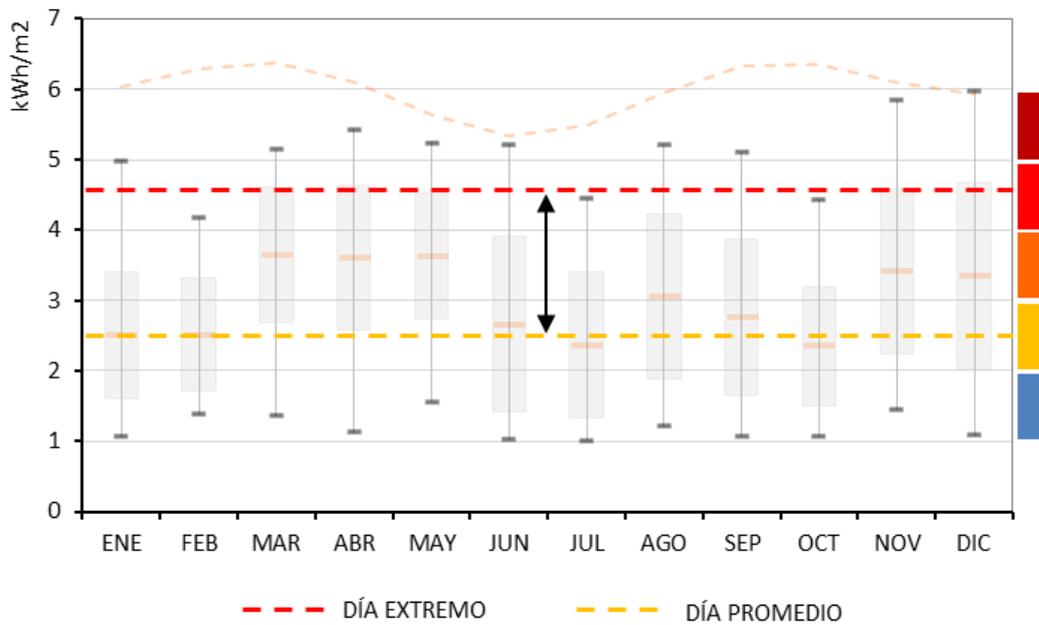


Figura 116 Rango de radiación solar más representativa en esta región. Día Extremo como Límite superior y Día Promedio como Límite inferior.

– RADIACIÓN SOLAR, COBERTURA Y TEMPERATURA DEL CIELO DE LOS DÍAS DE ANÁLISIS.

Hasta ahora se ha determinado los valores promedios diarios del flujo de radiación solar que definen los dos días de análisis (DÍA PROMEDIO Y DÍA EXTREMO). Para la correcta configuración del archivo climático fue necesario determinar también la cobertura y temperatura del cielo de estos días.

Para la definición horaria de estos 3 parámetros se utilizan los datos medidos de la semana del mes de octubre y del mes de diciembre. De estas mediciones se han escogido los días con la radiación solar diaria más cercana al Día Promedio y al Día Extremo, **Figura 117**.

Además, en esta gráfica se contraponen los datos medidos con la radiación obtenida por simulación (sin nubes) que se utiliza como valor de referencia.

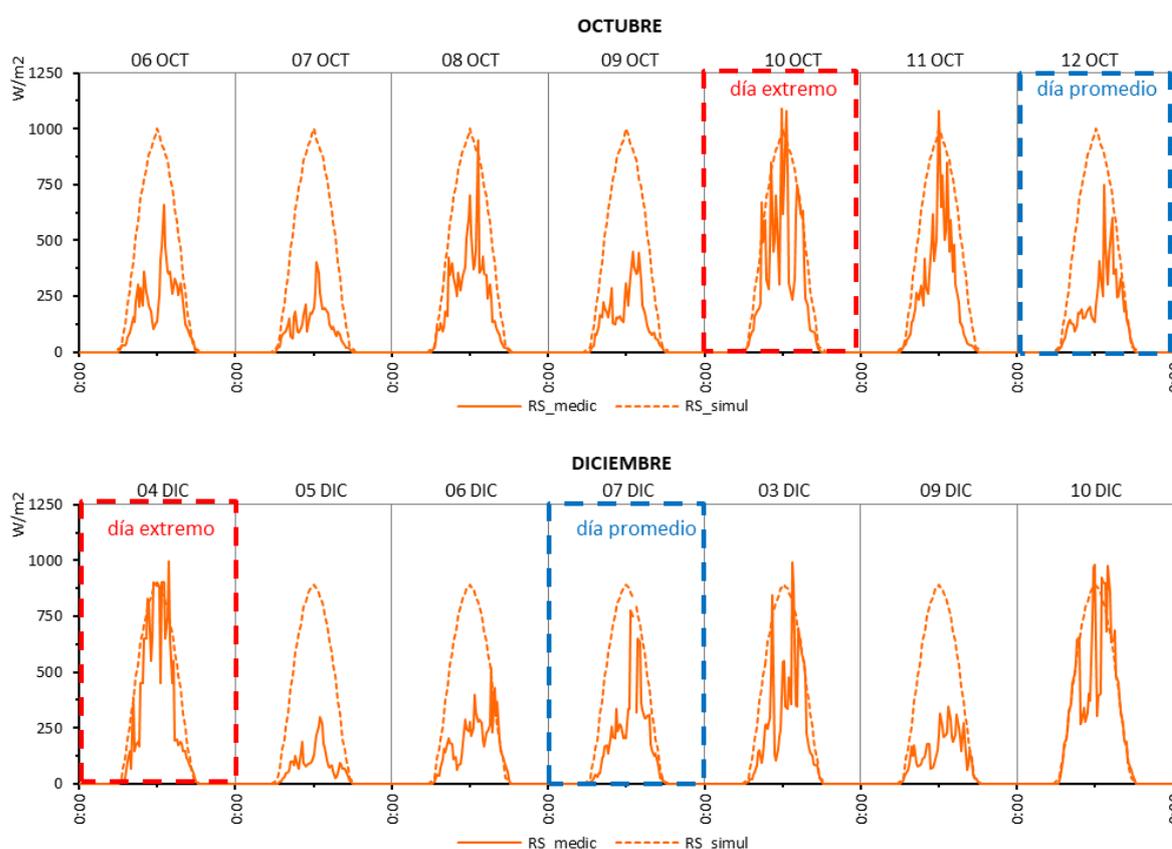


Figura 117 Flujo de radiación solar medido y simulado, de una semana del mes de octubre y diciembre.

Los valores promedios de radiación diaria varían desde 1.4 kWh/m² hasta 4.4 kWh/m² en la semana de octubre, y desde 1 kWh/m² hasta 4.5 kWh/m² en la semana de diciembre.

Los días que poseen una radiación cercana a la establecida para los días de análisis son: el 12 de octubre y 7 de diciembre para el Día Promedio con 2.6 kWh/m² y 2.7 kWh/m² respectivamente, y el 10 de octubre y 4 de diciembre para el Día Extremo con 4.5 kWh/m² en ambos días, **Figura 118**.

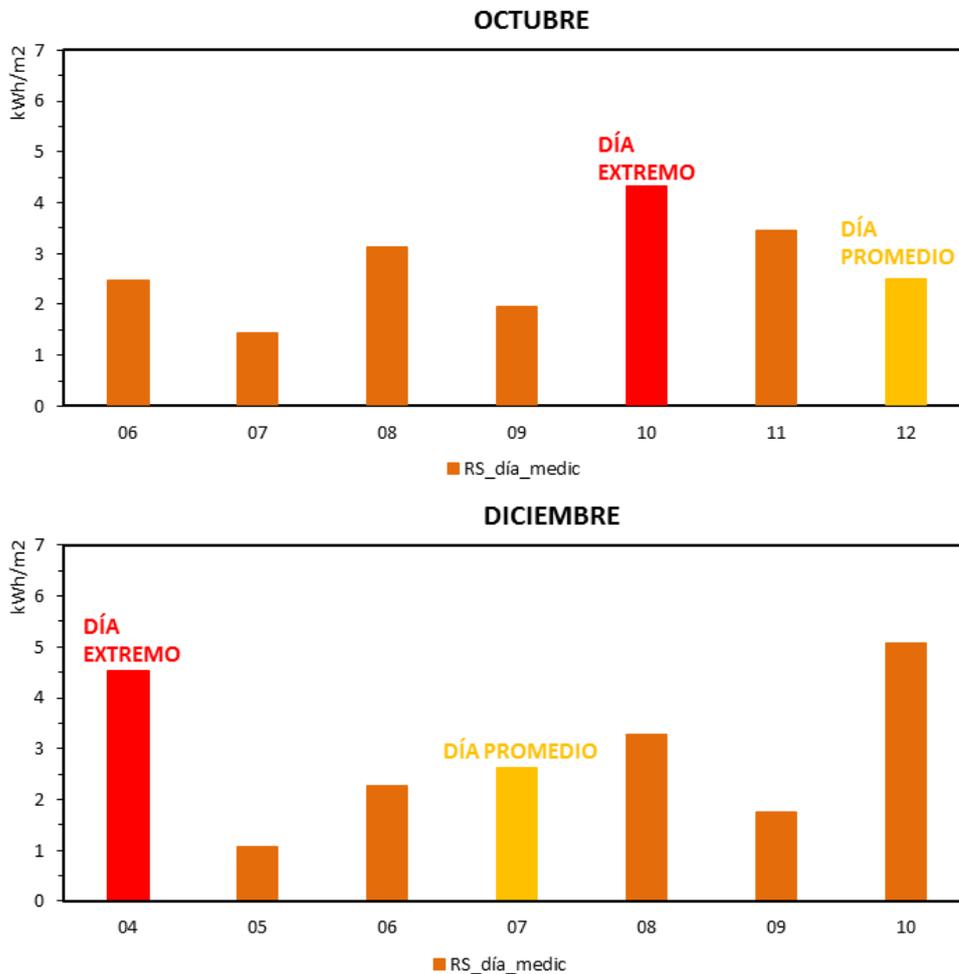


Figura 118 Promedio de radiación diaria medida en la semana del mes de octubre y la semana del mes de diciembre.

Una vez definido los días de estas dos semanas de mediciones que coinciden con el Día Promedio y el Día Extremo, a continuación se definen los valores del porcentaje de cobertura del cielo y la temperatura del cielo de estos dos días.

El porcentaje de cobertura del cielo ha servido para determinar la proporción entre la radiación directa y radiación solar en los días de análisis.

Por otra parte, la temperatura del cielo ha servido para determinar el flujo de radiación en onda larga emitido por el cielo (radiación horizontal atmosférica) en base a datos medidos, lo que nos permitirá tener una aproximación más acertada de la capacidad de enfriamiento del cielo en esta región.

COBERTURA DEL CIELO

La **Figura 119** muestra los valores del porcentaje de cobertura del cielo de la semana de octubre y los relaciona con los resultados de la radiación solar.

De acuerdo con estos resultados la cobertura del cielo en el Día Promedio (12 de octubre- 2.6 kWh/m²) es de 9.2 décimas y en el Día Extremo es del 8.3 décimas (10 de octubre- 4.5 kWh/m²).

Mientras que, la radiación difusa representa el **90%** de la radiación global en el Día Promedio, y el **71%** en el Día Extremo

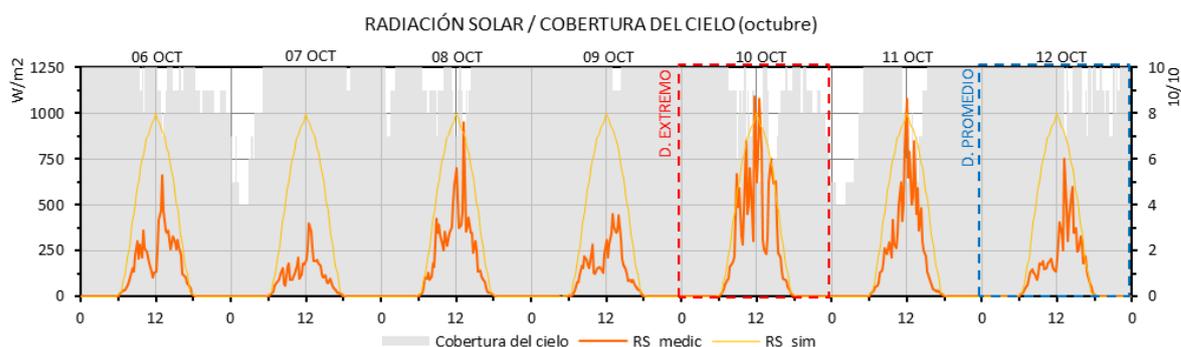


Figura 119 Valores del porcentaje de cobertura del cielo, y radiación solar del Día Promedio y el Día Extremo escogidos de las mediciones del mes de octubre

De acuerdo a los datos del mes de diciembre, el porcentaje de cobertura del cielo es del 9.1 décimas en el Día Promedio (7 de diciembre) y 8.1 décimas en el Día Extremo. Los valores de cobertura del cielo en este mes son muy similares a los medidos en el mes de octubre, **Figura 120**.

Aunque se registra otro día con una menor nubosidad de las ya mencionadas, 7.1 décimas (10 de diciembre), su radiación solar se sale de los rangos de análisis establecidos.

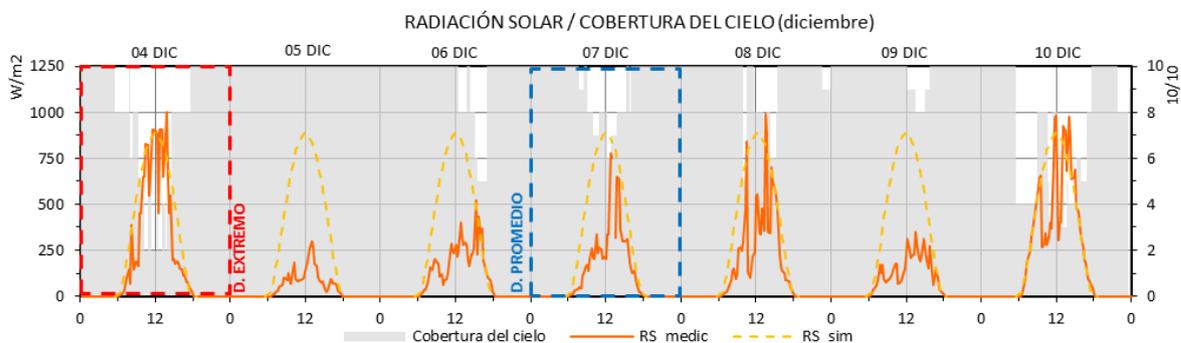


Figura 120 Valores del porcentaje de cobertura del cielo, y radiación solar del Día Promedio y el Día Extremo escogidos de las mediciones del mes de diciembre.

TEMPERATURA DEL CIELO.

De acuerdo con los resultados en el mes de octubre, **Figura 121**, el promedio diario de la temperatura del cielo es de 18.8°C en el Día Promedio (12 de octubre) y 15.5°C en el Día Extremo (10 de octubre).

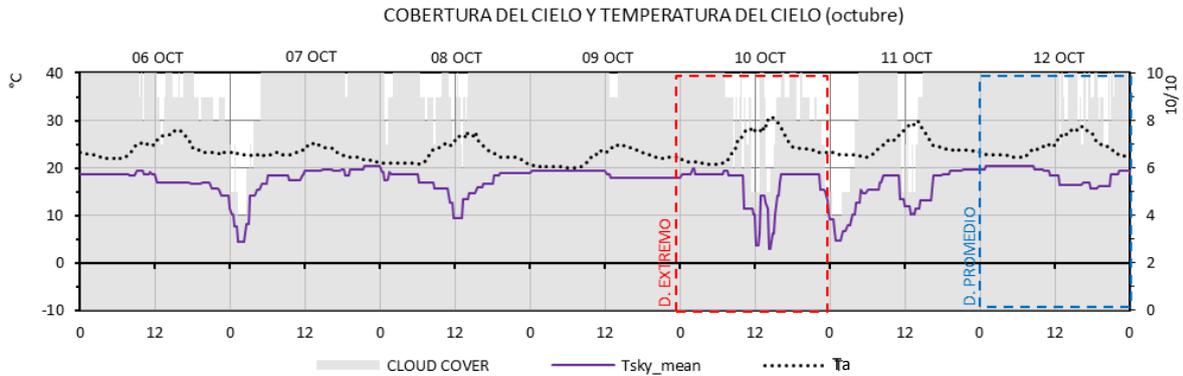


Figura 121 Temperatura promedio del cielo (T_{sky_mean}), porcentaje de cobertura del cielo y temperatura del aire (T_a), en la semana de mediciones del mes de octubre.

De acuerdo a los datos de diciembre, **Figura 122**, el promedio diario es de 17.8°C en el Día Promedio (07 de diciembre) y 15 °C en el Día Extremo (4 de diciembre). Los valores de temperatura del cielo medidos en este mes son muy similares a los valores obtenidos en el mes de octubre.

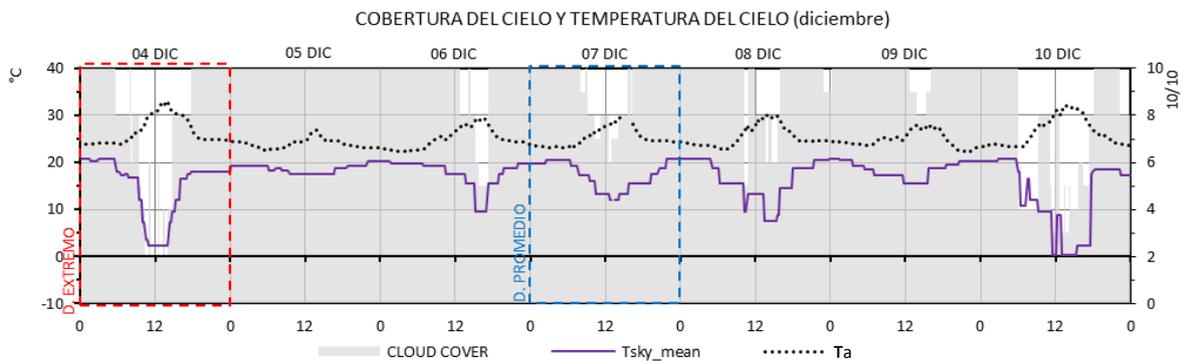


Figura 122 Temperatura promedio del cielo (T_{sky_mean}), porcentaje de cobertura del cielo y temperatura del aire (T_a), en la semana de mediciones del mes de diciembre.

Los valores de la cobertura el cielo y la temperatura del cielo tanto del Día Promedio como del Día Extremo son muy similares en los dos periodos de medición (octubre y diciembre).

Por lo tanto, se puede definir que en esta región los días con una radiación solar de 2.6 kWh/m² (Día Promedio) tienden a tener una cobertura del cielo alrededor de 9.2 décimas y una temperatura del cielo alrededor de 18 °C, mientras que los días con una radiación solar de 4.5kWh/m² tienden a tener una cobertura del cielo de 8.2 décimas y una temperatura del cielo de 15 °C.

Debido a las constantes precipitaciones que se registraron en el mes de diciembre en el periodo nocturno, las cuales modifican el comportamiento térmico de las cubiertas y no son objetivo de esta tesis, se decidió tomar los DATOS CLIMÁTICOS DE LA SEMANA DE OCTUBRE para la configuración de los días de análisis.

Finalmente, a continuación se detalla los valores promedios diarios de todos los factores analizados, que definen las condiciones climáticas de los dos días de análisis. En el DÍA PROMEDIO y DÍA EXTREMO (12 y 10 de octubre), **Tabla 24**.

Para el análisis de las cubiertas se utilizó sólo el Día Promedio y el Día Extremo, sin embargo, todos los días de la semana de octubre fueron usados en el archivo climático.

Tabla 24 Valores promedio diario de la radiación solar, radiación difusa, cobertura del cielo y temperatura del cielo en el Día Promedio y el Día Extremo

CONDICIONES DE LOS DÍAS DE ANÁLISIS		
	DÍA PROMEDIO	DÍA EXTREMO
Radiación Solar	2.5 kWh/m ²	4.4 kWh/m ²
Radiación difusa	90%	71%
Cobertura del cielo	92%	83%
Temperatura del cielo	18.8°C	15.5°C
Temperatura del aire	24.5°C	25.1°C

A2.2 PARÁMETROS DE LA CUBIERTA

A 2.2.1 CASOS DE VALIDACIÓN.

CASO DE VALIDACIÓN 1: CUBIERTA LIGERA METÁLICA



La vivienda del caso de validación 1 es un edificio de 3 plantas ubicado en la ciudad de Santa Rosa-El Oro-Ecuador (c.15 de Octubre/Bolívar), construido en el año de 1980. El espacio medido se ubica en la 3 planta en el lado sur y no posee ventanas. Las paredes de este espacio son de bloque ligero enlucido y pintado, piso de entablado de madera y una CUBIERTA LIGERA METÁLICA, **Tabla 25**.

La cubierta actual, que sirve como caso de análisis, fue instalada en el 2008. Esta cubierta corresponde a un lámina de acero TIPO Duratecho [NOVACERO, 2016] con un peso de 2.6 kg/m² y una pendiente del 7%. Esta cubierta desde su instalación no ha recibido ningún tipo de mantenimiento.

Las especificaciones del fabricante definen al producto como una plancha de acero de 0.3mm con un recubrimiento Tipo A (Galvalúme) regido por las normativas NTE INEN 2221 y ASTM A3792, las que definen este recubrimiento como una aleación de Aluminio y Zinc (55%-45%) [InstitutoEcuatoriano de Normalización (INEN), 2008][ASTM A792 / A792M-10, 2015]. De acuerdo al fabricante y fuentes bibliográficas, las propiedades radiativas de esta cubierta tienen una reflectividad al visible de 0.75 y una emisividad al infrarrojo térmico de 0.13 [Bergman *et al.*, 2011], sin embargo, debido a la falta de mantenimiento, estos parámetros han sido medidos *in situ*.

Es necesario señalar que existe otro tipo de recubrimiento además del tipo A. Este recubrimiento es el tipo G, que se refiere a un recubrimiento Galvanizado (100% zinc) [InstitutoEcuatoriano de Normalización (INEN), 2008][ASTM A792 / A792M-10, 2015].

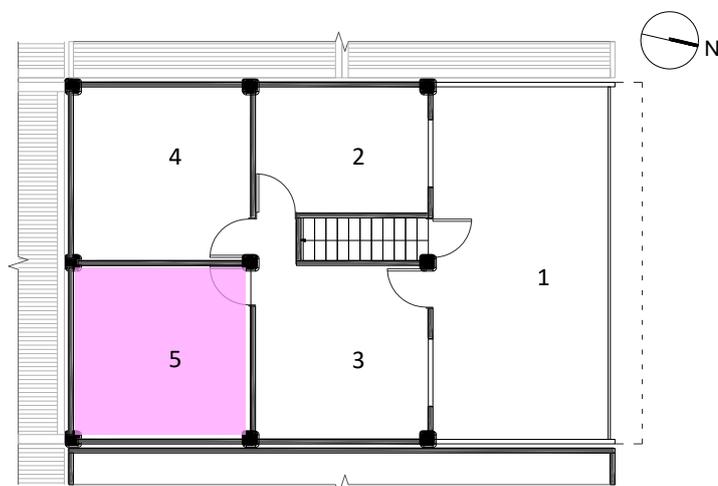
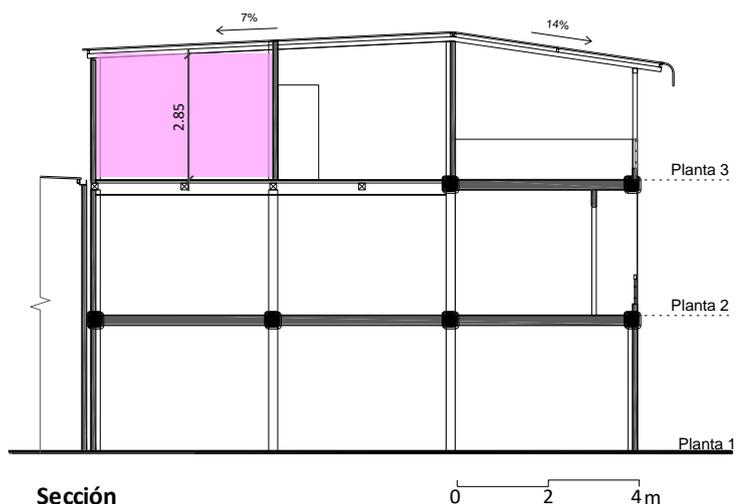
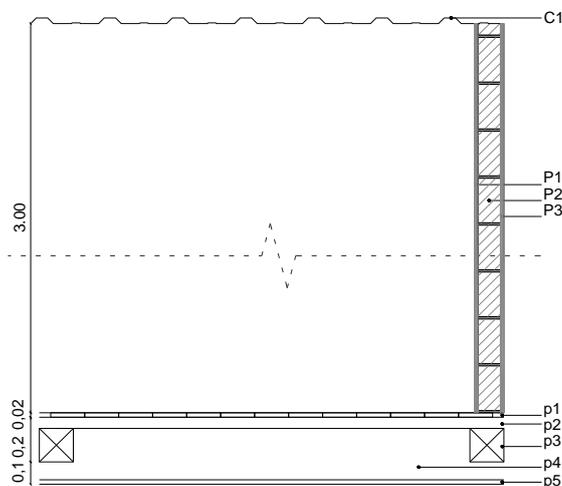
Tabla 25 Especificaciones del Caso de validación 1: VIVIENDA CON CUBIERTA METÁLICA.

Caso de Validación 1: Vivienda con Cubierta Pesada de Hormigón

Edificio Plurifamiliar (3P)

Área: Planta 1-2: 96 m²Planta 3: 64 m²**DISTRIBUCIÓN PLANTA 3**

- 1 Terraza
 - 2 Cocina
 - 3 Sala
 - 4 Dormitorio Sur 1
 - 5 DORMITORIO SUR 2**
(Área de Mediciones)
- Ocupación: 0 personas
 Área: 15,05 m²
 Área de cubierta: 15,2 m²
 Volumen: 45,16 m³
 Altura promedio: 2,85 m

**Planta 3****Sección****Detalles constructivos****Especificaciones técnicas****CUBIERTA**

- C1. Plancha de acero TIPO A, e = 3mm
 NTE INEN 2221
 55% aluminio y 45% zinc
 ASTM 792

PAREDES

- P1. Mortero de cemento y arena e = 15 cm
 P2. Bloque de pómez hueco e = 15 cm
 P3. Mortero de cemento y arena e = 15 cm

PISO

- p1. Enduelado de madera, 2 cm e = 2 cm
 p2. Tiras de madera, 5 cm e = 5 cm
 p3. Vigas de madera, 15 cm e = 15 cm
 p3. Cámara de aire, 10 cm e = 10 cm
 p4. Cielo raso : Yeso cartón, 2cm e = 2 cm

CASO DE VALIDACIÓN 2_ CUBIERTA PESADA



Esta vivienda es una edificación de 1 planta construida en el año de 1986. El espacio donde se realizaron las mediciones se ubica en el lado sur, su ocupación es casi nula y no posee ventanas. Las paredes son de bloque ligero enlucido y pintado, piso de hormigón más recubrimiento de cerámica, y una CUBIERTA DE LOSA DE HORMIGÓN, **Tabla 26**.

Esta cubierta fue construida varios años después de la construcción de la vivienda, en 1998. De igual manera que en el caso de validación 1, esta cubierta no ha tenido ningún tipo de mantenimiento desde su construcción.

La cubierta de este caso experimental es una losa de hormigón armado de 22 cm de espesor, nervado en los dos sentidos, con una pendiente mínima del 1%. Este forjado está compuesto por una chapa de hormigón de 5 cm, bloque de aligerado de piedra pómez de 15 cm y un enlucido de mortero de cemento en el interior de 2 cm.

El acabado de la superficie exterior es el mismo hormigón sin ningún tipo de recubrimiento. De acuerdo a información bibliográfica las propiedades radiativas del hormigón en su estado original nuevo tienen una reflectividad al visible de 0.4 y una emisividad al infrarrojo térmico de 0.9 [ASHRAE, 2001][Bergman *et al.*, 2011]. Sin embargo, debido a la falta de mantenimiento, estos parámetros han sido medidos *in situ*.

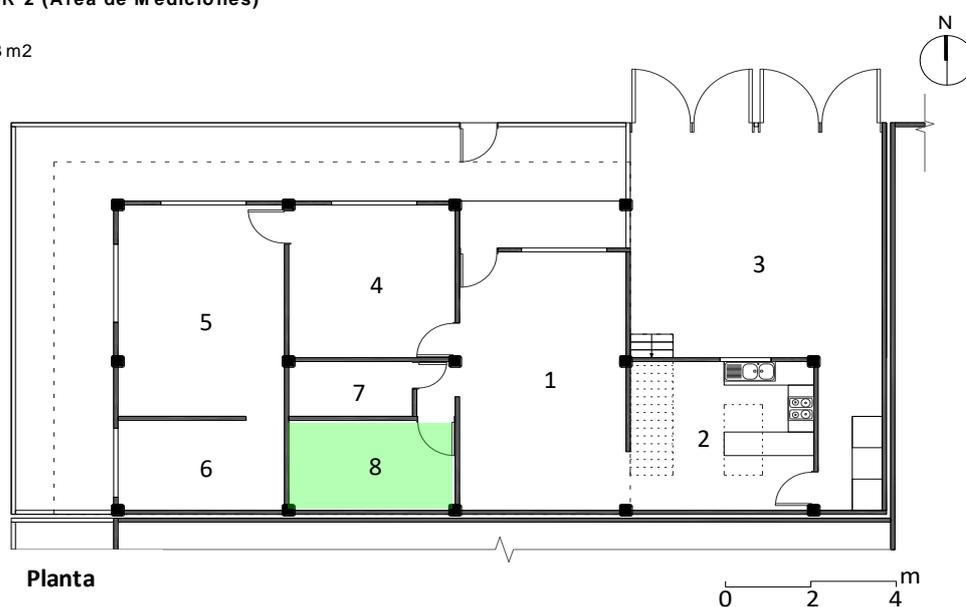
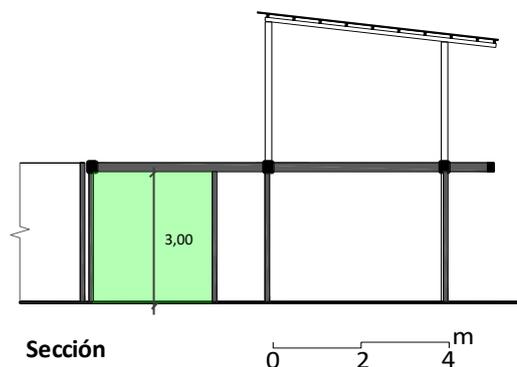
Tabla 26 Especificaciones del Caso de validación 2: VIVIENDA CON CUBIERTA DE HORMIGÓN.

CASO DE VALIDACIÓN 2: vivienda con cubierta pesada de hormigón

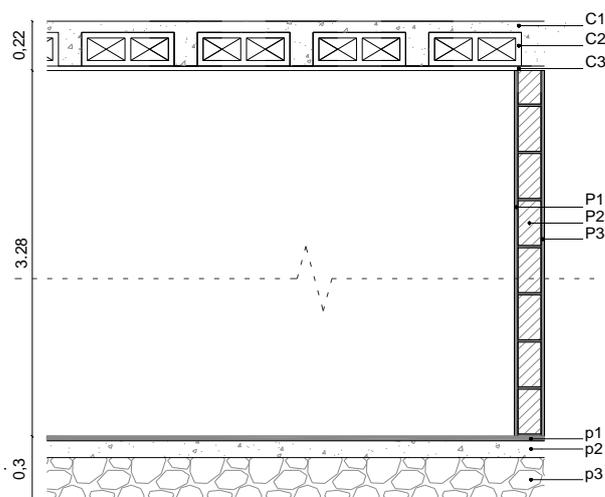
Vivienda unifamiliar
 Área: 82 m²
 Ocupación: 3 personas

DISTRIBUCIÓN VIVIENDA

- 1 Sala-Comedor
- 2 Cocina
- 3 Garage
- 4 Dormitorio Norte
- 5 Estudio
- 6 Dormitorio Sur 1
- 7 Baño
- 8 **DOMITORIO SUR 2 (Área de Mediciones)**
 Ocupación: nula
 Área Cubierta: 8,83 m²
 Volumen: 28,70 m³
 Altura: 3,00 m



Detalles constructivos



CUBIERTA

- | | | |
|-----|----------------------------------|----------|
| C1. | Hormigón armado | e= 5 cm |
| C2. | Bloque de concreto liviano hueco | e= 15 cm |
| C3. | Mortero de cemento y arena | e= 2 cm |

PAREDES

- | | | |
|-----|----------------------------|----------|
| P1. | Mortero de cemento y arena | e= 15 cm |
| P2. | Bloque de pómez hueco | e= 15 cm |
| P3. | Mortero de cemento y arena | e= 15 cm |

PISO

- | | | |
|-----|--------------------|-----------|
| p1. | Mortero de cemento | e= 2 cm |
| p2. | Concreto | e= 7,5 cm |
| p3. | Piedra Bola | e= 20 cm |

A 2.2.2 PROPIEDADES RADIATIVAS: REFLECTIVIDAD AL VISIBLE Y EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO

En este apartado se muestra el proceso de medición utilizado para determinar las propiedades radiativas de la cubierta ligera metálica y la cubierta pesada de hormigón: la reflectividad al visible y la emisividad al infrarrojo térmico. Los métodos utilizados para medir estas propiedades se respaldan en estudios preliminares [Akbari, Levinson and Berdahl, 1996][Simpson and McPherson, 1997][Song *et al.*, 2013][López *et al.*, 2014][Baneshi, Gonome and Maruyama, 2016].

Dado que las cubiertas tienen varios años de uso, se supone que los valores obtenidos difieren de los valores en su estado nuevo. A través de esta comparación se podrá analizar el efecto del envejecimiento.

– PROCESO DE MEDICIÓN: REFLECTIVIDAD AL VISIBLE

La medición del factor de reflectividad al visible se realizó por medio de dos métodos.

El PRIMER MÉTODO consistió en medir simultáneamente las iluminancias (lux) que llegan sobre la superficie de la cubierta y las iluminancias que salen de esta, para realizar una aproximación de este factor a través de una proporción entre estos dos valores, **Figura 123**.



Figura 123 Proceso de medición del factor de reflectividad a través de la medición de iluminancias. CP: superficie de hormigón (izquierda), y CL: superficie lámina de acero (derecha)

El SEGUNDO MÉTODO de medición consistió en comparar la superficie de las dos cubiertas con una superficie de referencia, a través de la toma de imágenes fotográficas, **Figura 124**.

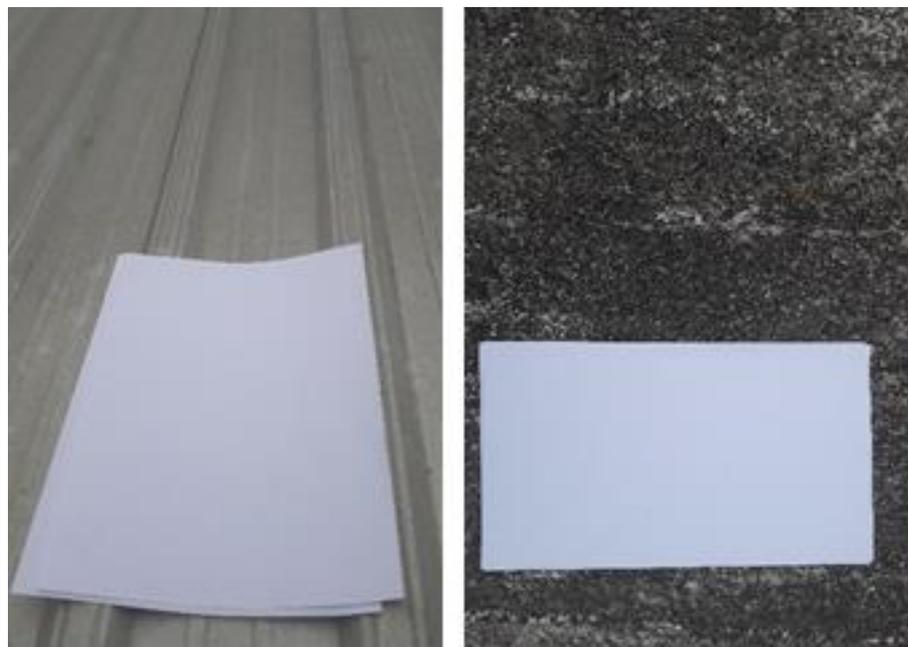


Figura 124 Proceso del método de medición del factor de reflectividad a través de imágenes fotográficas. CL (izquierda) y CP (derecha).

Cada imagen se procesó a través de un software gráfico [Adobe, 2017], para obtener simultáneamente el histograma óptico de cada superficie y la superficie de referencia, **Figura 125**.

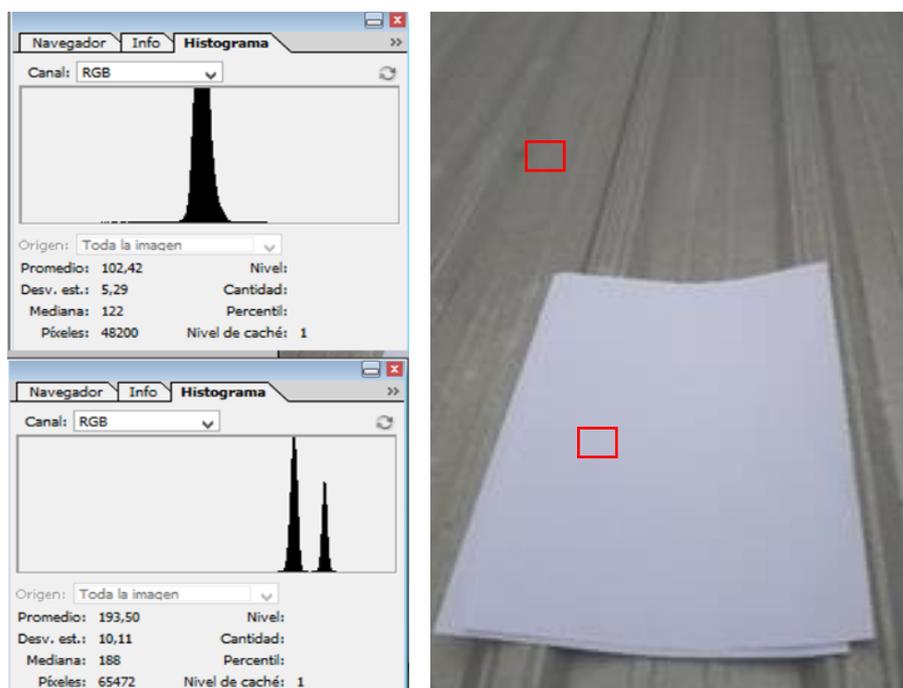


Figura 125 Histogramas ópticos de la superficie de referencia (abajo izquierda) y la superficie metálica (arriba izquierda), imagen de las superficies medidas (derecha).

La superficie de referencia utilizada fue una hoja de papel de color blanca, 100% opaca. Asumiendo que la superficie tiene una reflexión totalmente Lambertiana, el factor de reflectividad de esta superficie se obtuvo a través de Eq.6.

$$E \cdot r = \pi \cdot L \quad \text{Eq. 6}$$

Donde r es el factor de reflexión, L el valor de luminancias (cd/m²) y E el valor de luminancias (lux). De donde se tiene

$$r = \frac{\pi \cdot L}{E}$$

Los valores de L y E fueron obtenidos a través de mediciones. Los instrumentos utilizados para estas mediciones fueron un luxómetro Light meter LX1010B, y un Luminancímetro Konicaolta LS 110. La reflectancia solar obtenida de la superficie de referencia fue de 0.85.

Los valores de reflectividad al visible obtenidos por los dos métodos descritos han tenido una alta similitud. EL factor de reflectividad utilizado para la configuración de los parámetros de simulación ha sido obtenido promediando los valores de estos dos métodos.

Los resultados completos de los dos métodos utilizados para la medición de la reflectividad al visible de estas cubiertas se muestran a continuación.

– RESULTADOS: REFLECTIVIDAD AL VISIBLE

Los resultados obtenidos de la reflectividad al visible a través de la MEDICIÓN DE LAS ILUMINANCIAS que reciben y salen de cada una de las superficies, se muestran en la **Tabla 27**.

Tabla 27 Valores de la reflectividad al visible e iluminancias medidas que reciben y reflejan cada una de las superficies.

Muestras medidas	Iluminancia medida		Reflectividad
	Recibida	Reflejada	r
Superficie de Referencia (hoja blanca)	85000	7200	0,85
CL_new	115000	85000	0,74
CL_old1	112000	69000	0,62
CL_old5a	95000	48500	0,51
CL_old5b	55000	29000	0,53
CL_old5c	28500	17500	0,62
CL_old5d	33500	19000	0,57
CL_cool	75000	63000	0,85
CL_white	77000	59000	0,77
CL_green	65000	19900	0,31
CP	95000	23500	0,25
CP_white	78500	60000	0,76

Los resultados de la medición de la reflectividad al visible a través de las IMÁGENES FOTOGRÁFICAS se muestran en la **Tabla 28**. Además se muestran los valores de histograma con cada una de las superficies.

Tabla 28 Valores de reflectividad al visible e histograma de cada muestra medida de la CL y la CP.

Muestras medidas	Reflectividad	Histograma
	r	
Superficie de Referencia (hoja blanca)	0,83	200
CL_new	0,75	180
CL_old1	0,63	151
CL_old5a	0,52	122
CL_old5b	0,52	122
CL_old5c	0,60	144
CL_old5d	0,57	135
CL_cool	0,86	203
CL_white	0,78	184
CL_green	0,30	71
CP	0,25	58
CP_white	0,77	183

Las imágenes de todas las muestras y las gráficas de cada histograma se muestran en la **Tabla 29**.

Tabla 29 Imágenes e Histograma de cada una de las muestras medidas.

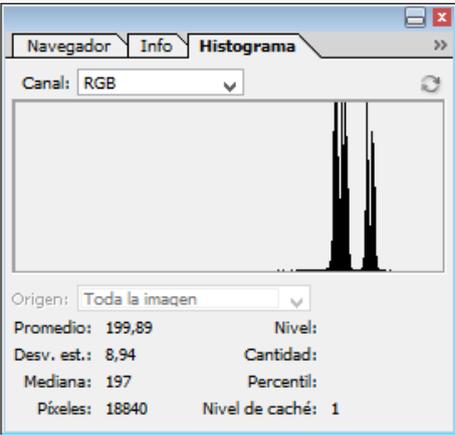
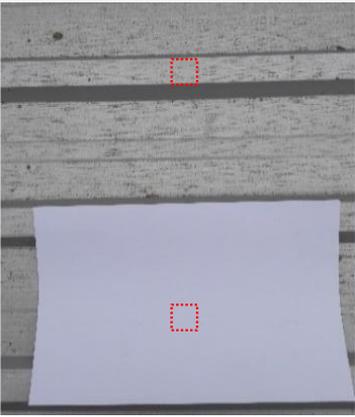
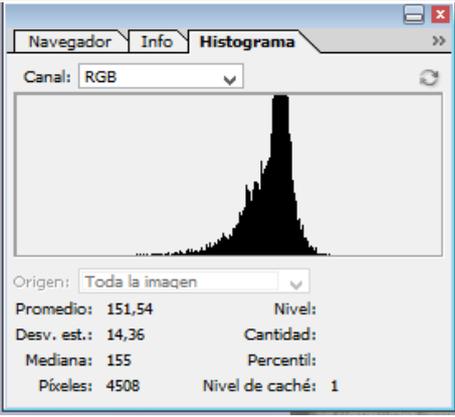
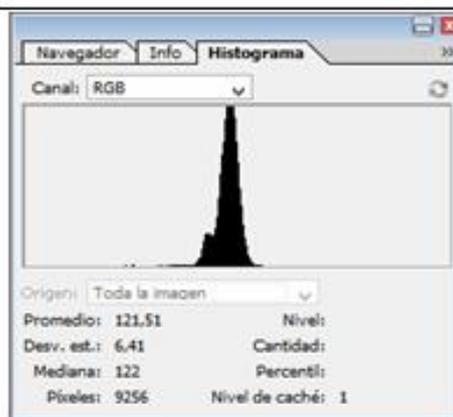
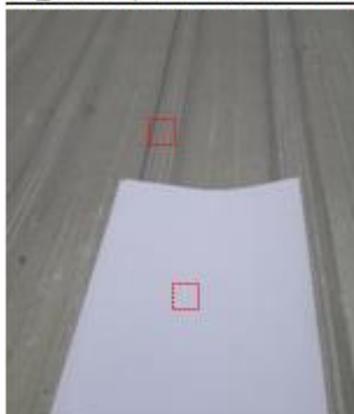
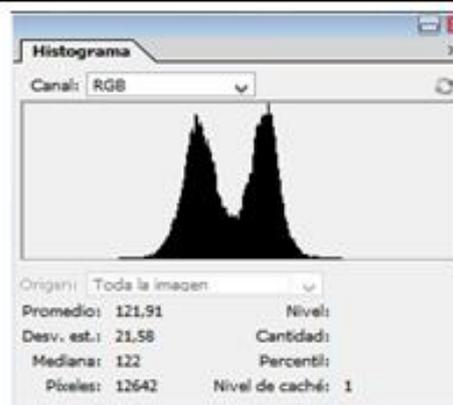
IMAGEN	HISTOGRAMA
<p>Superficie de referencia</p> 	 <p>Canal: RGB</p> <p>Origen: Toda la imagen</p> <p>Promedio: 199,89 Nivel:</p> <p>Desv. est.: 8,94 Cantidad:</p> <p>Mediana: 197 Percentil:</p> <p>Píxeles: 18840 Nivel de caché: 1</p>
<p>CL_new</p> 	 <p>Canal: RGB</p> <p>Origen: Toda la imagen</p> <p>Promedio: 180,70 Nivel:</p> <p>Desv. est.: 40,70 Cantidad:</p> <p>Mediana: 197 Percentil:</p> <p>Píxeles: 2240 Nivel de caché: 1</p>
<p>CL_old 1</p> 	 <p>Canal: RGB</p> <p>Origen: Toda la imagen</p> <p>Promedio: 151,54 Nivel:</p> <p>Desv. est.: 14,36 Cantidad:</p> <p>Mediana: 155 Percentil:</p> <p>Píxeles: 4508 Nivel de caché: 1</p>

IMAGEN	HISTOGRAMA
--------	------------

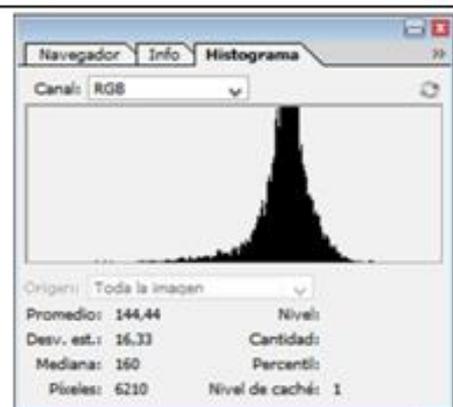
CL_old5a (caso de validación 1)



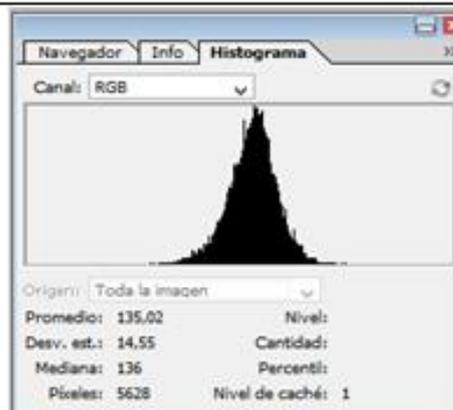
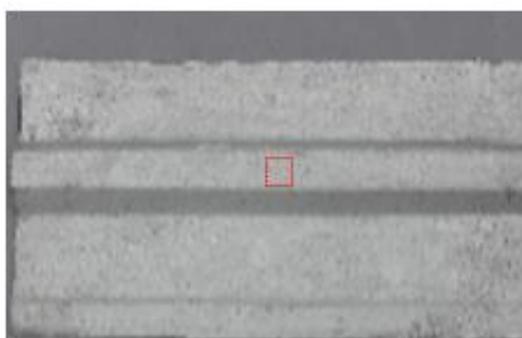
CL_old5b



CL_old5c



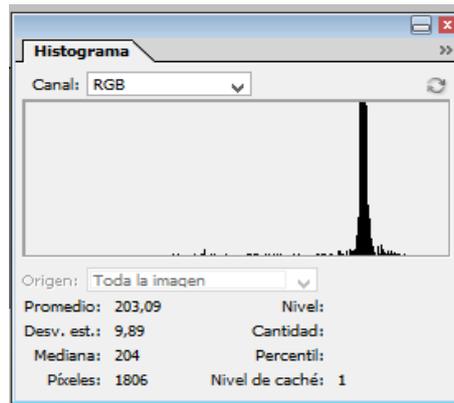
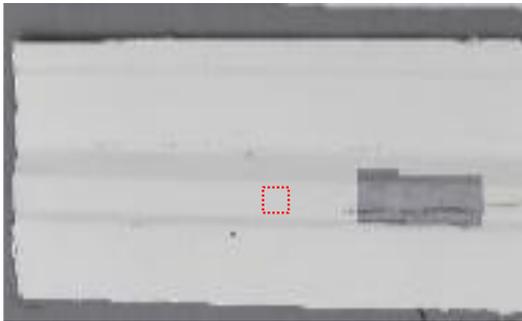
CL_old5d



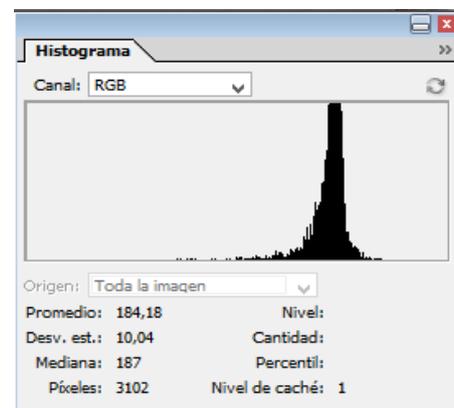
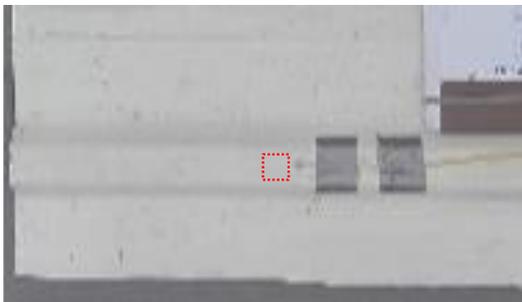
IMAGEN

HISTOGRAMA

CL_cool



CL_white



CL_green

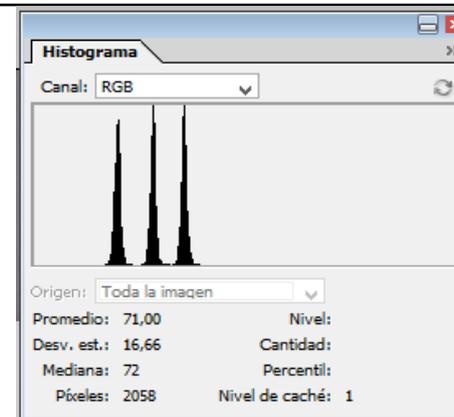
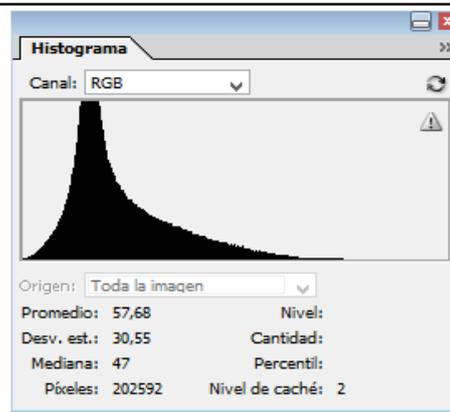
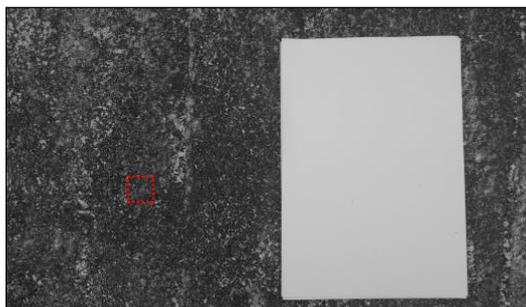
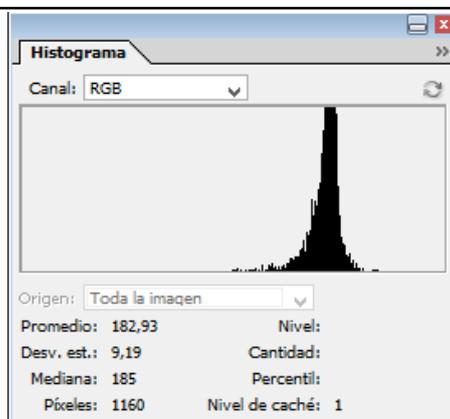


IMAGEN	HISTOGRAMA
--------	------------

CP



CP_WHITE



– PROCESO DE MEDICIÓN: EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO

El método utilizado para obtener el valor de esta propiedad radiativa consiste en medir simultáneamente la temperatura superficial y temperatura radiante de cada cubierta.

Estas dos temperaturas fueron medidas con el uso de un termómetro multilogger Amprobe TMD 56 + Termopar tipo K para la temperatura superficial, y una cámara infrarroja (ajustada a una emisividad de 1) para la temperatura radiante. Para medir la temperatura radiante se utilizaron dos tipos de cámaras para este proceso: una FLIR I7 y una InfRec H2640.

A través del software de estas cámaras (FLIR Tools, Infracore Analyzer Lite), se realizó la comparación de las dos mediciones, y se procedió a igualar la temperatura radiante (cámara infrarroja) con la temperatura superficial (termopar), en función de la modificación del factor de emisividad.

Al conseguir la igualdad de la temperatura superficial y la temperatura radiante, se obtuvo el factor de emisividad al infrarrojo térmico de cada una de las superficies, **Figura 126**.

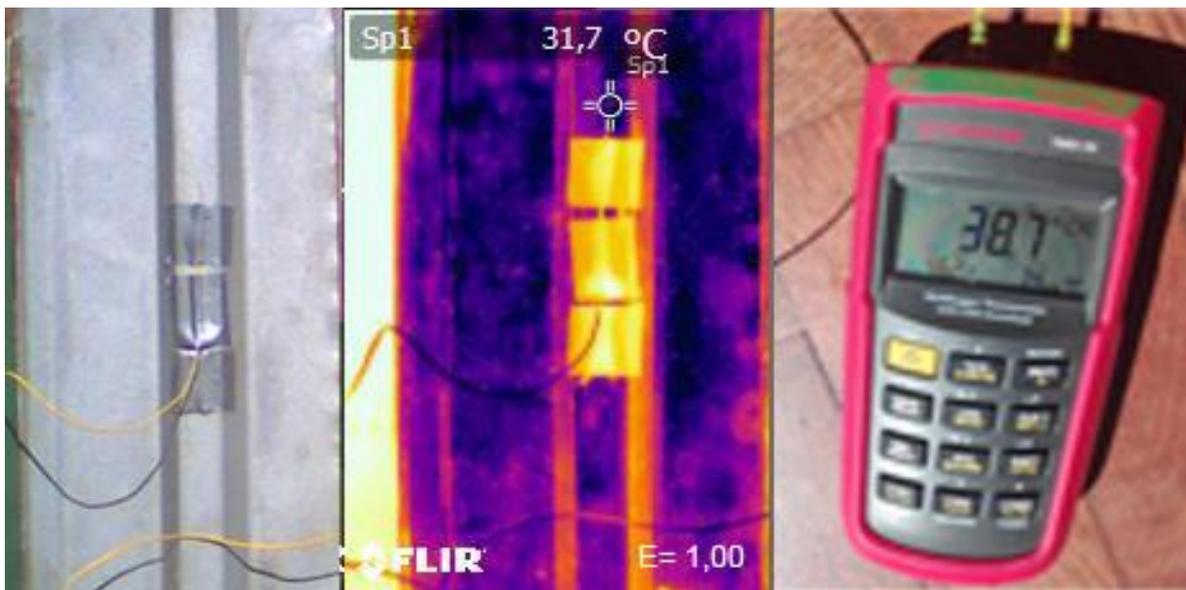


Figura 126 Proceso de medición de la emisividad al infrarrojo térmico. Imagen real (izquierda), datos temperatura radiante (medio) y datos temperatura superficial (derecha).

Los resultados completos del proceso de medición de la emisividad al infrarrojo térmico se muestran a continuación.

– RESULTADOS: EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO

A continuación se muestran los valores de las mediciones de la temperatura radiante y la temperatura superficial, que fueron tomadas para la obtención de la emisividad de cada una de las muestras analizadas, **Tabla 30**.

Tabla 30 Valores de emisividad al infrarrojo térmico, temperatura radiante, y temperatura superficial de todas las muestras medidas.

Valores de emisividad			
MUESTRA	EMISIVIDAD	Temperatura radiante e=1,00	Temperatura superficial
CL_new	0,13	31,7	45
CL_old1	0,25	21,7	26,7
CL_old5a	0,30	34,5	41,8
CL_old5b	0,50	41	49,2
CL_old5c	0,55	33	35,4
CL_old5d	0,65	37,3	45,6
CL_cool	0,90	32,4	32,1
CL_white	0,95	34,4	34,6
CL_green	0,95	42,6	42,8
CP	0,90	26,1	26,4
CP_white	0,95	24,1	24,5

La imagen real y térmica de cada una de las muestras medidas se muestra en la **Tabla 31**.

Tabla 31 Imagen real y térmica de todas las muestras medidas.

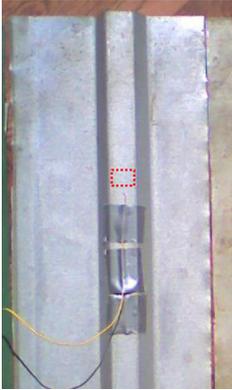
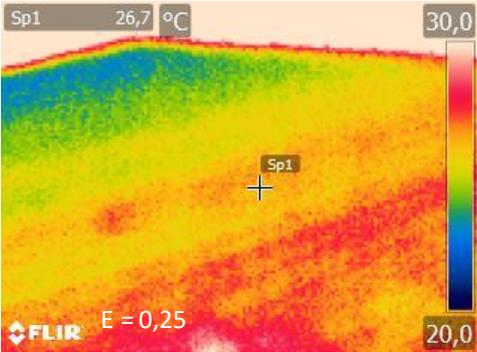
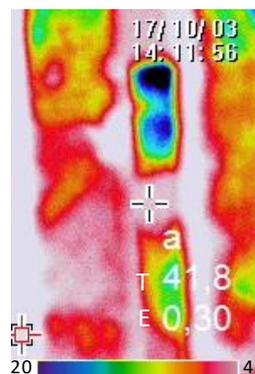
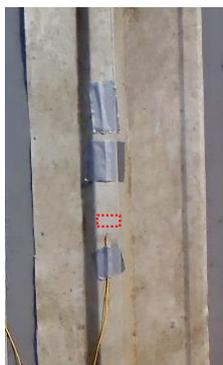
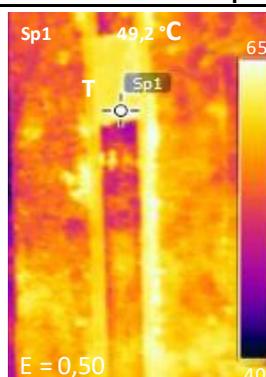
IMAGEN	IMAGEN TÉRMICA		
CL_new	Ta= 22,00	e=0.13	T_superficial= 45
	 <p>Cámara FLIR I7</p>		
CL_old1	Ta= 22	e= 0.25	T_superficial= 26.7
	 <p>Cámara FLIR I7</p>		

IMAGEN	IMAGEN TÉRMICA		
CL_old5a	Ta= 29,00	e= 0.30	Tsuperficial= 41,8



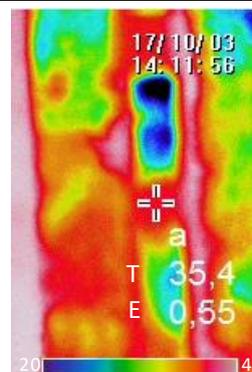
Cámara InfRec H2640

CL_old5b	Ta= 22,00	e= 0.50	Tsuperficial= 49,2
----------	-----------	---------	--------------------



Cámara FLIR I7

CL_old5c	Ta= 29,00	e=0.55	T_superficial= 35,4
----------	-----------	--------	---------------------

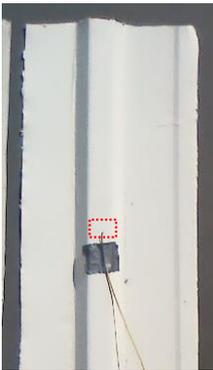
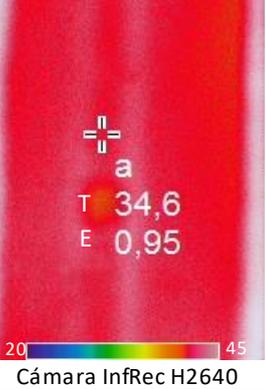
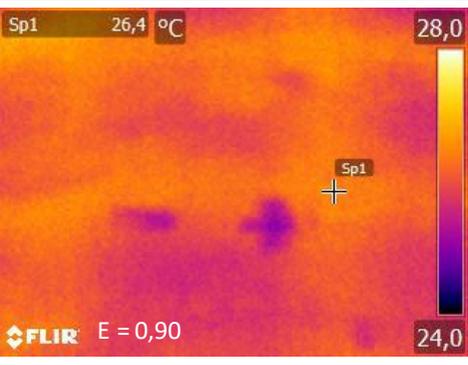


Cámara InfRec H2640

CL_old5d	Ta= 22,00	e=0.65	T_superficial= 45,6
----------	-----------	--------	---------------------



Cámara FLIR I7

IMAGEN	IMAGEN TÉRMICA		
CL_cool	Ta= 29,00	e=0.90	T_superficial= 32,1
			
CL_white	Ta= 29,00	e=0.95	T_superficial= 34,7
			
CL_green	Ta= 29,00	e=0.95	T_superficial= 42,8
			
IMAGEN	IMAGEN TÉRMICA		
CP	Ta= 22,00	e= 0.90	Tsuperficial= 26,4
			

A 2.2.3 PARÁMETROS DE VALIDACIÓN.

Para la validación de los resultados simulados se han medido 3 parámetros en los dos casos de validación:

- La temperatura superficial exterior (T_s)
- La temperatura superficial interior (T_{si}) y
- La temperatura del aire interior (T_{ai})

A continuación se detallan los procesos de medición y los resultados obtenidos de estos parámetros.

– PROCESO DE MEDICIÓN

TEMPERATURA SUPERFICIAL EXTERIOR

Las mediciones de estos parámetros se las realizó simultáneamente en el periodo del 06 al 12 de octubre de 2016. Los instrumentos utilizados fueron dos Data logger Amprobe con doble entrada de termo par tipo K. La toma de mediciones se realizó en intervalos de 10 min. La especificación técnica de la instrumentación utilizada se muestra en el *APARTADO A2.4 INSTRUMENTACIÓN*

En cuanto a la CL, se midió sólo la temperatura superficial exterior, **Figura 127**. De acuerdo a la bibliografía analizada, por la baja resistencia térmica de la lámina metálica, la temperatura superficial exterior e interior de esta cubierta son iguales [Biwole, Woloszyn and Pompeo, 2008] [Escobar, 2013].

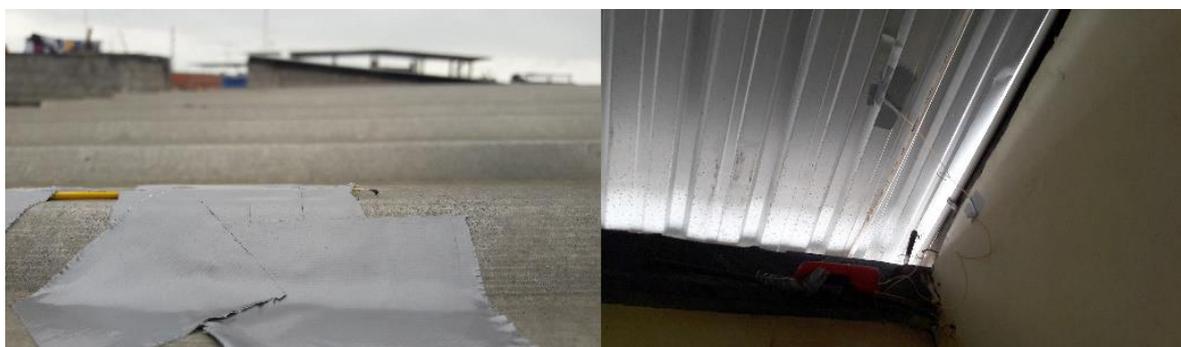


Figura 127 Medición de la temperatura superficial exterior (T_s) e interior (T_{si}) de la CL.

La superficie medida fue la cubierta de la habitación sur, como ya se especificó. El termopar se ubicó sobre la cresta de la cubierta metálica en una de las esquinas de la habitación, **Figura 128**.

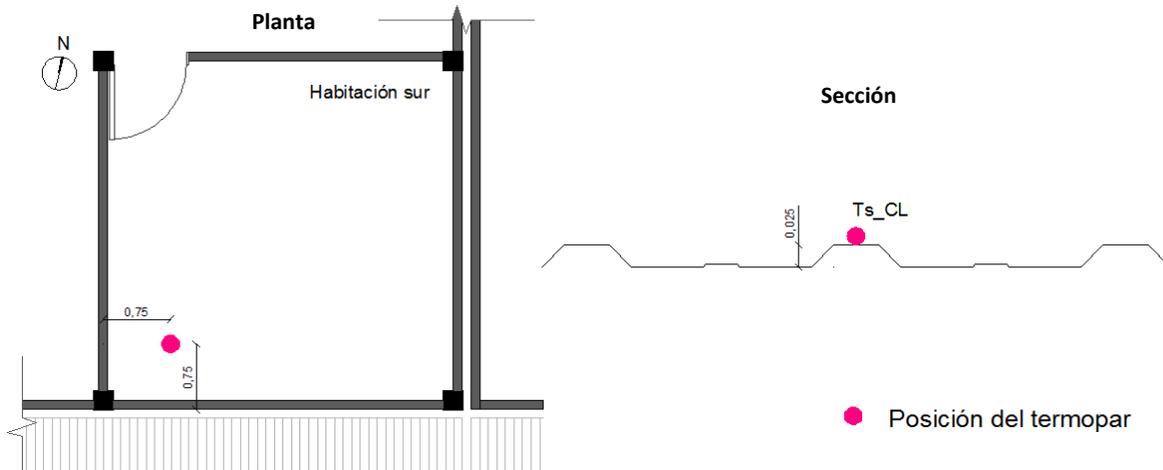


Figura 128 Posición del Termopar en la CL

En lo que respecta a las mediciones de la CP se realizaron simultáneamente en la superficie exterior y la superficie interior del forjado, **Figura 129**.



Figura 129 Medición de la temperatura superficial exterior (T_s) e interior (T_{si}) de la CP.

Cómo se especificó previamente, el espacio medido fue la cubierta del dormitorio sur. El termopar se ubicó en el centro de esta superficie sobre y bajo el nervio de la cubierta, **Figura 130**.

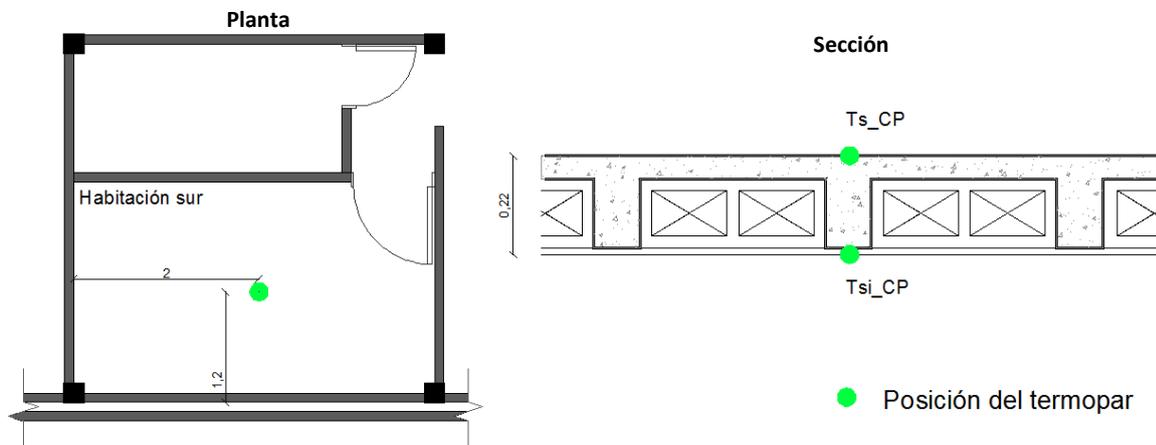


Figura 130 Posición del termopar en la CP.

TEMPERATURA DEL AIRE INTERIOR

Para la medición de la temperatura del aire interior se utilizó un termómetro Testo 174H, ubicado a una altura de 1.7 m. Los datos fueron recolectados cada 15 min. Las especificaciones técnicas de la instrumentación utilizada se muestran en el APARTADO A2.4 INSTRUMENTACIÓN

En el caso de la CL, el termómetro se lo colocó sobre un estante a una altura de 1.8 m, **Figura 131**.

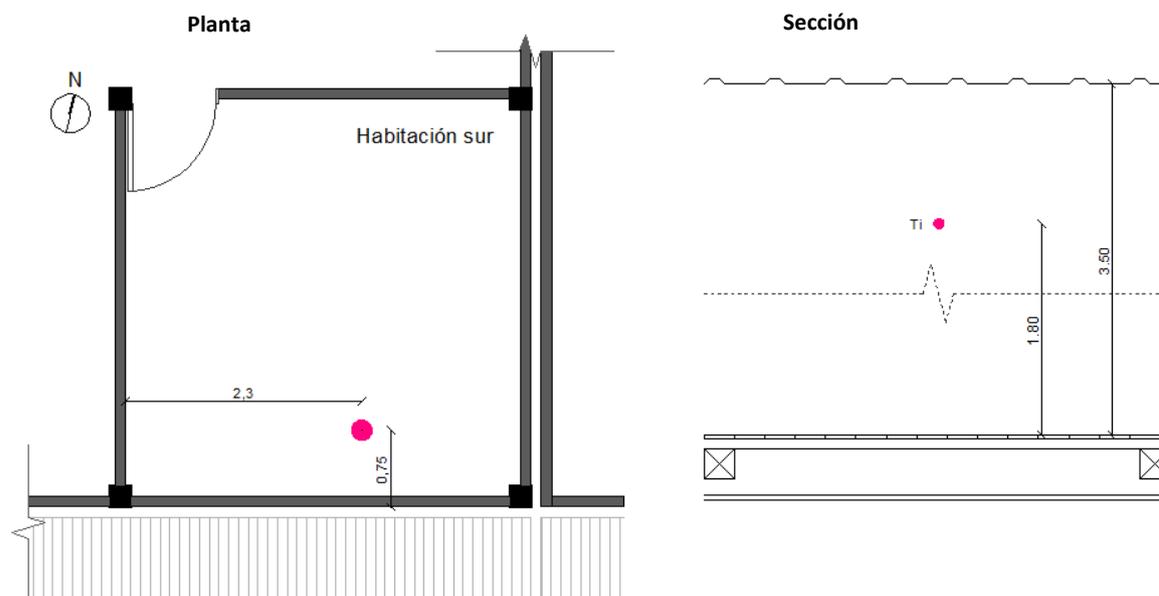


Figura 131 Posición del termo higrómetro en el espacio interior del caso de validación 1: CL.

En cuanto a la cubierta pesada, el termo-higrómetro se lo colocó a 1.5m sobre una estantería de la habitación, **Figura 132**.

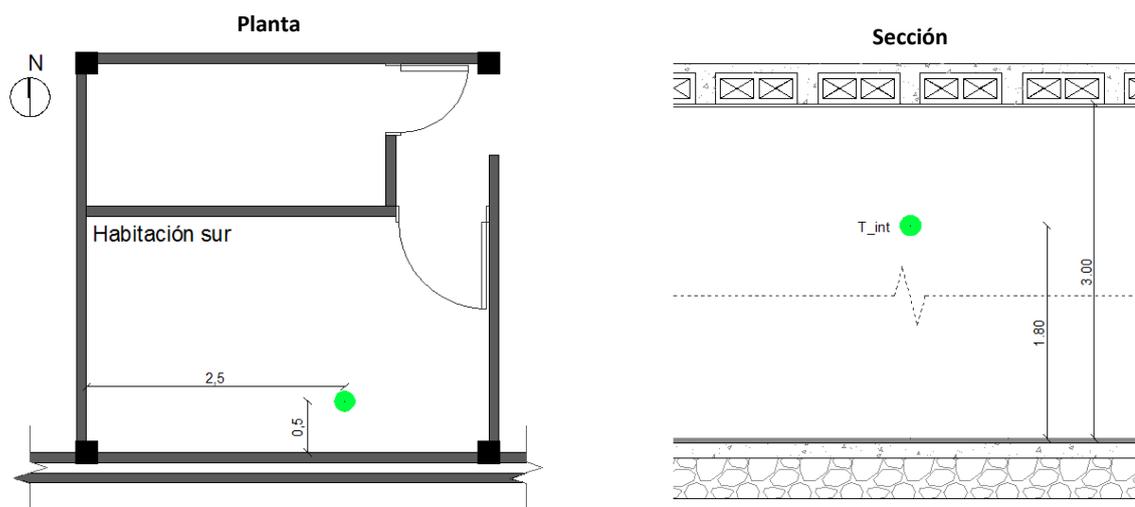
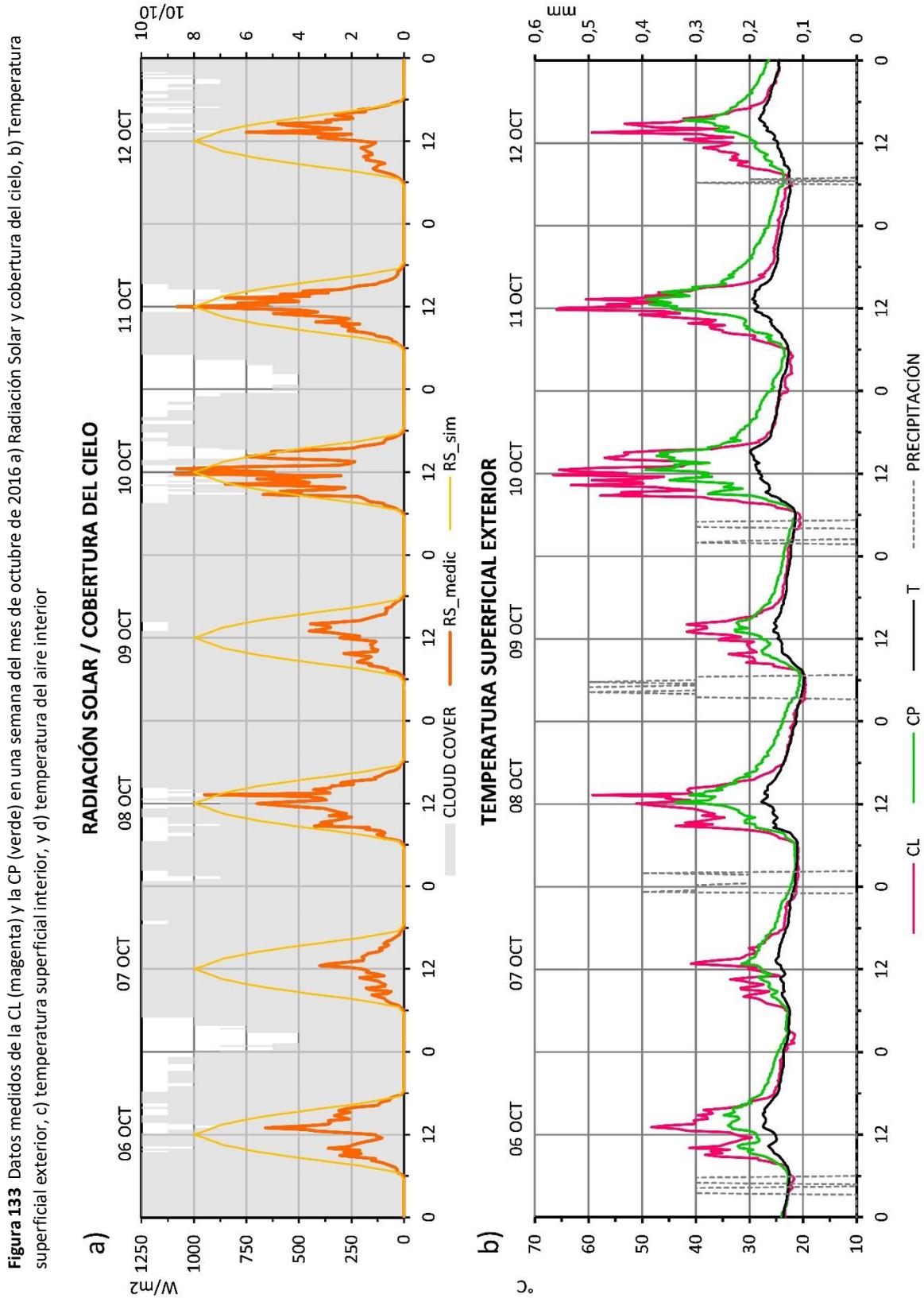
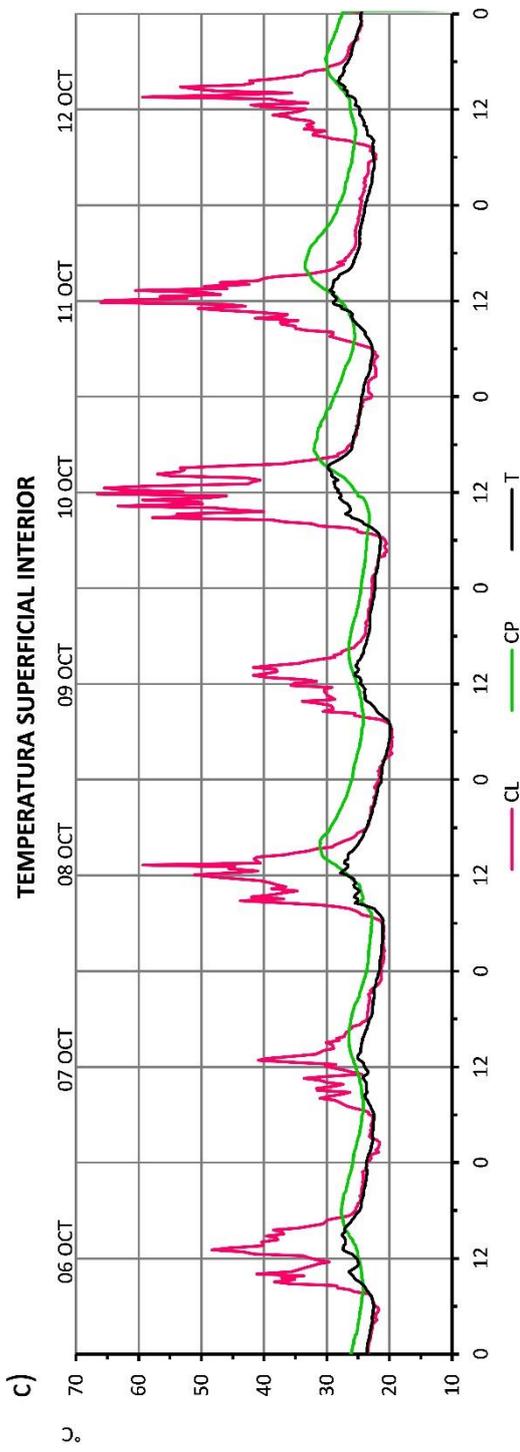


Figura 132 Posición del termo higrómetro en el espacio interior del caso de validación 2: CP.

RESULTADOS

Este apartado muestra los resultados de los parámetros de validación medidos en la CL y la CP, de manera conjunta con los datos de las condiciones climáticas medidas en ese periodo, **Figura 133**.





A partir de estos resultados se ha realizado un análisis a detalle del desempeño térmico de cada uno de los parámetros de validación de las dos cubiertas. Este análisis se ha enfocado en los días establecidos como el Día Promedio y el Día Extremo.

– **TEMPERATURA SUPERFICIAL EXTERIOR**

En este apartado se analiza los resultados de la temperatura superficial exterior de las cubiertas de manera conjunta con los factores climáticos medidos: la radiación solar, la cobertura del cielo y la temperatura del aire. De acuerdo con estos resultados, en el periodo diurno, la radiación solar tiene una influencia determinante sobre la temperatura superficial exterior (T_s) de ambas cubiertas. De acuerdo a estos resultados, el mismo comportamiento errático que se observa en la curva del flujo solar, **Figura 134 a**, se manifiesta en la temperatura exterior de estas superficies, **Figura 134 b**, sin embargo la influencia de este flujo es más evidente e instantáneo en la CL (magenta) que en la CP (verde).

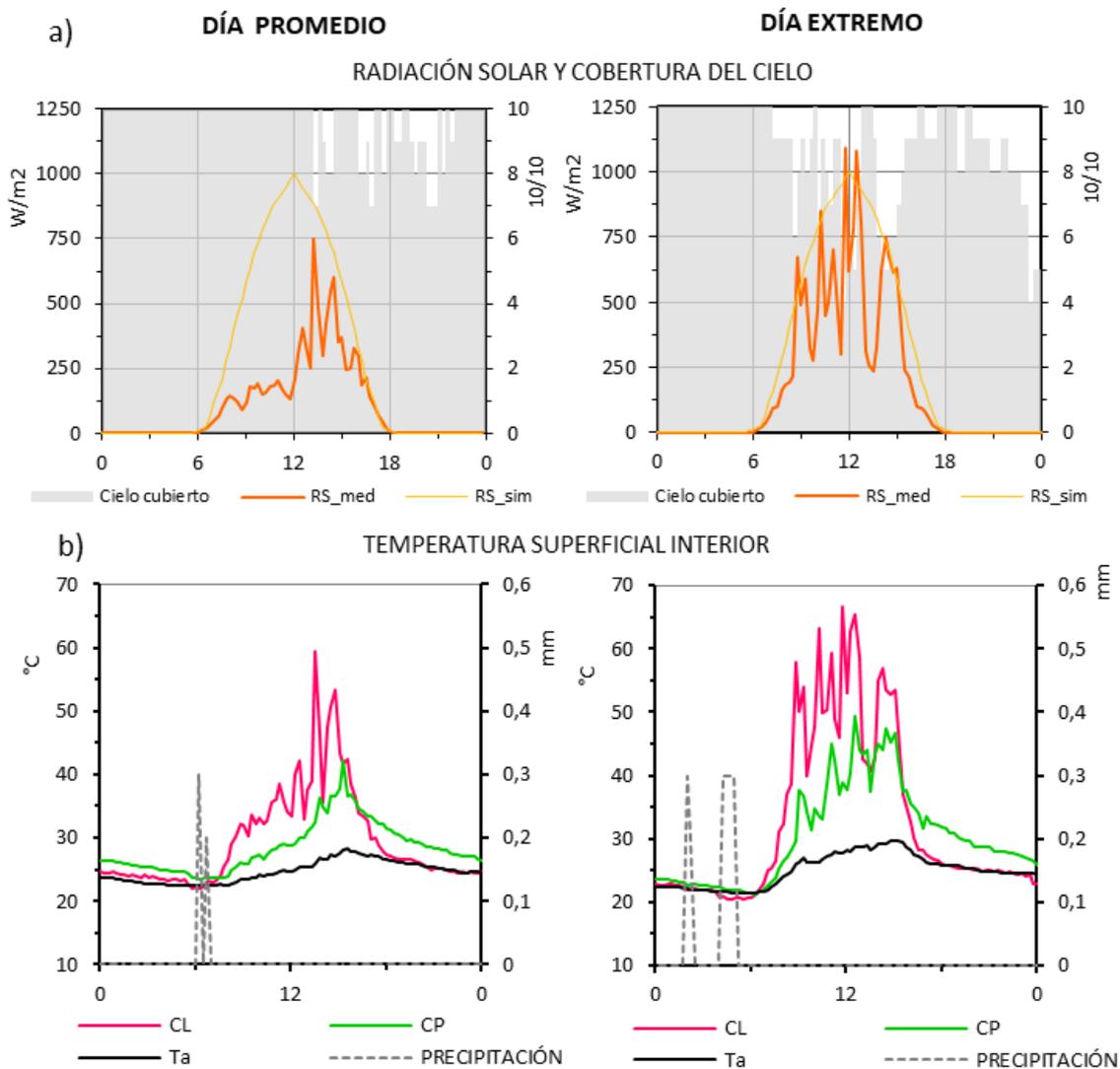


Figura 134 a) Radiación solar simulada (RS_simul), radiación solar medida (RS_med) y porcentaje de cielo cubierto medido (cielo cubierto). b) temperatura superficial exterior de la cubierta liviana (magenta) y pesada (verde), temperatura del aire exterior (negro).

Cuando la radiación solar aparece (06h00) tanto la CL como la CP incrementan su temperatura instantáneamente. Sin embargo, estas dos curvas crecen con dos pendientes diferentes hasta alcanzar diferentes máximos de temperatura. En el Día Extremo cuando la radiación máxima es de 1050 W/m^2 , la CL alcanza 65°C de temperatura máxima, mientras que la CP 50°C . En cambio, en el Día Promedio, con un máximo de radiación de 750 W/m^2 , la CL alcanza 60°C y la CP 42°C .

Estos resultados evidencian la diferente respuesta térmica que tienen estas dos cubiertas expuestas al mismo flujo solar. Este comportamiento se debe a los diferentes parámetros térmicos que tienen la CL y la CP.

Si se analiza la correlación entre las temperaturas exteriores de las cubiertas con los valores de radiación solar en el periodo diurno, **Figura 135**, la CL muestra un comportamiento más dependiente de la radiación solar que la CP. De acuerdo a este análisis, la CL muestra un coeficiente de determinación (R^2) de 0.89 mientras que la CP de 0.53. Estos valores confirman que la radiación solar tiene un impacto mayor sobre la temperatura superficial exterior de la CL que en la CP.

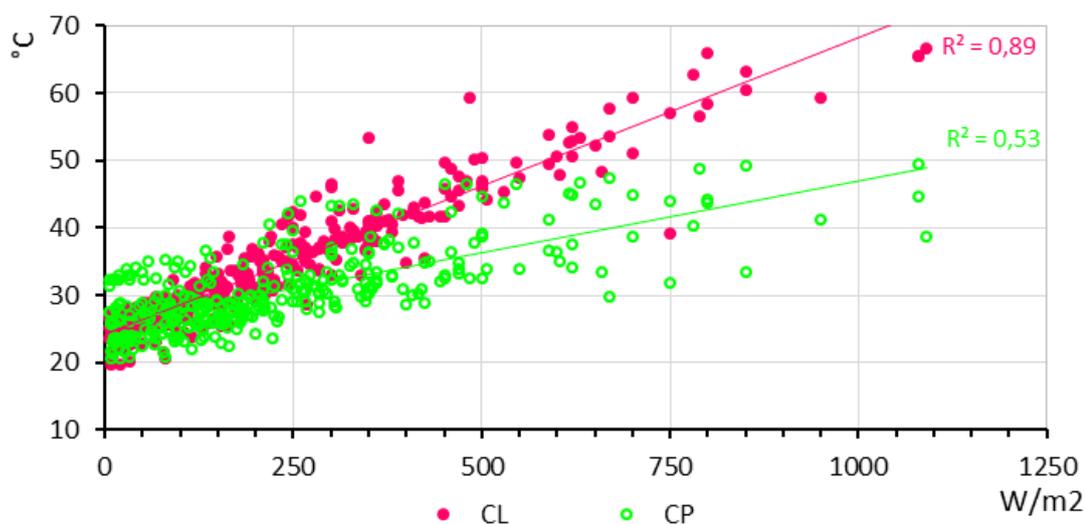


Figura 135 Coeficiente de determinación (r^2) entre la radiación solar y las temperaturas superficiales exteriores de la CL y la CP.

Debido a la baja emisividad y baja masa de la CL, en el periodo diurno, la respuesta térmica de este elemento está condicionada de manera principal por el flujo de radiación solar, y en menor proporción por el flujo de onda larga. Mientras que la CP, aunque también influenciada por el flujo solar, su comportamiento térmico también depende en gran medida del flujo que emite hacia el cielo, que a su vez tienen una gran influencia por su alta emisividad y su alta masa térmica.

El comportamiento térmico de estas dos superficies también está condicionado por los movimientos del aire, sin embargo la influencia de este factor se analizará más adelante.

De acuerdo a la **Figura 135**, conforme se incrementa la radiación solar la T_s de la CL alcanza mayores valores que T_s de la CP, lo que implica que a una mayor radiación solar mayor es la diferencia térmica entre estas dos cubiertas.

Sin embargo, por debajo de los 250W/m^2 las dos cubiertas mantienen temperaturas similares, e inclusive por debajo de los 150W/m^2 la CP tiene una mayor temperatura que la CL. Estos valores de radiación, menores a 250W/m^2 , corresponden a los periodos de la tarde.

En el momento en que la radiación decrece sustancialmente tanto en el Día Promedio como Extremo (15h00 a 16h00 aproximadamente) **Figura 134**, la temperatura superficial de la CL se reduce de manera inmediata, mientras que la CP se reduce de manera más lenta, lo cual evidencia la influencia de la masa térmica sobre la liberación de calor de estas dos cubiertas.

Debido a la baja capacidad de enfriamiento del cielo en esta región, la alta masa térmica de la CP restringe más la liberación de calor que en la CL con una menor emisividad pero con una baja masa térmica. Este retraso de liberación de calor que tiene la CP con respecto a la CL se extiende hasta todo el periodo nocturno.

Tanto en los dos días de análisis, **Figura 134**, como en el resto de los días medidos, **Figura 133**, se repite un comportamiento similar en las dos cubiertas. En el periodo nocturno la CL, debido a su baja masa térmica, reduce su temperatura a valores similares que la T_a , mientras que la CP, por su alta masa térmica y la baja capacidad de enfriamiento del cielo, mantiene una temperatura varios grados por encima que el aire y la CL, durante toda la noche e inclusive hasta el amanecer del siguiente día.

En consecuencia, a la CP le toma más tiempo en calentarse que a la CL, sin embargo también tarda más en enfriarse.

Sin embargo existen pequeñas variaciones que es necesario hacer notar, y son resultado de la influencia de ciertas condiciones climáticas. Por ejemplo, en el periodo nocturno del 10 al 11 de octubre (24h00- en el h00) las dos cubiertas muestran un decrecimiento abrupto de su temperatura. Lo mismo sucede en el primer periodo nocturno del 07 de octubre. Estas dos reducciones de temperatura coinciden cuando los mínimos valores de cobertura de cielo en este periodo (4/10), lo que implica que estas reducciones se deben al INCREMENTO DEL ENFRIAMIENTO RADIATIVO del cielo debido a la reducción de su temperatura.

Tanto en el día extremo como el 07 de octubre esta reducción es mayor en la CL (1.5°C) que en la CP (0.2°C). Por lo tanto, aunque el enfriamiento radiativo en este periodo y en este clima es reducido, en los momentos que este flujo aumenta su repercusión es mayor en la CL que en la CP. Debido a la alta masa térmica del CP, el incremento de la radiación hacia el cielo visto no es suficiente para causar un impacto significativo sobre la reducción de su temperatura.

Por otra parte, existen otras reducciones pronunciadas de temperatura en ambas cubiertas que no son causadas por el enfriamiento radiativo sino por las PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN debido a pequeñas precipitaciones.

En el Día Promedio con una precipitación de 0.3mm a las 06h00 las dos cubiertas se reducen 1.2°C. Mientras que en el Día Extremo con una precipitación de igual intensidad pero durante un periodo más largo, la CP reduce su temperatura hasta valores similares que la T_a y la temperatura de la CL **Figura 134**. En el periodo de mayor precipitación de todos los días medidos (02h00 – 06h00, 09 de octubre), cuando la precipitación alcanza los 0.5 mm la CP reduce su temperatura 2°C, mientras que la reducción en la CL es menor a 0.2°C, **Figura 133**. Por lo tanto, las pérdidas por evaporación tienen un mayor impacto en la CP que en la CL.

De acuerdo con estos resultados, LAS TEMPERATURAS EXTERIORES DE LA CL Y LA CP muestran un comportamiento opuesto tanto en el periodo diurno como en el nocturno. La CL registra temperaturas mayores que la CP en el periodo diurno, mientras que en el periodo nocturno sucede lo contrario. Estos comportamientos están estrechamente ligados a la diferente masa térmica de estas dos cubiertas y su relación con el flujo solar y el enfriamiento radiativo. Además, las mediciones de estas temperaturas han podido evidenciar la influencia de diferentes intercambios térmicos, como: el enfriamiento por radiación que tiene una mayor repercusión sobre la CL que en la CP, y el enfriamiento por evaporación con una mayor influencia en la CP que en la CL.

– **TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR**

Como se mencionó en el estado del arte, la superficie interior de una chapa metálica mantiene la misma temperatura que la superficie exterior [Gagliano *et al.*, 2012] [Dimoudi, Androutsopoulos and Lykoudis, 2006] [Lee *et al.*, 2009], lo que se ha corroborado con mediciones de esta investigación.

Esta reducción nula de temperatura, entre el exterior e interior de la CL, se debe a la baja resistencia térmica de la lámina metálica. Por otra parte, la CP debido a su mayor resistencia al flujo de calor, si ofrece una reducción significativa entre la temperatura máxima exterior y la temperatura máxima interior, desde 5°C hasta 18°C.

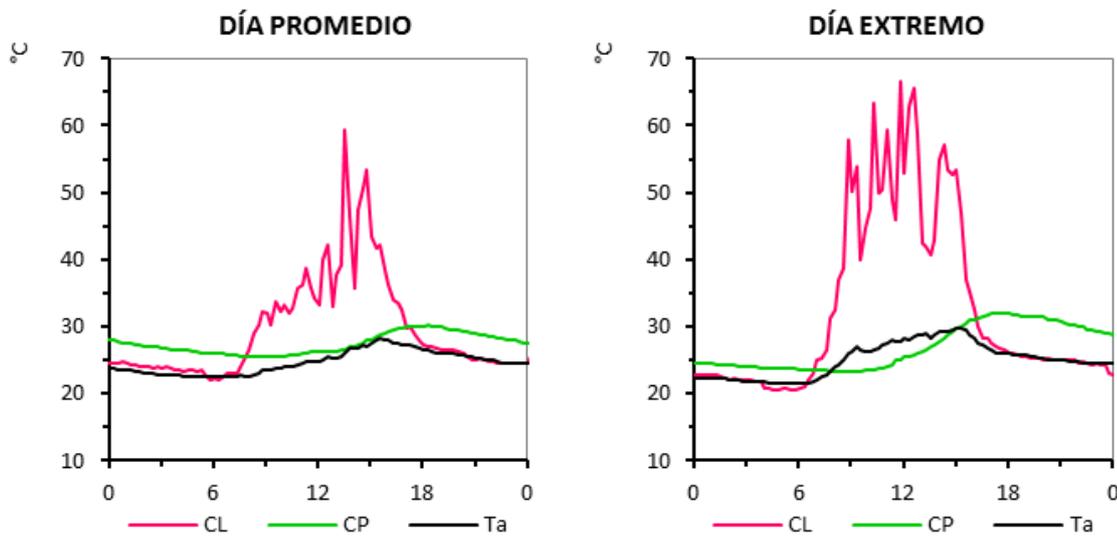


Figura 136 Temperatura superficial interior de la CL (magenta) y la CP (verde).

De acuerdo a estos resultados, **Figura 136**, al igual que en la superficie exterior, el desempeño térmico de estas dos cubiertas es opuesto entre el periodo diurno y nocturno.

En lo que respecta al PERIODO DIURNO, la T_{si} de la CL alcanza valores máximos de 60°C y 65°C en el Día Promedio y Extremo respectivamente, sin ningún retraso con respecto a su temperatura superficial exterior. Mientras que, la T_{si} de la CP llega hasta 30°C y 32°C en los mismos días, pero con un retraso de 4 hasta 5 horas, debido nuevamente a su propia resistencia y masa térmica.

Así la brecha entre las T_{si} máximas de estas dos cubiertas, $\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$, varía entre 30°C y 33°C y un desfase entre 4 y 5 horas, de acuerdo a los dos días de análisis.

En lo que respecta al PERIODO NOCTURNO, se repite el mismo comportamiento que en las temperaturas superficiales exteriores, la CL reduce su temperatura casi igual a la T_a , inmediatamente después que la radiación desaparece, mientras que la CP mantiene una temperatura varios grados más alta que estas, durante toda la noche. La CL se mantiene en una temperatura promedio alrededor de 23°C, mientras que la CP tiene un promedio alrededor de 28°C, de acuerdo los dos días de análisis.

Las reducciones de temperatura que se registraron en la superficie exterior en el periodo nocturno, debido a pérdidas por radiación o evaporación, sólo tienen repercusión sobre la T_{si} de la CL, mientras que en la T_{si} de la CP estos cambios son imperceptibles o nulos, debido a su propia resistencia térmica. En consecuencia, en el periodo nocturno la brecha térmica entre estas dos cubiertas ($\Delta T_{si_CL} - T_{si_CP}$) es de -3°C y -5°C en el Día Promedio y en el Día Extremo respectivamente.

– TEMPERATURA DEL AIRE INTERIOR

El último parámetro a analizar de estos resultados de mediciones es la temperatura del aire interior (T_{ai}), **Figura 137**.

La T_{ai} máxima de la CL es de 30°C y 34°C , mientras que la de la CP es de 28°C y 29°C , en el Día Promedio y Día Extremo respectivamente. Por tanto la diferencia de las T_{ai} máximas entre estas dos cubiertas ($\Delta T_{ai_CL} - T_{ai_CP}$) es de 2°C y 5°C en estos dos días de análisis. La T_{ai} en el caso de la CL no muestra ningún retraso con respecto al exterior, mientras que la CP presenta un desfase entre 5 y 6 horas.

En cuanto a los mínimos valores de la T_{ai} , la diferencia entre estas dos cubiertas ($\Delta T_{ai_CL} - T_{ai_CP}$) es de -2°C en el Día Promedio y de -4°C en el Día Extremo. La T_{ai} de la CP no se reduce por debajo de 25°C y la T_{ai} de la CL llega hasta los 21°C .

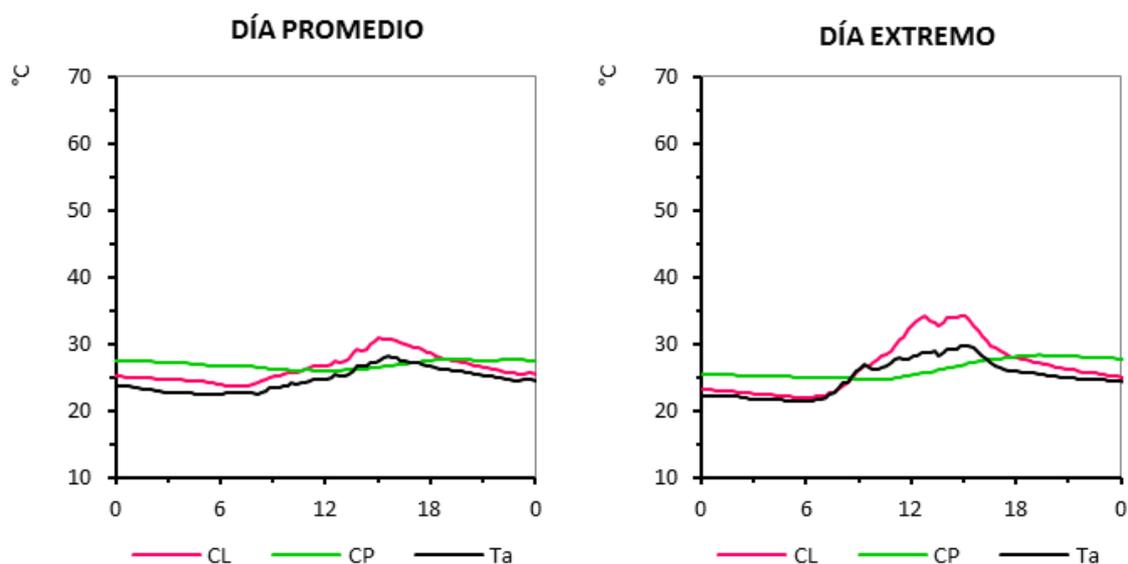


Figura 137 Temperatura del aire interior de la CL (magenta) y la CP (verde), en el Día Promedio y en el Día Extremo.

Al igual que con la temperatura superficial interior, la temperatura del aire interior de estas dos cubiertas presentan un comportamiento opuesto tanto en el periodo diurno como en el nocturno, con lo cual el promedio diario de estos dos espacios son muy similares, alrededor de 27°C en los dos días de análisis, **Figura 138**.

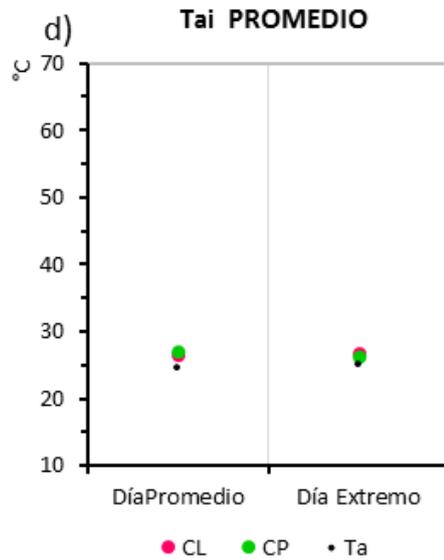


Figura 138 Valores promedios diarios de la temperatura del aire interior de la CL y la CP.

Aunque el promedio diario la temperatura del aire interior de la CL es muy similar a la CP e inclusive menor en ciertos días de medición, sus oscilaciones diarias son muy diferentes. La CP mantiene una T_{ai} muy constante con una oscilación diaria entre 1°C y 3.5°C, mientras que la CL presenta un comportamiento más variable, con una oscilación diaria entre 4°C y 12.5°C de acuerdo a todo el periodo de medición (06-12 octubre), **Figura 139**.

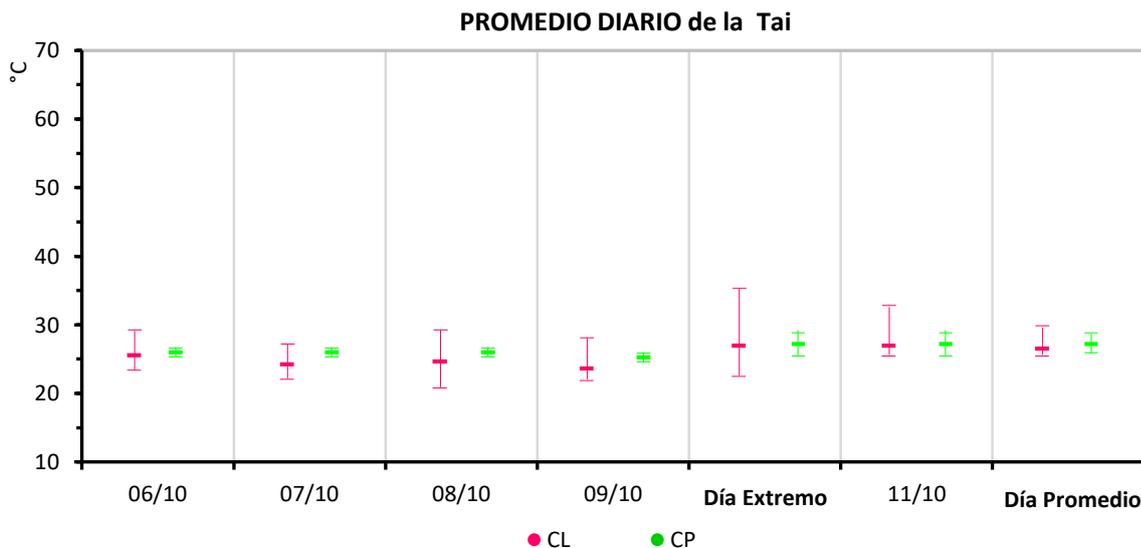


Figura 139 Valores máximos, mínimos y promedios diarios de la temperatura del aire interior de la CL y la CP, del 06 -12 octubre.

Por lo tanto, aunque la CL tenga un promedio diario de T_{ai} muy similar a la CP, debido a la menor oscilación de la CP esta cubierta presenta mejores condiciones ambientales en el espacio interior. Sumado a esto debido a las altas temperaturas que alcanza la Temperatura superficial interior en el periodo diurno la sensación térmica en este periodo se incrementa en gran medida.

En base a los resultados del espacio interior es necesario resaltar un aspecto de relevancia. En el caso de la CL se registra un comportamiento similar a la temperatura del aire exterior, por el contrario, la CP muestra un comportamiento totalmente diferente.

Por un lado, esto se debe a que la CL por su bajo espesor y alta conductividad ofrece una baja resistencia al paso del calor tanto del exterior hacia el interior como del interior hacia el exterior, al contrario de la CP. No obstante, la T_{ai} de la CL sigue la curva de la temperatura del aire exterior debido a las infiltraciones que presenta la propia instalación de esta cubierta. Esta observación sobre las infiltraciones se ha logrado determinar en base a las simulaciones realizada.

A2.3 REGISTRO FOTOGRÁFICO

A2.3.1 NUBOSIDAD DEL CIELO

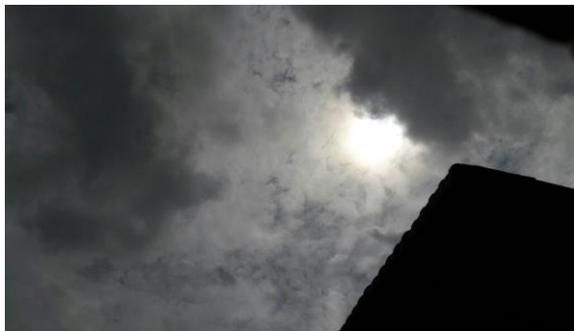
DÍA EXTREMO (10 de octubre): Radiación Solar: 4.35 kWh/m^2



08h00



09h30



11h00



12h30



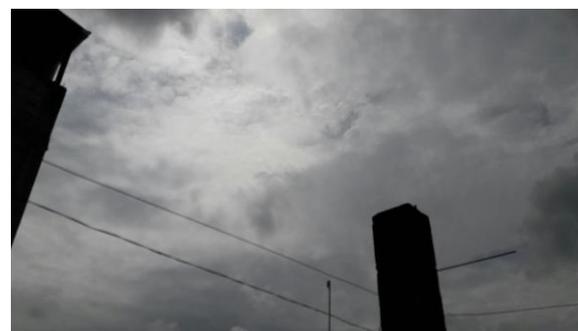
13h00



14h30



16h00



17h30

DÍA PROMEDIO (12 de octubre)
Radiación Solar: 2.6 kWh/m²



08h00



09h30



11h00



12h30



13h00



14h30



16h00



17h30

DÍA: 12 de diciembre
Radiación Solar: **2.7 kWh/m²**



08h00



10h30



12H00



13h30



15h30



16h30



17h30

DÍA MÁXIMO ABSOLUTO: 21 de diciembre
Radiación Solar: 5.9 kWh/m²



07h00



09h00



11h00



12h30



13h30



14h30



15h00



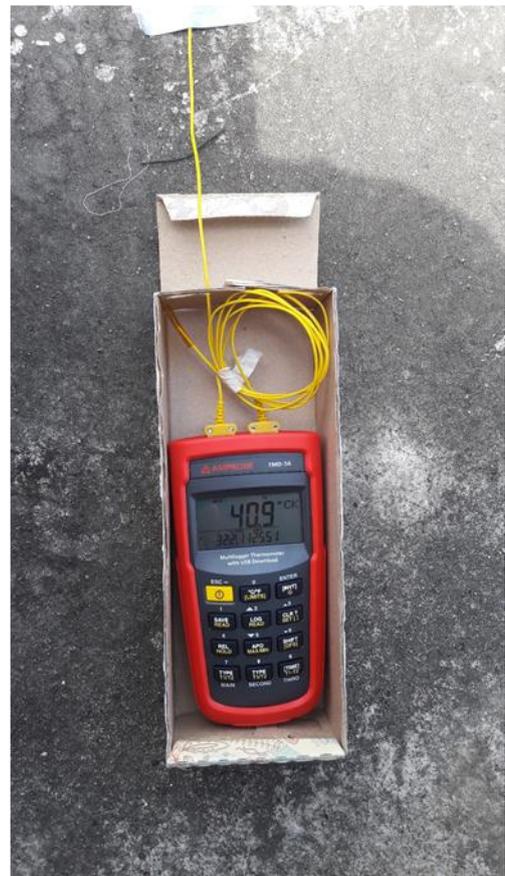
17h00

A2.3.2 TRABAJO DE CAMPO

– INSTALACION DE APÁRATOS DE MEDICIÓN EN LA CUBIERTA LIGERA METÁLICA



— **INSTALACION DE APÁRATOS DE MEDICIÓN EN LA CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN**



A2.4 INSTRUMENTACIÓN

– ESTACIÓN METEOROLÓGICA DEL AEROPUERTO VICTOR LARREA



Figura 140 Ubicación de la estación meteorológica 1 (Santa Rosa-El Oro-Ecuador). Imagen tomada de:
<https://www.google.es/maps/place/El+Cambio,+Ecuador/@-3.4442493,-79.9946556,209m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x9033121c14d47945:0x4afa1dc5b8584a45!8m2!3d-3.292249!4d-79.9024779>

CIUDAD:	Santa Rosa
COORDENADAS:	3°26'39''S, 79°59'38''O
FUENTE:	plataforma online Wunderground
CÓDIGO:	ID IELORO 05
HARDWARE:	Rainwise MK-III
SOFTWARE:	Rainwise IP-100
TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN:	Radio frecuencia
CARACTERÍSTICAS DEL FABRICANTE:	https://www.rainwise.com/products/attachments/6708/20150205013826.pdf

ESPECIFICACIONES GENERALES:

Temperatura del aire

Resolución:	0.056°C
Rango:	-55-85°C
Precisión:	+/-0.2°C a 25°C

Humedad

Resolución:	1%
Rango:	1-100%
Precisión:	2%, 4% arriba 90%

Velocidad del viento

Resolución:	0.045 m/s
Rango:	0-67 m/s
Precisión:	0.45 m/s

Dirección del viento

Resolución:	22.5°
Rango:	0-360°
Precisión:	+/- 11.25°

Presión Barométrica

Resolución:	0.34 mbar
Rango:	300 – 1100 mbar°
Precisión:	0.5 mbar

INTERVALOS DE MEDICIÓN

Temperatura del aire	10 min
Humedad	10 min
Velocidad del viento	10 min
Dirección del viento	10 min
Presión Barométrica	10 min

– ESTACIÓN METEOROLÓGICA EL CAMBIO

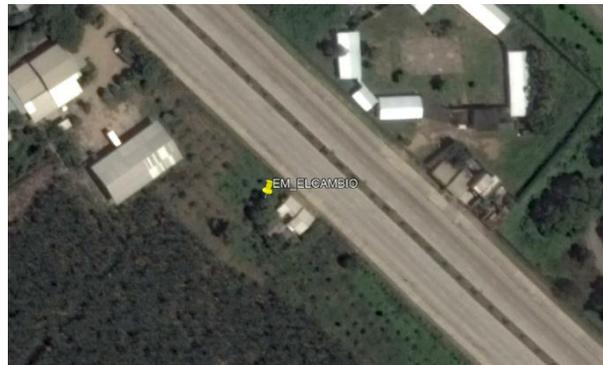


Figura 141 Ubicación de la estación *meteorológica 1* (El cambio-El Oro-Ecuador). *Imagen tomada de:*
<https://www.google.es/maps/place/El+Cambio,+Ecuador/@-3.3005406,-79.8987702,285m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x9033121c14d47945:0x4afa1dc5b8584a45!8m2!3d-3.292249!4d-79.9024779>

CIUDAD: El Cambio
COORDENADAS: 3°26'39''S, 79°59'38''O
ELEVACIÓN: 20m
FUENTE: plataforma online Wunderground
CÓDIGO: ID IELOROEL2
HARDWARE: Davis Vantage Pro2 Plus (Wireless)
SOFTWARE: Davis Vantage Pro2 Plus
TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN: Wireless
CARACTERÍSTICAS DEL FABRICANTE: _____

https://www.davisnet.com/product_documents/weather/manuals/07395-234_IM_06312.pdf

ESPECIFICACIONES GENERALES:

Radiación Solar (sensor)

Resolución: 1 W/m²
Rango: 0-1800 W/m²
Precisión: +5% escala complete
Cosine Response +/- 3% para ángulo de 0-75°

Temperatura del aire

Resolución: 0.1°C
Rango: -40-65°C
Precisión: 0.5°C

Humedad

Resolución:	1%
Rango:	1-100%
Precisión:	3%, 4% arriba 90%

Temperatura del rocío

Resolución:	0.1°C
Rango:	-76-54°C
Precisión:	1.5°C

Velocidad del viento

Resolución:	1 km/h
Rango:	3-322 km/h
Precisión:	3 km/h

Dirección del viento

Resolución:	1 °
Rango:	0-360 °
Precisión:	3 °

Presión Barométrica

Resolución:	0.1 hPa
Rango:	540 – 1100 hPa°
Precisión:	3 °

Presión Barométrica

Resolución:	0.1 hPa
Rango:	540 – 1100 hPa°
Precisión:	3 °

Precipitaciones diarias

Resolución:	0.2 mm
Rango:	0 – 999.9 mm
Precisión:	>4%

INTERVALOS DE MEDICIÓN

Radiación Solar	10 min
Temperatura del aire	10 min
Humedad	10 min
Temperatura del Rocío	10 min
Velocidad del viento	10 min
Dirección del viento	10 min
Presión Barométrica	10 min
Presión Barométrica	10 min
Precipitaciones diarias	10 min

– TERMO-HIGRÓMETRO

Medición continua de temperatura y humedad relativa.



Figura 142 Termo higrómetro TESTO 174H

HARDWARE: Data logger Testo 174 H
SOFTWARE: Testo Comfort Software Basic 5.0
TIPO DE Sonda: Sensor de temperatura NTC y sensor de humedad capacitivo interno.
RESOLUCIÓN: 0.1% HR, 0.1°C
RANGO DE MEDICIÓN: De 0 a 100% HR, de -20 a +70°C
PRECISIÓN TEMPERATURA: +/- 0.5°C (de -20 a +70°C)
PRECISIÓN DE HUMEDAD: +/- 3% (de 2% a 98%)
CARACTERÍSTICAS DEL FABRICANTE:

https://media.testo.com/media/47/aa/d7688350bfd/testo-174_Instruction-Manual.pdf

INTERVALOS DE MEDICIÓN: 10 min

- **DATA LOGGER + TERMOPAR TIPO K**
(Medición continua de temperatura superficial)



Figura 143 Datalogger + Termopar tipo K AMPROBE.

HARDWARE: Amprobe TMD 56, Multilogger Thermometer

SOFTWARE: Amprobe

TIPO DE SONDA: Termopar tipo K, 2 entradas (T1, T2)

RESOLUCIÓN: 0.1°C

RANGO DE MEDICIÓN: -200 a +1372°C

PRECISIÓN TEMPERATURA: +/- 0.3°C (de -50 a +1372°C)

CABLE: Cable aislado de teflón

PRECISIÓN TEMPERATURA: +/- 2.2°C (de 0 a +800°C)

MEMORIA: 16000 datos

CARACTERÍSTICAS DEL FABRICANTE:

http://content.amprobe.com/manualsA/TMD-55_TMD-55W_TMD-56_Multilogger-Thermometers_Manual.pdf

INTERVALOS DE MEDICIÓN: 10 min

– **TERMÓMETRO DE INFRARROJO.**
(Medición puntual de temperatura radiante)

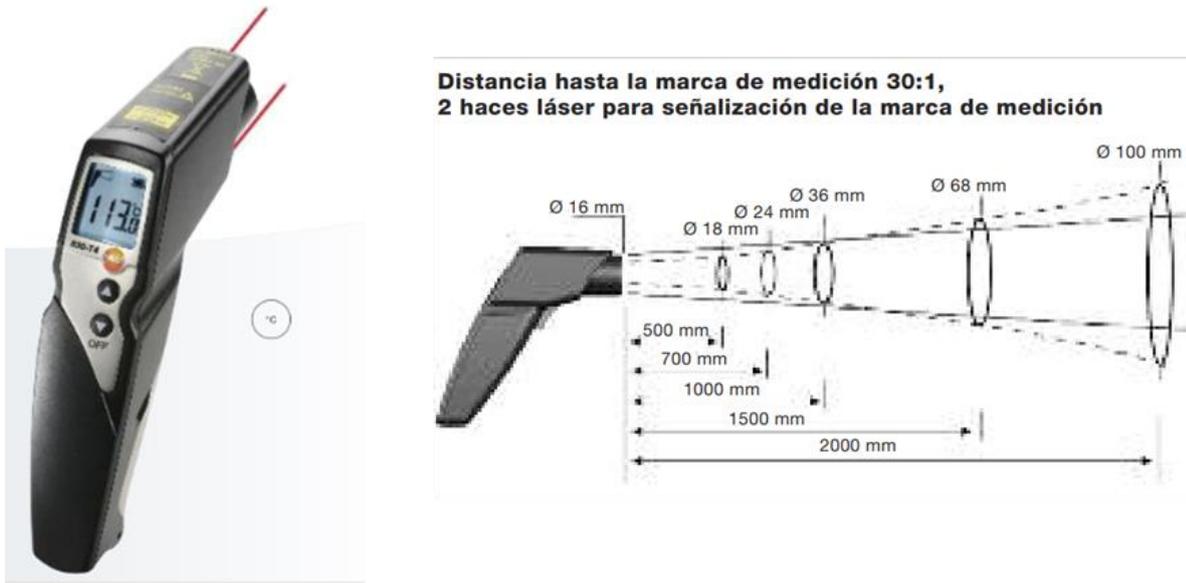


Figura 144

Termómetro infrarrojo TESTO 830 T4. Modo de medición.

HARDWARE: Testo 830-T4
MEDICIÓN: 2 puntos láser
TIPO: Infrarroja
Termopar tipo K
RESOLUCIÓN: 0.1°C
RANGO DE MEDICIÓN: -30 a +400°C (Infrarrojo)
-50 a +500°C (tipo K)
PRECISIÓN TEMPERATURA: 0.5%
EMISIVIDAD: 0.1-1.0 (Ajustable)
RANGO ESPECTRAL: 8 – 14um
DISTANCIA DE MEDICIÓN: 30:1 (0.7 m del objeto)
CARACTERÍSTICAS DEL FABRICANTE:

http://content.amprobe.com/manualsA/TMD-55_TMD-55W_TMD-56_Multilogger-Thermometers_Manual.pdf

– CÁMARA TÉRMICA 1



Figura 145 Cámara térmica FLIR i7

Imágenes térmicas.

HARDWARE: FLIR i7

SOFTWARE: FLIR Tools

RESOLUCIÓN: 0.1°C

RANGO DE MEDICIÓN: -20 a +250°C

PRECISIÓN TEMPERATURA: +/- 2%

EMISIVIDAD: 0.1 – 1 (Ajustable)

RANGO ESPECTRAL: 7.5um – 13 um

CAMPO DE MEDICIÓN: 25° x 25°/0.5 m

ENFOQUE: Fijo

CORRECCIÓN TEMPERATURA: AUTOMÁTICA, en función de la entrada de temperatura reflejada.

IMAGEN: 19,600 píxeles

CARACTERÍSTICAS DEL FABRICANTE:

<http://www.flir.es/instruments/display/?id=65813>

– CÁMARA TÉRMICA 2



Figura 146 Cámara térmica InfRec H2640.

Imágenes térmicas.

HARDWARE: InfRec H2640

SOFTWARE: InfRec Analyzer Lite

RESOLUCIÓN: 0.03°C

RANGO DE MEDICIÓN: -10 a +120°C

PRECISIÓN TEMPERATURA: +/- 2%

EMISIVIDAD: 0.1 – 1 (Ajustable)

RANGO ESPECTRAL: 8um – 14 um

CAMPO DE MEDICIÓN: 21.7° x 16.4°

ENFOQUE: Fijo, 30 cm a infinito

CORRECCIÓN TEMPERATURA: AUTOMÁTICA, en función de la entrada de temperatura reflejada.

IMAGEN: 640 x 480 píxel

CARACTERÍSTICAS DEL FABRICANTE:

http://www.camarastermograficas.es/camara_termografica_nec_h2640.html

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

ANEXO 3:
SIMULACIONES

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

A3.1 SOFTWARE DE SIMULACIÓN: Design Builder & Energy Plus

Como ya se ha mencionado, el software de simulación utilizado para esta investigación fue Design Builder [DesignBuilder, 2016], el cual utiliza como motor de cálculo a Energy Plus [DOE, 2017].

Energy Plus utiliza varios métodos analíticos para el cálculo de la transferencia calor a través de la envolvente del edificio, entre ellos CTF (conduction transfer function), RF (response factor), FD (finite difference) and FE (finite element)[Chou and Lee, 1988][Zingre *et al.*, 2014]. Estos modelos han sido utilizados por otros programas de simulación energética que han ratificado la validez de estos modelos de cálculo, como: TRNSYS [Kolokotsa *et al.*, 2012], eQUEST [Kolokotroni, Gowreesunker and Giridharan, 2013], BEopt [Tabares-velasco *et al.*, 2012] y varios más

El archivo climático que utiliza este programa es Energy Plus Weather (EPW File). Este archivo reúne datos de varios factores climáticos: temperatura del aire, humedad, Radiación solar (directa normal y difusa), vientos, precipitaciones, etc. Además, este archivo considera la radiación horizontal infrarroja emitida por el cielo y el porcentaje de cielo cubierto. Todos los datos que se especifican en el archivo epw se muestran en la **Tabla 32**

Tabla 32 Datos de entrada que contiene un archivo EPW (Energy Plus Weather) _IWECC Format

Parámetros del archivo EPW	
I: Año	XVII: Iluminancia Global Horizontal
II: Mes	XVIII: Iluminancia Normal Directa
II: Día	XIX: Iluminancia Horizontal Difusa
IV: Hora	XX: Iluminancia zenith
V: Periodo	XXI: Dirección del viento
VI: Fuente	XXII: Velocidad del viento
VII: Temperatura del aire	XXIII: Cobertura total del cielo
VIII: Temperatura de rocío	XXIV: Cobertura opaca del cielo
IX: Humedad Relativa	XXV: Visibilidad
X: Presión atmosférica	XXVI: Altura del cielo
XI: Radiación extraterrestre horizontal	XXVII: Observación del clima
XII: Radiación extraterrestre normal directa	XXVIII: Código del clima
XIII: Radiación Horizontal infrarroja	XXIX: Agua precipitada
XIV: Radiación horizontal global	XXX: Profundidad óptica de aerosol
XV: Radiación Normal Directa	XXXI: Profundidad
XVI: Radiación Horizontal Difusa	XXXII: Días sin nieve

Cada valor de entrada de un archivo EPW, tiene un grado de incertidumbre (uncertainty range), debido la veracidad de la fuente de donde se obtienen los datos. El menor grado de incertidumbre corresponde a utilizar valores medidos a través de instrumentación, y el de mayor grado pertenece a valores desconocidos [ENERGYPLUS, 2015].

De todos los valores de entrada que maneja el archivo epw usado por Energy plus se han filtrado sólo los parámetros que intervienen en cálculo térmico del edificio y han sido modificados a partir de las mediciones realizadas en situ, **Tabla 39**.

Tabla 33 Datos de entrada configurados del archivo EPW a partir de las mediciones *in situ*. Rango de incertidumbre de cada uno de los parámetros modificados.

Parámetros del archivo EPW	Rango de incertidumbre (día)	Rango de incertidumbre (noche)
VII: Temperatura del aire	A7	A7
VIII: Temperatura de rocío	A7	A7
IX: Humedad Relativa	A7	A7
X: Presión atmosférica	A7	A7
XIII: Radiación Horizontal infrarroja	E6	E6
XIV: Radiación horizontal global	A7	?9
XV: Radiación Normal Directa	D6	?9
XVI: Radiación Horizontal Difusa	E6	?9
XXI: Dirección del viento	A7	A7
XXII: Velocidad del viento	A7	A7
XXIII: Cobertura total del cielo	E6	E6

En vista de que el archivo EPW de esta región es inexistente, se creó un archivo a partir de datos medidos *in situ*. Como se explicó en capítulos anteriores, la mayoría de los datos se tomaron de una estación meteorológica (temperatura del aire, humedad, radiación global, etc) y se ingresaron de manera directa en el archivo EPW. Sin embargo, otros datos fueron calculados a partir de los datos medidos *in situ* y en base a los algoritmos utilizados por el software [ENERGYPLUS, 2015].

LOS PARÁMETROS CALCULADOS fueron la radiación difusa, la radiación normal directa normal, y la radiación horizontal infrarroja. Todos estos parámetros están relacionados con el porcentaje de cobertura del cielo. Por lo tanto la caracterización del cielo realizada en esta tesis fue indispensable para definir el archivo EPW de esta región.

A3.1.1 CONFIGURACIÓN DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

– DETERMINACIÓN RADIACIÓN SOLAR DIFUSA-DIRECTA

A través de los parámetros medidos *in situ*, la RADIACIÓN GLOBAL (R_g) y la COBERTURA DEL CIELO (N), se ha obtenido la relación entre radiación difusa y radiación directa. A partir de aquí se han obtenido los valores de radiación horizontal difusa (R_d), y la radiación normal directa (R_{ndi}) con el uso de Eq. 7 y Eq. 8, respectivamente.

$$R_d = R_g * N \quad \text{Eq. 7}$$

$$R_{ndi} = \frac{(R_g - R_d)}{\cos\theta} \quad \text{Eq. 8}$$

Para la obtención del ángulo solar θ de cada hora y de cada día de la latitud establecida, se ha utilizado los valores dados por Design Builder.

– DETERMINACIÓN RADIACIÓN HORIZONTAL INFRARROJA

En cuanto al intercambio radiativo, el modelo de cálculo de Energy Plus utiliza un parámetro llamado la radiación infrarroja horizontal (R_{ir}) que es el flujo de onda larga emitida por el cielo, a mayor nubosidad mayor radiación infrarroja y viceversa. El método de cálculo utilizado considera la temperatura del aire (T_a) y una corrección a través de la emisividad (ε) del cielo para la obtención de este flujo, Eq. 9 y 10 [ENERGYPLUS, 2015].

$$R_{ir} = \varepsilon \sigma T_a^4 \quad \text{Eq. 9}$$

$$\varepsilon = (0.787 + 0.764 \ln(\frac{T_{dp}}{273})) (1 + 0.0224N + 0.0035 N^2 + 0.00028 N^3) \quad \text{Eq. 10}$$

Hay que recalcar que Eq. Y y Z son aproximaciones del impacto de la nubosidad sobre este flujo y la emisividad del cielo a partir de modelos de cielo despejado [Clark and Allen, 1978][Berdahl and Fromberg, 1982]. Dada la importancia de este flujo para esta tesis, se ha realizado un cálculo adicional basado en las temperaturas del cielo medidas *in situ*, con el uso de Eq. 11

$$R_{infrarroja\ horizontal} = \varepsilon \sigma T_{sky}^4 \quad \text{Eq.11}$$

Los resultados con los dos modelos de cálculo utilizados para el flujo de radiación horizontal infrarroja han sido comparados en el apartado de validaciones.

Por otra parte, aunque se contaba con la información de las precipitaciones registradas en el archivo EPW se ha obviado este parámetro.

– **DEFINICIÓN DEL MODELO DE VIENTO.**

El modelo de cálculo para definir la transferencia de calor por convección fue Eq 12, como en cualquier otro programa.

$$Q_c = hc(T_s - T_a) \quad \text{Eq. 12}$$

Como ya se explicó en el apartado 2.1 *COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA.*, este flujo depende del coeficiente de convección (h_f) que está modificado de manera principal por el movimiento del aire. Numerosos estudios han desarrollado diversos modelos. Las simulaciones de esta investigación han sido realizadas con el uso del algoritmo TARP (Walton 1983), Eq 13. Se ha escogido este algoritmo debido a que fue desarrollado a partir de experimentaciones en cubiertas.

$$h_c = h_f + h_n \quad \text{Eq. 13}$$

Donde h_f es el coeficiente de convección forzada debido al movimiento del aire, y h_n es el coeficiente de convección natural. El coeficiente de convección forzada se ha definido a partir de Eq. 14

$$h_f = 2.537W_f R_f \left(\frac{PV_z}{A}\right)^{1/2} \quad \text{Eq. 14}$$

Donde W_f es el coeficiente de la dirección del viento, para Barlovento = 1.0 y para Sotavento $W_f = 0.50$; R_f es el coeficiente de la rugosidad de la superficie (2.17 para CP y 1.00 para CL); P el perímetro de la cubierta (m); V_z la velocidad del aire (m/s); y A el área de la cubierta (m²)

El coeficiente de convección natural se ha definido por Eq. 15

$$h_n = (9.482(T_s - T_a)^{\frac{1}{3}}) / (7.283 - \cos \emptyset) \quad \text{Eq. 15}$$

Donde \emptyset es el ángulo de la cubierta.

El proceso de medición llevado a cabo en esta tesis ha logrado reducir el rango de incertidumbre del archivo EPW en comparación con otros archivos analizados de la base de datos de Energy Plus. Los rangos de cada parámetro modificado se muestran en la **Tabla 33**.

– **DEFINICIÓN DE LAS PRECIPITACIONES.**

De acuerdo a los datos medidos se registra presencia de precipitaciones en el periodo medido, sin embargo no superan los 0.5 mm por pequeños cortos de tiempo. Debido a que el modelo que utiliza Energy Plus para el cálculo de las pérdidas por evaporación no cuenta con una configuración para valores tan bajos de precipitaciones, las simulaciones se realizaron sin contar la presencia de este factor climático, **Tabla 34** (*Present weather codes= 999999999*).

A3.1.2 ARCHIVO CLIMÁTICO.

A continuación se muestran los datos ingresados en el archivo climático, a partir de los datos medidos y con las modificaciones descritas en el apartado posterior.

Aunque los días escogidos para extraer los resultados son sólo dos (DÍA PROMEDIO y DÍA EXTREMO), las simulaciones se han realizado durante una semana entera, del 06 al 12 de octubre de 2016, **Tabla 34**.

Tabla 34 Archivo EPW modificado a partir de las mediciones realizadas *in situ*, desde el 06 al 12 de octubre.

06-07 DE OCTUBRE

Year	Month	Day	Hour	Period	Source	T-air °C	Dew point °C	Relative humidity %	Atmosph. Pressure Pa	Horizontal Infrared Radiation Intensity Wh/m2	Global horizontal Radiation Wh/m2	Direct Normal Radiation Wh/m2	Diffuse Horizontal Radiation Wh/m2	Wind Direction grados	Wind Speed m/seg	Total sky cover Décimas	Present weather codes Code
2002	10	6	1	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,6	22,6	94	100995	382	0	0	0	118	0,1	10	999999999
2002	10	6	2	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,4	22,6	95	100938	380	0	0	0	23	0,1	10	999999999
2002	10	6	3	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,1	22,1	95	100930	379	0	0	0	23	0,1	10	999999999
2002	10	6	4	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,8	22,3	97	100955	377	0	0	0	23	0,1	10	999999999
2002	10	6	5	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,7	22,4	97	100978	377	0	0	0	19	0,1	10	999999999
2002	10	6	6	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,6	22,3	97	101040	376	0	0	0	19	0,1	10	999999999
2002	10	6	7	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	22,7	22,2	97	101090	377	27	0	27	19	0,1	10	999999999
2002	10	6	8	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	23,3	22,7	96	101133	380	75	0	75	23	0,2	10	999999999
2002	10	6	9	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	24,3	22,6	91	101148	385	205	0	205	256	0,2	10	999999999
2002	10	6	10	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	25,7	23,4	87	101170	393	265	33	240	90	0,2	9	999999999
2002	10	6	11	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	25,8	23,4	86	101170	394	225	0	225	315	0,3	10	999999999
2002	10	6	12	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	25,1	22,7	87	101088	390	126	0	126	231	1,8	10	999999999
2002	10	6	13	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	26,5	23,1	81	100988	395	450	91	360	315	2,6	8	999999999
2002	10	6	14	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	27,2	23,4	79	100903	401	385	33	353	293	3,0	9	999999999
2002	10	6	15	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	27,3	22,4	75	100830	400	294	19	278	315	3,4	10	999999999
2002	10	6	16	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	27,1	21,7	73	100785	398	265	29	246	158	3,2	9	999999999
2002	10	6	17	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	26,1	21,4	57	100770	393	104	6	100	225	1,8	10	999999999
2002	10	6	18	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	25,1	21,8	21	100788	389	33	0	33	56	0,4	10	999999999
2002	10	6	19	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,5	22,3	87	100903	385	0	0	0	248	1,1	9	999999999
2002	10	6	20	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,3	22,1	88	100963	383	0	0	0	225	0,4	9	999999999
2002	10	6	21	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,0	22,4	90	100985	383	0	0	0	225	0,0	9	999999999
2002	10	6	22	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,8	22,1	90	101045	380	0	0	0	225	0,2	8	999999999
2002	10	6	23	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,6	22,1	91	101090	380	0	0	0	225	0,1	9	999999999
2002	10	6	24	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,7	22,2	90	101028	379	0	0	0	225	0,1	8	999999999
2002	10	7	1	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,5	22,0	91	100945	376	0	0	0	225	0,1	6	999999999
2002	10	7	2	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,0	21,7	93	100878	371	0	0	0	248	0,1	4	999999999
2002	10	7	3	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,7	21,6	94	100830	370	0	0	0	96	0,1	5	999999999
2002	10	7	4	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,7	21,7	94	100820	373	0	0	0	23	0,1	7	999999999
2002	10	7	5	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,6	21,6	94	100810	374	0	0	0	23	0,1	9	999999999
2002	10	7	6	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,5	21,6	94	100820	375	0	0	0	23	0,1	10	999999999
2002	10	7	7	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	22,8	21,7	93	100895	377	29	0	29	169	0,1	10	999999999
2002	10	7	8	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	23,5	22,3	93	100970	381	95	0	95	163	0,2	10	999999999
2002	10	7	9	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	23,8	23,1	95	101045	383	112	0	112	17	0,2	10	999999999
2002	10	7	10	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	23,7	23,0	96	101080	383	117	0	117	169	0,2	10	999999999
2002	10	7	11	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	24,0	23,1	95	101038	384	150	0	150	236	0,3	10	999999999
2002	10	7	12	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	23,7	22,2	92	100963	382	169	0	169	315	2,3	10	999999999
2002	10	7	13	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	24,5	22,1	86	100870	386	322	0	322	315	3,1	10	999999999
2002	10	7	14	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	24,8	22,3	85	100803	388	192	0	192	315	2,8	10	999999999
2002	10	7	15	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	24,5	21,8	85	100760	385	128	0	128	219	2,7	10	999999999
2002	10	7	16	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	24,2	21,7	86	100760	384	83	0	83	231	2,0	10	999999999
2002	10	7	17	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	23,7	21,4	87	100793	381	40	0	40	293	1,9	10	999999999
2002	10	7	18	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	23,3	21,4	89	100863	379	9	0	9	259	2,0	10	999999999
2002	10	7	19	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,8	21,2	90	100938	375	0	0	0	248	1,9	10	999999999
2002	10	7	20	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,7	21,2	91	100985	375	0	0	0	248	0,9	10	999999999
2002	10	7	21	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,5	21,0	91	101055	374	0	0	0	270	1,3	10	999999999
2002	10	7	22	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,5	21,2	93	101115	374	0	0	0	270	1,0	10	999999999
2002	10	7	23	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,1	21,2	94	101163	372	0	0	0	293	0,1	10	999999999
2002	10	7	24	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,7	21,1	96	101140	370	0	0	0	270	0,1	10	999999999

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.

Repercusión energética en el edificio.

08-09 DE OCTUBRE

Year	Month	Day	Hour	Period	Source	T-air °C	Dew point °C	Relative humidity %	Atmosph. Pressure Pa	Horizontal Infrared Radiation Intensity Wh/m2	Global horizontal Radiation Wh/m2	Direct Normal Radiation Wh/m2	Diffuse Horizontal Radiation Wh/m2	Wind Direction grados	Wind Speed m/seg	Total sky cover Décimas	Present weather codes Code
2002	10	8	1	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,5	21,0	96	101065	368	0	0	0	270	0,1	9	999999999
2002	10	8	2	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,4	20,9	97	100993	367	0	0	0	270	0,1	9	999999999
2002	10	8	3	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,3	20,8	97	100948	368	0	0	0	270	0,1	10	999999999
2002	10	8	4	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,1	20,7	97	100930	367	0	0	0	270	0,1	10	999999999
2002	10	8	5	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,1	20,6	97	100940	367	0	0	0	270	0,1	10	999999999
2002	10	8	6	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,1	20,6	97	100963	367	0	0	0	270	0,1	10	999999999
2002	10	8	7	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	21,3	20,9	97	100985	367	45	107	40	270	0,1	9	999999999
2002	10	8	8	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	22,4	21,4	94	101055	373	107	63	90	275	0,2	9	999999999
2002	10	8	9	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	25,0	22,9	87	101055	387	279	90	230	148	0,2	9	999999999
2002	10	8	10	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	25,2	22,4	84	101063	389	316	36	291	90	0,2	9	999999999
2002	10	8	11	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	25,5	22,1	81	100995	391	323	0	323	219	0,3	10	999999999
2002	10	8	12	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	26,1	23,0	82	100888	393	547	135	415	281	1,8	8	999999999
2002	10	8	13	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	27,2	23,2	78	100795	400	438	58	380	293	2,3	9	999999999
2002	10	8	14	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	26,9	22,7	77	100733	397	528	138	394	242	3,0	8	999999999
2002	10	8	15	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	26,4	22,3	77	100658	396	309	0	309	242	2,5	10	999999999
2002	10	8	16	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	25,2	21,2	79	100608	388	158	0	158	281	3,1	10	999999999
2002	10	8	17	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	24,4	21,7	84	100668	385	64	0	64	248	2,6	10	999999999
2002	10	8	18	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	23,8	21,5	87	100725	382	15	0	15	273	2,2	10	999999999
2002	10	8	19	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,3	21,6	90	100793	379	0	0	0	238	1,9	10	999999999
2002	10	8	20	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,9	21,2	68	100878	376	0	0	0	146	0,7	10	999999999
2002	10	8	21	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,5	20,8	90	100970	374	0	0	0	248	1,3	10	999999999
2002	10	8	22	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,2	20,5	90	101055	372	0	0	0	293	0,8	10	999999999
2002	10	8	23	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,9	20,8	92	101118	371	0	0	0	225	0,1	10	999999999
2002	10	8	24	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,4	20,9	95	101118	369	0	0	0	225	0,1	10	999999999
2002	10	9	1	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,3	20,7	97	101063	368	0	0	0	225	0,1	10	999999999
2002	10	9	2	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,1	20,7	97	101003	367	0	0	0	225	0,1	10	999999999
2002	10	9	3	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	20,7	20,4	98	100963	365	0	0	0	225	0,1	10	999999999
2002	10	9	4	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	20,4	20,1	98	100963	362	0	0	0	225	0,1	10	999999999
2002	10	9	5	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	20,1	19,9	98	100978	361	0	0	0	225	0,1	10	999999999
2002	10	9	6	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	19,9	19,8	98	101065	360	0	0	0	210	0,1	10	999999999
2002	10	9	7	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	19,9	19,9	98	101148	360	15	0	15	175	0,1	10	999999999
2002	10	9	8	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	20,7	20,4	98	101218	364	110	0	110	175	0,2	10	999999999
2002	10	9	9	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	22,1	21,8	98	101260	373	188	0	188	200	0,2	10	999999999
2002	10	9	10	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	23,3	22,4	94	101260	380	200	0	200	180	0,2	10	999999999
2002	10	9	11	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	24,0	22,3	90	101218	383	148	0	148	259	0,3	10	999999999
2002	10	9	12	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	24,3	22,2	88	101173	385	203	0	203	281	2,8	10	999999999
2002	10	9	13	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	24,8	22,6	86	101090	388	323	11	311	293	2,4	10	999999999
2002	10	9	14	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	25,2	22,5	83	101013	389	384	40	345	281	2,2	9	999999999
2002	10	9	15	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	25,1	21,6	81	100920	388	212	0	212	242	1,0	10	999999999
2002	10	9	16	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	24,3	21,1	83	100870	384	94	0	94	248	0,8	10	999999999
2002	10	9	17	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	23,9	21,0	84	100878	382	61	0	61	231	0,8	10	999999999
2002	10	9	18	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I	23,6	21,2	86	100928	380	14	0	14	281	0,5	10	999999999
2002	10	9	19	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,2	21,3	88	100978	378	0	0	0	270	0,1	10	999999999
2002	10	9	20	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,1	21,7	91	101020	378	0	0	0	270	0,0	10	999999999
2002	10	9	21	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,1	21,9	94	101055	378	0	0	0	270	0,0	10	999999999
2002	10	9	22	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,8	22,1	95	101100	377	0	0	0	270	0,0	10	999999999
2002	10	9	23	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,6	21,6	94	101110	375	0	0	0	270	0,1	10	999999999
2002	10	9	24	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,4	21,3	94	101110	374	0	0	0	259	0,1	10	999999999

10-11 DE OCTUBRE

Year	Month	Day	Hour	Period	Source	T-air	Dew point	Relative humidity	Atmosph. Pressure	Horizontal Infrared Radiation Intensity	Global horizontal Radiation	Direct Normal Radiation	Diffuse Horizontal Radiation	Wind Direction	Wind Speed	Total sky cover
						°C	°C	%	Pa	Wh/m2	Wh/m2	Wh/m2	Wh/m2	grados	m/seg	Décimas
2002	10	10	1	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,3	21,6	95	101055	374	0	0	0	135	0,1	10
2002	10	10	2	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,2	21,7	96	101030	374	0	0	0	101	0,1	10
2002	10	10	3	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,9	21,3	97	100978	371	0	0	0	135	0,1	10
2002	10	10	4	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,7	21,3	98	100970	371	0	0	0	135	0,0	10
2002	10	10	5	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,6	21,3	98	100978	370	0	0	0	135	0,1	10
2002	10	10	6	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	21,4	21,3	98	101073	369	0	0	0	135	0,0	10
2002	10	10	7	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	21,7	21,4	98	101133	371	34	0	34	135	0,3	10
2002	10	10	8	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	23,2	22,6	96	101200	379	133	33	122	135	0,4	9
2002	10	10	9	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	25,4	23,5	89	101210	390	394	181	292	113	0,4	8
2002	10	10	10	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	26,5	22,5	80	101200	396	416	54	378	96	1,1	9
2002	10	10	11	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	27,0	21,6	73	101155	396	625	200	451	84	2,6	8
2002	10	10	12	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	28,0	22,7	73	101083	402	618	234	389	11	2,6	7
2002	10	10	13	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	28,6	23,4	73	100988	405	743	276	470	253	2,8	7
2002	10	10	14	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	28,8	22,3	68	100870	407	361	76	291	180	2,6	9
2002	10	10	15	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	29,5	21,4	62	100768	406	667	355	364	79	2,8	6
2002	10	10	16	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	29,1	21,9	65	100708	408	245	70	195	323	2,2	8
2002	10	10	17	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	27,0	21,7	72	100723	398	81	8	77	259	1,9	10
2002	10	10	18	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	26,0	22,5	81	100803	394	13	4	12	248	1,2	10
2002	10	10	19	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	25,8	23,2	85	100913	394	0	0	0	225	0,3	10
2002	10	10	20	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	25,4	23,1	87	100995	391	0	0	0	248	0,2	10
2002	10	10	21	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	25,0	22,8	88	101083	389	0	0	0	270	0,2	10
2002	10	10	22	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,8	23,2	91	101133	389	0	0	0	270	0,0	10
2002	10	10	23	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,6	23,4	93	101148	386	0	0	0	270	0,0	8
2002	10	10	24	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,5	23,3	93	101108	382	0	0	0	304	0,0	5
2002	10	11	1	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,2	23,2	94	101038	380	0	0	0	315	0,1	5
2002	10	11	2	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,0	23,1	94	100985	378	0	0	0	315	0,1	4
2002	10	11	3	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,4	22,3	94	100948	375	0	0	0	0	0,1	5
2002	10	11	4	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,0	22,0	94	100900	374	0	0	0	253	0,4	6
2002	10	11	5	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,8	22,0	95	100900	375	0	0	0	338	0,4	9
2002	10	11	6	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,7	22,1	96	100955	377	0	0	0	338	0,4	10
2002	10	11	7	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	23,0	22,2	95	101045	378	32	0	32	338	0,3	10
2002	10	11	8	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	23,7	22,1	90	101148	382	104	0	104	0	0,9	10
2002	10	11	9	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	24,7	22,0	85	101210	386	239	0	239	158	1,0	10
2002	10	11	10	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	25,8	22,9	83	101210	394	304	0	304	6	0,9	10
2002	10	11	11	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	26,6	23,0	81	101140	398	433	0	433	11	0,8	10
2002	10	11	12	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	28,5	24,2	77	101020	406	698	266	437	197	2,8	7
2002	10	11	13	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	28,8	23,4	73	100928	406	621	223	400	90	2,8	7
2002	10	11	14	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	29,2	23,4	71	100813	408	563	251	322	169	2,8	6
2002	10	11	15	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	28,5	23,3	74	100740	407	312	63	257	158	3,2	9
2002	10	11	16	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	27,0	23,2	79	100730	400	96	0	96	293	3,1	10
2002	10	11	17	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	25,8	23,2	85	100760	394	33	0	33	270	1,8	10
2002	10	11	18	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9?	25,3	23,2	87	100828	391	10	0	10	281	0,9	10
2002	10	11	19	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,9	23,1	89	100903	389	0	0	0	270	0,3	10
2002	10	11	20	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,8	23,2	90	100978	388	0	0	0	270	0,6	10
2002	10	11	21	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,7	23,2	91	101030	388	0	0	0	248	0,4	10
2002	10	11	22	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,5	22,9	90	101090	386	0	0	0	281	0,5	10
2002	10	11	23	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,2	22,3	89	101140	384	0	0	0	293	0,3	10
2002	10	11	24	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,9	22,0	89	101118	383	0	0	0	304	0,1	10

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.

Repercusión energética en el edificio.

12 DE OCTUBRE

Year	Month	Day	Hour	Period	Source	T-air °C	Dew point °C	Relative humidity %	Atmosph. Preassure Pa	Horizonta l Infrared Radiatio n Intensity Wh/m2	Global horizontal Radiation Wh/m2	Direct Normal Radiation Wh/m2	Diffuse Horizontal Radiation Wh/m2	Wind Direction grados	Wind Speed m/seg	Total sky cover Décimas	Present weather codes Code
2002	10	12	1	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,6	22,0	90	101055	381	0	0	0	90	0,1	10	999999999
2002	10	12	2	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	23,2	21,7	91	75728	379	0	0	0	315	0,1	10	999999999
2002	10	12	3	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,9	21,2	90	100893	376	0	0	0	236	0,1	10	999999999
2002	10	12	4	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,7	21,3	92	100870	376	0	0	0	338	0,5	10	999999999
2002	10	12	5	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,5	21,6	93	100893	375	0	0	0	338	0,5	10	999999999
2002	10	12	6	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	22,5	21,7	95	100963	375	0	0	0	45	0,5	10	999999999
2002	10	12	7	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	22,6	22,1	95	101030	376	27	0	27	45	0,6	10	999999999
2002	10	12	8	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	22,6	21,4	93	101090	375	111	0	111	118	0,5	10	999999999
2002	10	12	9	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	23,2	21,5	90	101133	378	116	0	116	107	0,6	10	999999999
2002	10	12	10	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	23,8	21,6	87	101148	381	174	0	174	17	0,8	10	999999999
2002	10	12	11	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	24,2	22,0	87	101090	384	181	0	181	84	0,6	10	999999999
2002	10	12	12	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	24,7	22,1	86	101020	387	164	0	164	315	0,9	10	999999999
2002	10	12	13	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	25,3	21,8	81	100945	389	325	0	325	152	1,5	10	999999999
2002	10	12	14	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	26,2	22,0	78	100845	393	490	89	405	96	2,0	9	999999999
2002	10	12	15	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	27,2	22,5	76	100718	400	468	31	440	113	1,4	10	999999999
2002	10	12	16	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	28,0	23,4	76	75483	405	280	25	265	45	1,0	10	999999999
2002	10	12	17	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	27,4	22,5	75	100623	400	163	52	137	264	0,8	9	999999999
2002	10	12	18	60	A7A7A7A7E6A7D6E6I9I9	26,9	22,7	78	100685	398	36	10	33	90	0,2	10	999999999
2002	10	12	19	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	26,2	23,5	85	100733	396	0	0	0	165	0,1	10	999999999
2002	10	12	20	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	25,9	24,1	89	100813	394	0	0	0	175	0,1	9	999999999
2002	10	12	21	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	25,5	24,1	92	100878	391	0	0	0	175	0,1	8	999999999
2002	10	12	22	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	25,1	24,1	94	100900	390	0	0	0	175	0,2	9	999999999
2002	10	12	23	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,6	23,9	96	100948	388	0	0	0	175	0,2	10	999999999
2002	10	12	24	60	A7A7A7A7E6?9?9?9?9?	24,6	24,0	97	100955	388	0	0	0	175	0,0	10	999999999

A3.2 VALIDACIÓN DE LAS SIMULACIONES

A3.2.1 VALIDACIÓN MODELO DE CIELO ENERGY PLUS VS MODELO DE CIELO RECTIFICADO

En este apartado se muestra la comparación entre los resultados medidos (medic) y los resultados simulados con los resultados del modelo de radiación horizontal infrarroja utilizado por Energy Plus (**simulación 1**), y con el modelo rectificado de la radiación horizontal infrarroja obtenida a través de las mediciones de la temperatura del cielo (**simulación 2**).

Esta gráfica muestra los tres parámetros de validación tanto de la CL como de la CP, **Figura 147** y **Figura 148**.

CUBIERTA LIVIANA

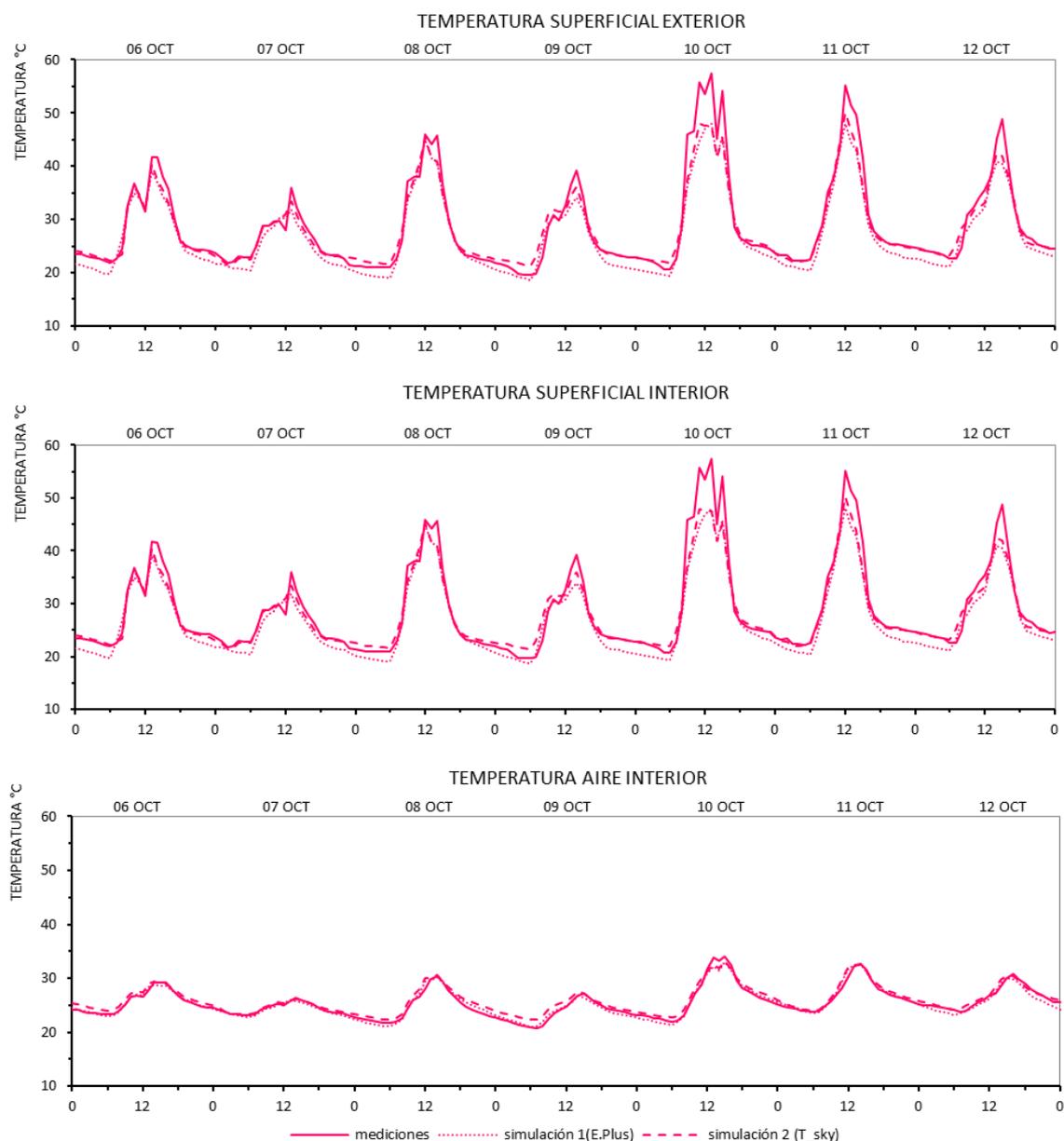


Figura 147 Comparación de los valores de temperatura superficial exterior, temperatura superficial interior y temperatura del aire interior de la CL, entre los valores medidos y simulados (simulación 1 y simulación 2).

CUBIERTA PESADA

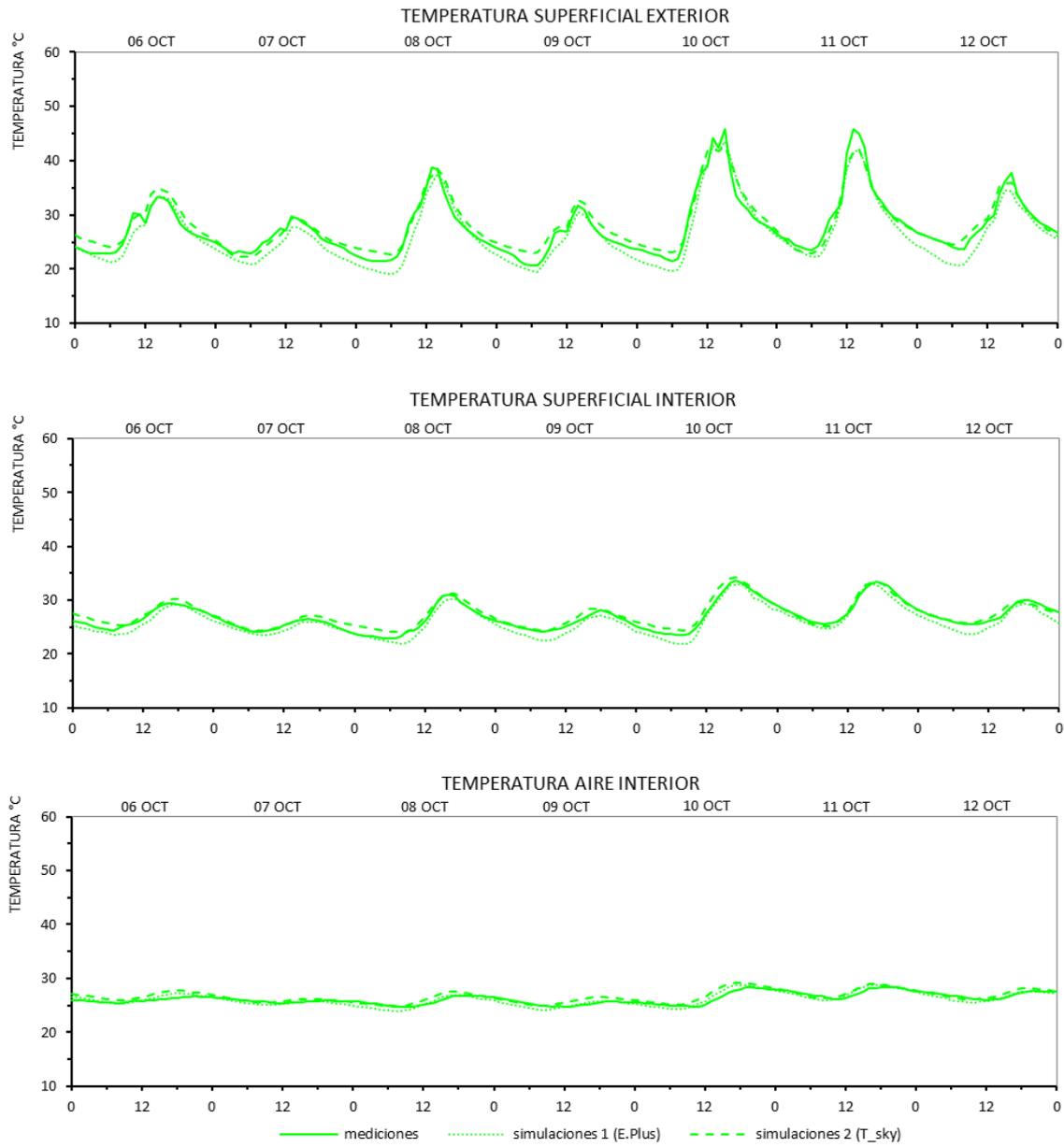


Figura 148 Comparación de los valores de temperatura superficial exterior, temperatura superficial interior y temperatura del aire interior de la CP, entre los valores medidos y simulados (simulación 1 y simulación 2).

De acuerdo a los resultados gráficos tanto de la CL y la CP, **Figura 147 y Figura 148**, los dos valores simulados presentan una gran correlación con los resultados medidos. Sin embargo los resultados de la simulación 2, realizada con la radiación horizontal infrarroja obtenida de las mediciones de la temperatura del cielo, tienen una mayor correspondencia que los resultados de la simulación 1, realizada con el modelo utilizado por Energy plus.

En el caso de la **TEMPERATURA SUPERFICIAL EXTERIOR** de la CL y la CP, EN EL PERIODO DIURNO, los dos resultados simulados son muy similares, y a su vez muy similares a los resultados medidos. La mayor diferencia en este periodo sucede en el máximo de sus temperaturas, donde los dos resultados simulados son menores que los valores medidos. Como se explicó en el apartado **3.4VALIDACIÓN DE LA SIMULACIONES**, esta diferencia se debe a la influencia del viento, la cual se describe a detalle en el siguiente apartado.

Por otra parte, EN EL PERIODO NOCTURNO, tanto en la CL como en la CP, los resultados de la simulación 1 (modelo energy plus) alcanzan temperaturas menores que la simulación 2 (modelo rectificado) y a su vez temperaturas menores que los valores medidos. Por lo tanto, en este periodo, la simulación 2 es la que presenta una mayor correlación con las mediciones.

Estos resultados resaltan que el modelo de cielo utilizado por Energy plus tiene una capacidad enfriamiento radiativo mayor a la real, lo cual se resalta con mayor intensidad en el periodo nocturno. Dado que en el periodo diurno la radiación infrarroja actúa en conjunto con la radiación solar, la diferencia de la temperatura superficial exterior entre los modelos de simulación no es significativa.

Debido a la influencia de la temperatura superficial exterior, en la **TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR** se repite la misma tendencia anterior, donde los resultados de la simulación 1 (modelo energy plus) tienen menores temperaturas que los resultados de la simulación 2 (modelo rectificado) y los resultados medidos, en el periodo nocturno. Lo mismo sucede con la **TEMPERATURA DEL AIRE INTERIOR** aunque menos representativo que en las otras dos temperaturas, debido a que este parámetro depende de más variables que los parámetros de la cubierta.

La diferencia promedio de la TEMPERATURA SUEPERFICIAL INTERIOR entre los datos medidos y los datos de *simulación 1 (modelo de cielo de energy Plus)* en la CL es de 2°C y en la CP es de 1°C en el periodo diurno, mientras que en el **periodo nocturno** esta diferencia es de **2.5°C y 1.2°C en la CL y la CP** respectivamente.

Mientras que **la diferencia** entre los datos medidos y los datos de la *simulación 2 (modelo de cielo rectificado)* en la CL es de 1.7°C y en la CP -0.5°C en el periodo diurno; mientras que **en el periodo nocturno es 0.15 °C y -0.3°C en la CL y la CP** respectivamente.

Por lo tanto, de acuerdo con estos resultados el modelo de simulación 2 es el que tiene valores más similares a los medidos. Estos resultados se corroboran con el análisis de correlación de acuerdo al coeficiente de Pearson en el siguiente apartado.

COEFICIENTE DE PEARSON

De acuerdo con este análisis, todos los parámetros de referencia (T_s , T_{si} , T_{ai}) de las dos cubiertas (CL y CP) de la simulación 2, **Tabla 36**, tienen una mayor correlación con los datos medidos que los valores obtenidos de la simulación 1, **Tabla 35**, tanto en el promedio total como en la mayoría de los promedios de cada día.

El único parámetro donde no se cumple la mayor correlación de la simulación con los datos medidos es en la T_{ai} de la CP. Al igual que en el análisis gráfico, la mayor disimilitud entre los datos medidos y los datos simulados es en este parámetro (T_{ai}), debido a que depende de numerosas variables que tienen una mayor imprecisión en el momento de las simulaciones.

Tabla 35 Coeficiente de Pearson entre los valores medidos y los valores de simulación 1 (ENERGY PLUS).

MEDICIONES Y MODELO ENERGY PLUS						
	CL			CP		
	Ts	Tsi	Tai	Ts	Tsi	Tai
06-oct	0,975	0,975	0,989	0,958	0,920	0,893
07-oct	0,951	0,951	0,982	0,968	0,936	0,657
08-oct	0,989	0,989	0,981	0,967	0,982	0,914
09-oct	0,963	0,963	0,978	0,979	0,909	0,606
Día Extremo	0,987	0,987	0,986	0,976	0,994	0,954
11-oct	0,990	0,990	0,990	0,985	0,984	0,859
Día Promedio	0,973	0,973	0,973	0,977	0,979	0,884
Promedio	0,975	0,975	0,983	0,973	0,958	0,824

Tabla 36 Coeficiente de Pearson entre los valores medidos y los valores de simulación 2 (Modelo rectificado).

MEDICIONES Y MODELO RECTIFICADO						
	CL			CP		
	Ts	Tsi	Tai	Ts	Tsi	Tai
06-oct	0,988	0,988	0,986	0,972	0,960	0,861
07-oct	0,964	0,964	0,987	0,944	0,914	0,688
08-oct	0,989	0,989	0,985	0,984	0,990	0,870
09-oct	0,965	0,965	0,978	0,987	0,968	0,491
Día Extremo	0,992	0,992	0,988	0,983	0,996	0,935
11-oct	0,990	0,990	0,988	0,987	0,991	0,853
Día Promedio	0,977	0,977	0,977	0,982	0,981	0,829
Promedio	0,981	0,981	0,984	0,977	0,971	0,790

Conforme a estos resultados se determina la gran influencia del modelo de cielo sobre el comportamiento térmico de la cubierta, especialmente sobre la temperatura superficial exterior e interior de las dos cubiertas.

A través de la modificación del flujo de la radiación horizontal infrarroja, en base a las mediciones de la temperatura del cielo realizadas in situ, se han conseguido resultados con mayor correlación a los medidos que los resultados simulados con el modelo de Energy Plus, especialmente en el periodo nocturno.

A3.2.2 INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS

Una vez corregido el modelo de cielo se muestra la gran similitud entre los valores medidos y simulados de la CL y la CP, tanto en el periodo diurno como en el periodo nocturno. La alta correspondencia entre esos dos valores soporta la alta precisión y veracidad del modelo de simulación utilizado.

No obstante, como ya se ha mencionado, en ambas cubiertas existen diferencias, tanto en el periodo diurno como en el nocturno, que son necesarias analizar con mayor detenimiento.

Dado que las máximas diferencias entre los resultados de las mediciones y las simulaciones se registran en el parámetro de la temperatura superficial exterior, y en su mayoría son coincidentes en las dos cubiertas, el siguiente análisis se centra la influencia de las variables climáticas medidas sobre las disimilitudes entre los datos medidos y simulados.

La **Figura 149** muestra los resultados de la temperatura superficial exterior de la CL y la CP, comparados con los factores climáticos: radiación solar, cobertura del cielo, vientos y precipitaciones, en la semana de mediciones del mes de octubre.

En el PERIODO NOCTURNO, **las diferencias entre los valores medidos y simulados de las dos cubiertas coinciden en los momentos en los que se registra precipitaciones** (en el primer periodo nocturno del 06, 08, 09 y 10 de octubre).

En el día 09 de octubre (03h00-06h00) cuando los valores de precipitación son los más altos, 0.5mm, se presenta la mayor diferencia entre los valores simulados y los medidos, en ambas cubiertas, mientras que en los días que no se registró lluvias las diferencias en el periodo nocturno son casi nulas.

Estas diferencias se deben a que en los datos de entrada de las simulaciones, los valores de precipitación se consideraron nulos, por lo cual, las pérdidas por evaporación no se registran en los valores simulados. Dado que estas pérdidas tienen una mayor influencia sobre la CP que en la CL, las diferencias entre las simulaciones y mediciones son mayores en esta cubierta.

Por lo tanto, con este análisis se puede aseverar que las diferencias entre los valores medidos y simulados en el periodo nocturno, se debe a que no se ha considerado este factor en los datos de entrada, y no a un error del modelo de simulación.

Como se dijo previamente, debido a que es un factor climatológico muy variable, y por otra parte sus repercusiones térmicas no forman parte del objetivo de esta tesis, es un parámetro que no se tomará en cuenta para el análisis. **Sin embargo, de acuerdo a estos resultados, se puede observar que este factor climatológico tiene una alta influencia sobre la reducción de las temperaturas de las cubiertas, que podría formar parte de futuras investigaciones.**

INFLUENCIA DE LOS FACTORES CLIMÁTICOS

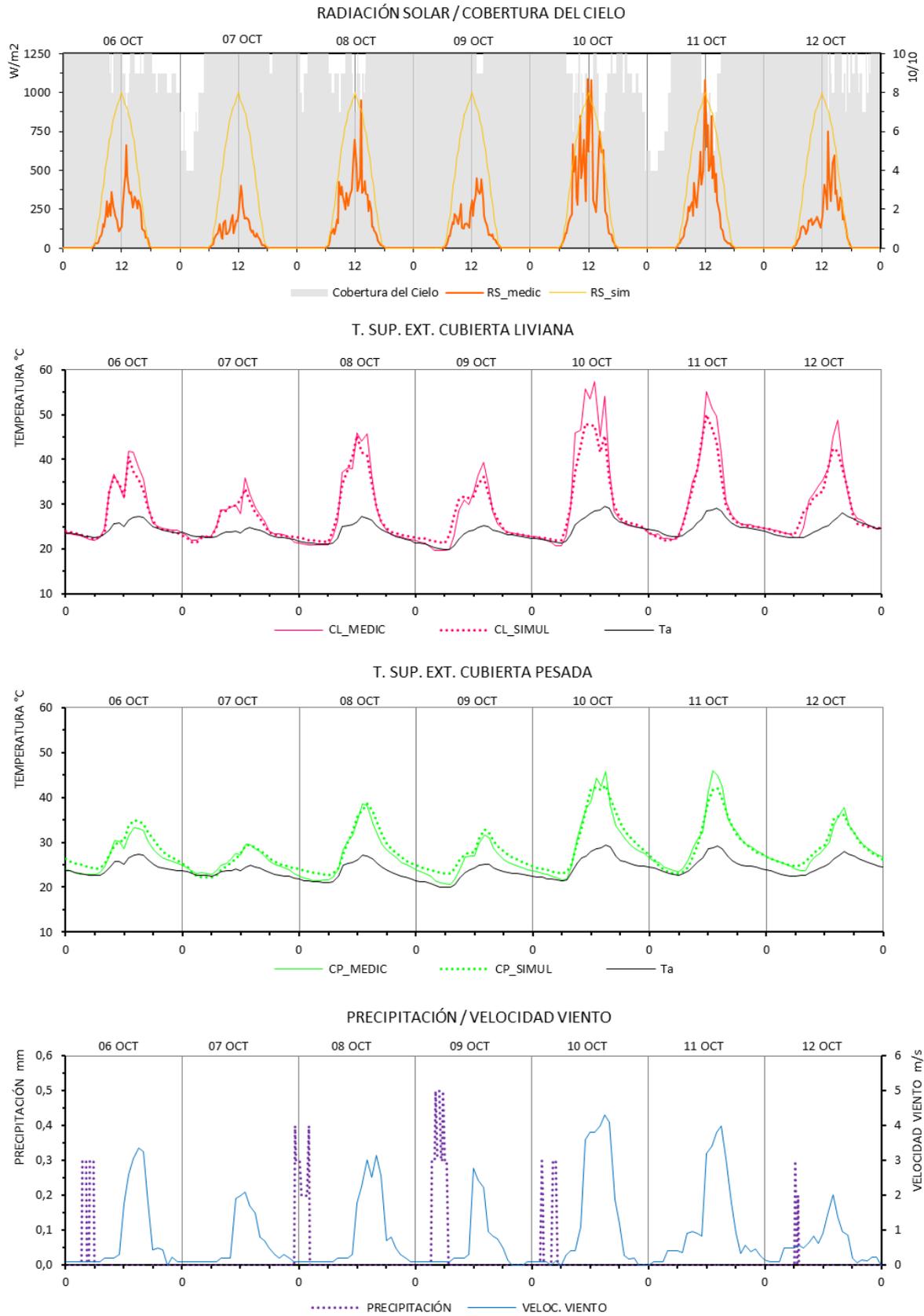


Figura 149 Relación de la temperatura superficial exterior de la CL (magenta) y CP (verde) con los factores climáticos: radiación solar, cobertura del cielo, vientos y precipitaciones.

Por otra parte en EL PERIODO DIURNO, **las mayores disimilitudes entre los datos medidos y simulados suceden en el máximo de temperatura tanto en la CP y con mayor intensidad en la CL, las cuales coinciden con los valores máximos de la velocidad del aire. Figura 149d.**

En el caso de la CL, la máxima diferencia en el Día Extremo (10 de octubre) es de 8, con una velocidad del aire de 4 m/seg. En cambio en el día con menor viento (12 de octubre) con una velocidad de 2 m/seg, esta diferencia es de 4°C.

De acuerdo con estos resultados, **la diferencia entre los datos medidos y evaluados se incrementa de acuerdo al incremento de la velocidad del aire en cada día.**

En cuanto a la CP, la correspondencia entre el viento y la diferencia entre la T_s obtenida por simulaciones y mediciones, es menos evidente. Aunque la mayor diferencia, 11 de octubre, coincide con el segundo día de mayor velocidad de viento, 4 m/seg, en el resto de días no se muestra una correlación clara. Esto se debe a que el factor del viento tiene una mayor influencia sobre la CL que en la CP, debido a su baja masa térmica.

De acuerdo a estos resultados, se puede definir que el movimiento del aire tiene diferentes repercusiones sobre la temperatura superficial exterior de las cubiertas, por lo cual su simulación resulta impredecible. Sin embargo, se ha podido observar, que en la mayoría de los casos, la temperatura simulada es menor que la medida. Esto evidencia que las repercusiones del movimiento del aire sobre la T_s calculada por el modelo de simulación son mayores de lo que sucede en la realidad, por lo cual las temperaturas simuladas muestran una temperatura menor que las medidas.

Desde siempre el factor del movimiento del aire ha resultado difícil de predecir y mucho más difícil de calcular, con lo cual es una inexactitud común en los modelos de simulación de cualquier software.

No obstante, a través de esta comparación se ha logrado obtener una tendencia, donde la mayoría de los resultados simulados son menores que los resultados medidos. Esta tendencia nos lleva a comparar los datos medidos con los datos simulados sin considerar el movimiento del aire, $v=0$ m/seg.

Este último análisis, que se muestra en el siguiente apartado, pretende determinar si los valores medidos tienen una mayor correspondencia con los datos simulados con o sin considerar la velocidad del viento.

A3.2.3 CORRELACIÓN DE VALORES MEDIDOS Y SIMULADOS CON Y SIN CONSIDERAR EL MOVIMIENTO DEL AIRE.

Para esta comparación, se utilizó el mismo modelo de simulación, tal y como en el análisis anterior, pero se consideró una velocidad del aire de 0 m/seg en los datos de entrada.

Para comparar la correlación de todos estos resultados, se utilizó el coeficiente de determinación (r^2) y el índice de correlación de Pearson (r).

Para la determinación de ambos coeficientes se tomaron todos los valores de la muestra, del 06-12 de octubre, de donde se obtuvo un valor promedio para el coeficiente de determinación, mientras que para el índice de correlación de Pearson se analizó los resultados por cada día.

En cuanto a los resultados del COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN (r^2), **Tabla 37**, los valores simulados sin viento muestran una mayor correlación con los datos medidos que los valores simulados con viento.

En la CL, el coeficiente de determinación de los resultados sin viento de la temperatura superficial exterior e interior subió 0.02 en comparación con los datos con viento (de 0.96 a 0.98). Sin embargo, el coeficiente de determinación de la temperatura del aire interior se mantuvo en 0.96.

En la CP, el único parámetro que tuvo un incremento en su coeficiente de determinación ha sido la T_{ai} , de 0.78 a 0.81, siendo el incremento más alto de los tres parámetros y las dos cubiertas.

Tabla 37 Promedio de toda la muestra (06-12 de octubre) del coeficiente de determinación entre los valores medidos y simulados con o sin viento, de la CL y la CP.

Coeficiente de determinación entre los datos medidos y los datos simulados						
	CL			CP		
	Ts	Tsi	Tai	Ts	Tsi	Tai
Con viento	0,96	0,96	0,96	0,95	0,91	0,78
Sin viento	0,98	0,98	0,96	0,95	0,91	0,81

En lo que respecta a los resultados del ÍNDICE DE CORRELACIÓN DE PEARSON, **Tabla 38**, en la mayoría de días, se muestra una mayor correlación entre los valores medidos con los valores simulados sin viento, que la que se muestra con los valores con viento. Tanto en el Día Promedio como en el Día Extremo todos los valores de correlación se han incrementado con respecto a los valores de correlación sin viento. Con excepción de la T_s en el Día Extremo que se reduce 0.005.

Hay que hacer notar, que el parámetro con las correlaciones con los menores valores en toda la muestra, es la T_{ai} , especialmente en la CP. Dado que este parámetro depende de varios flujos de energía internos, su simulación resulta menos precisa.

Tabla 38 Índice de correlación de Pearson de cada día de la muestra (06-12 de octubre), entre los valores medidos y simulados con o sin viento, de la CL y la CP.

		Índice de correlación de Pearson entre datos medidos y datos simulados					
		CL			CP		
		Ts	Tsi	Tai	Ts	Tsi	Tai
Con viento	06-oct	0,972	0,972	0,986	0,972	0,925	0,861
	07-oct	0,946	0,946	0,975	0,944	0,889	0,688
	08-oct	0,989	0,989	0,985	0,984	0,990	0,870
	09-oct	0,965	0,965	0,978	0,981	0,914	0,491
	Día Extremo	0,992	0,992	0,988	0,988	0,992	0,935
	11-oct	0,990	0,990	0,988	0,987	0,981	0,853
	Día Promedio	0,977	0,977	0,977	0,982	0,981	0,829
	PROMEDIO	0,976	0,976	0,983	0,977	0,953	0,790
Sin viento	06-oct	0,986	0,986	0,990	0,959	0,951	0,880
	07-oct	0,963	0,963	0,962	0,919	0,901	0,737
	08-oct	0,992	0,992	0,989	0,968	0,992	0,904
	09-oct	0,980	0,980	0,969	0,979	0,933	0,562
	Día Extremo	0,996	0,996	0,995	0,982	0,995	0,946
	11-oct	0,998	0,998	0,995	0,984	0,990	0,881
	Día Promedio	0,983	0,983	0,970	0,983	0,985	0,852
	PROMEDIO	0,985	0,985	0,981	0,979	0,964	0,823

Con todo lo expuesto en este apartado, se ha determinado que los resultados de las simulaciones sin viento, presentan valores de correlación más altos que los valores simulados con viento, de acuerdo al coeficiente de determinación y el índice de Pearson.

Estos resultados se confirman con los resultados gráficos.

Conforme a estos resultados, para el análisis de las variables planteadas, se ha planteado utilizar el modelo de simulación ya descrito y validado, pero sin considerar la velocidad del viento.

RESULTADOS CUBIERTA LIVIANA CON Y SIN VIENTO

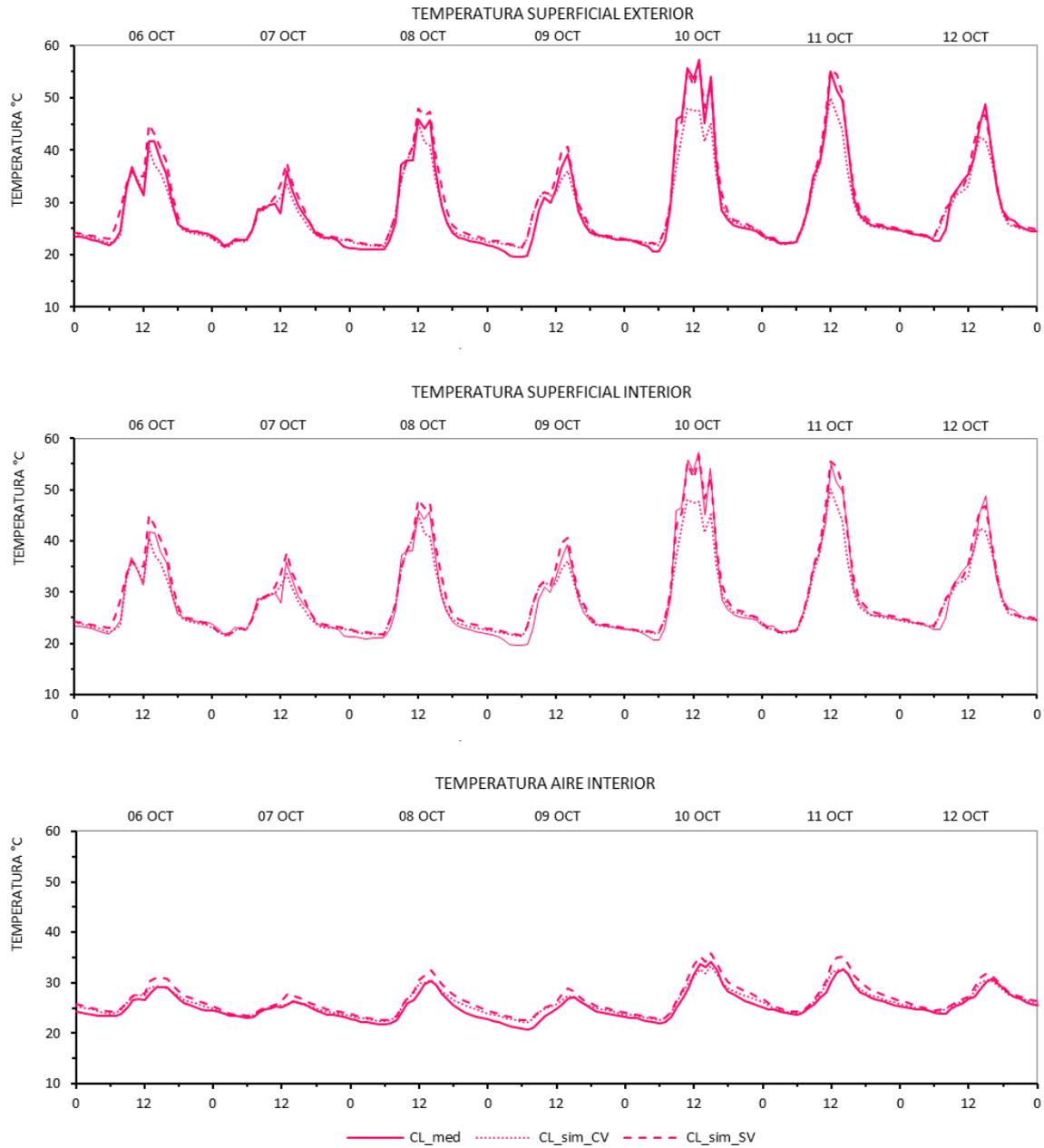


Figura 150 Comparación de los valores de temperatura superficial exterior, temperatura superficial interior y temperatura del aire interior de la CL, entre los valores medidos (CL_med) y simulados con viento (CL_sim_CV) y sin viento (CL_sim_SV)

RESULTADOS CUBIERTA PESADA CON Y SIN VIENTO

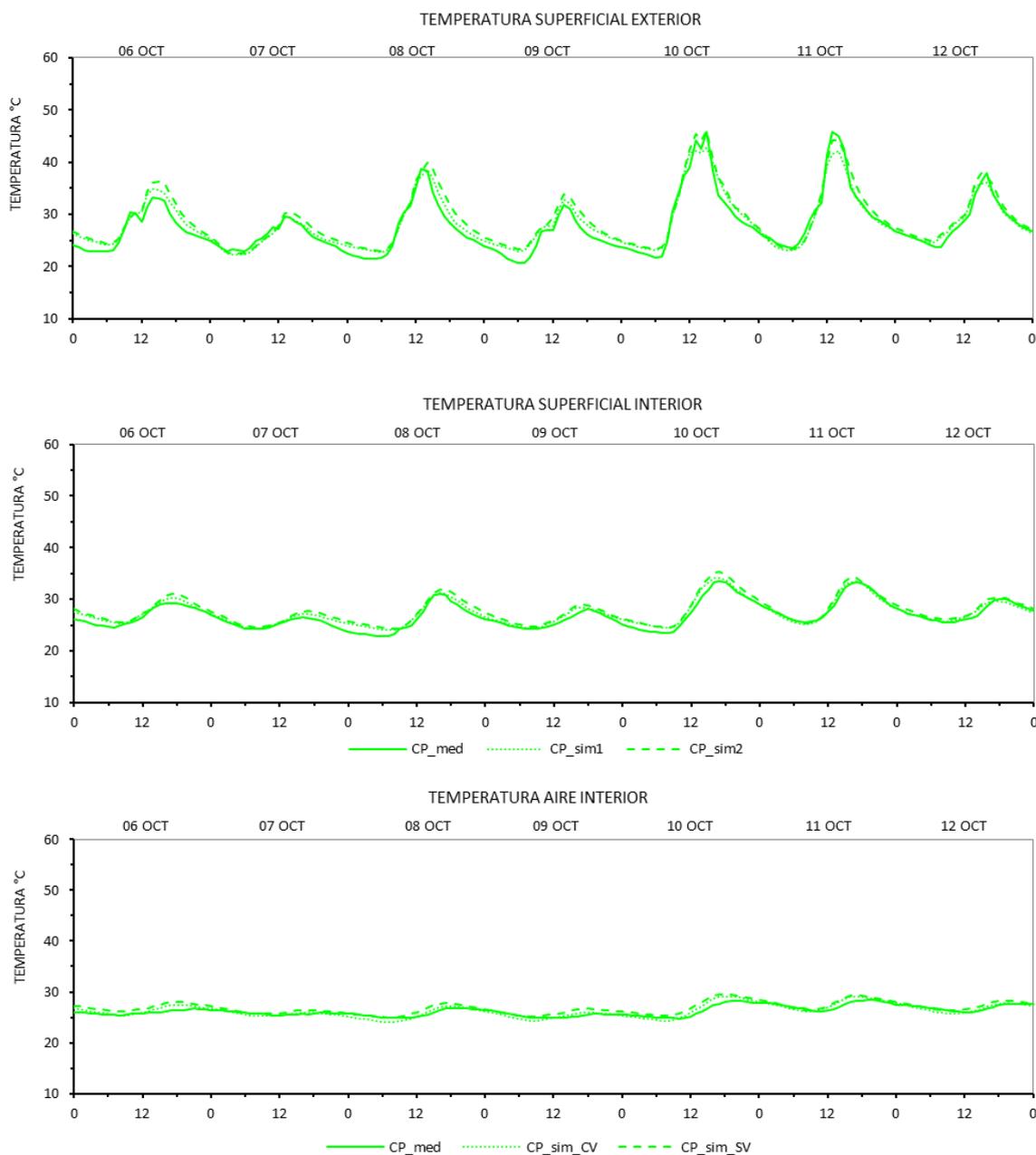


Figura 151 Comparación de los valores de temperatura superficial exterior, temperatura superficial interior y temperatura del aire interior de la CP, entre los valores medidos (CP_med) y simulados con viento (CP_sim_CV) y sin viento (CP_sim_SV)

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

ANEXO 4:
RESULTADOS

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

A4.1 RESULTADOS BASE CL Y CP

A4.1.1 MODELO BASE DE SIMULACIÓN

Para homogenizar todas las variables que presentan los casos de validación (infiltraciones y entorno inmediato), se ha elaborado un modelo común de vivienda, donde la única variable sea el tipo de cubierta: CL y CP en su estado original, al cual se hace referencia como MODELO BASE.

A partir de este modelo se obtuvieron los RESULTADOS BASE del parámetro de análisis de cada cubierta (temperatura superficial interior), que servirán como punto de referencia para medir la influencia de las estrategias aplicadas.

La configuración geométrica e implantación del Modelo Base se han establecido a partir de los casos de validación medidos evaluados, las normativas y las características urbanas establecidas de la ciudad de análisis (Santa Rosa-Ecuador).

Dado que más del 70% de las viviendas en esta ciudad [INEC, 2010], y en Ecuador en general, tienen 1 sola planta, el modelo que se plantea sigue este lineamiento. Conforme a las normativas de la ciudad, la altura del modelo es de 3 m. Las dimensiones de la vivienda han sido acopladas a las tipologías de lotización existentes. De acuerdo al catastro municipal, el lote promedio en esta ciudad es de 9 de ancho por 18 m de largo aproximadamente [GAD_SANTAROSA, 2016]. De donde se estipulan retiros frontales y posteriores de 5 y 3m respectivamente.

En consecuencia, el modelo de simulación establecido es una vivienda de 9m x 9 m y 3 m de altura, adosada por sus lados norte y sur, y los frentes expuestos al exterior son el este y el oeste. Esta orientación se basa en las tramas urbanas predominantes que tiene la ciudad, **Figura 152**.

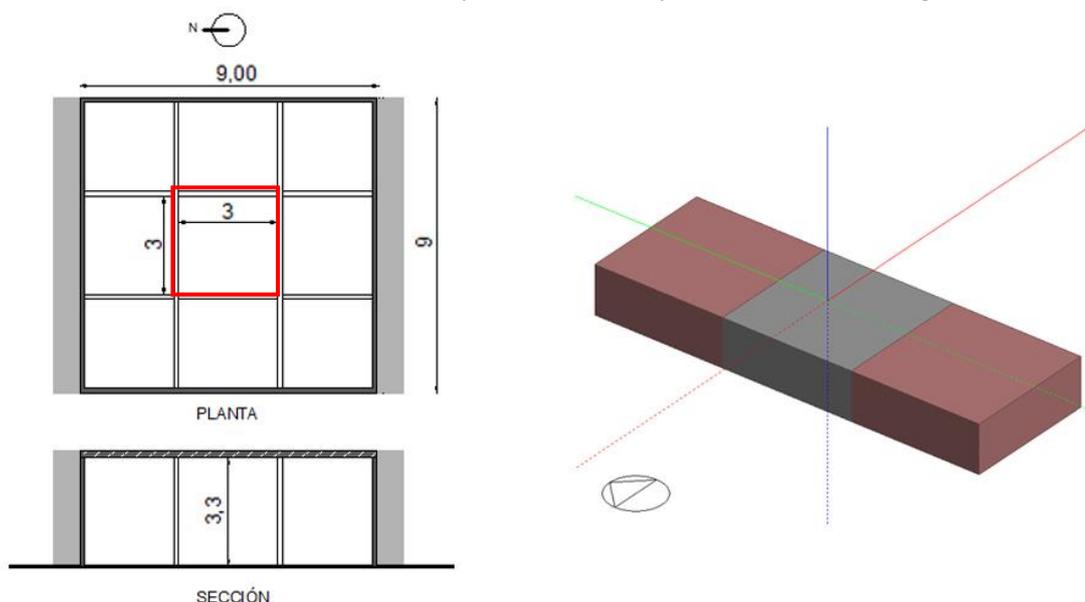


Figura 152 Modelo Base de la simulación: Planta, Sección y Volumen.

El modelo ha sido dividido en 9 subzonas (espacios), a través de una retícula de 3 x 3m. Para evitar la influencia de la radiación solar a través de los paramentos verticales exteriores, el espacio a

evaluarse es la sub-zona central que no tiene contacto directo con el exterior, al igual que en los casos de validación. Adicionalmente, el modelo no cuenta con ninguna superficie vidriada con lo cual el espacio interior no tiene ningún aporte directo por la radiación solar.

Los materiales de la envolvente escogidos para el Modelo Base han sido definidos de acuerdo a los datos censales de los materiales más usados en estas regiones, que coinciden con los de los casos de validación. Las propiedades de los materiales de la cubierta han sido tomadas de las mediciones de los casos de validación. En cambio, las propiedades de los elementos verticales han sido establecidas de acuerdo a datos bibliográficos y a la base de datos del software de simulación. La **Tabla 39** muestra un compendio tanto de los parámetros geométricos como de simulación usados para este modelo Base.

Tabla 39 Parámetros del MODELO BASE DE SIMULACIÓN

Características generales		
Superficie	81 m ²	
Altura	3 m	
Pisos	1Planta	
Actividad y Ocupación		
Densidad	0,04 pers/m ²	
Carga Interna	-	
Programa	constante	
Control Ambiental		
Calefacción	-	
Refrigeración	-	
Ventilación Natural	-	
Parámetros Térmicos		
CUBIERTAS	C. Ligera Metálica	C. Pesada de Hormigón
Reflectividad (visible e infrarrojo cercano)	0,52 ⁽¹⁾	0,25 ⁽¹⁾
Emisividad (infrarrojo térmico)	0,30 ⁽¹⁾	0,90 ⁽¹⁾
Masa térmica:	0,61 KJ/m ² .K ⁽²⁾	70,51 KJ/m ² .K ⁽²⁾
Transmitancia térmica	7,14 W/m ² .K ⁽³⁾	2,68 W/m ² .K ⁽³⁾
Paredes exteriores/interiores		
Reflectividad (visible e infrarrojo cercano)	0,4 ⁽²⁾	
Emisividad (infrarrojo térmico)	0,9 ⁽²⁾	
Masa térmica:	85,60 KJ/m ² .K ⁽²⁾	
Transmitancia térmica	3,2 W/m ² .K ⁽²⁾	
Piso		
Reflectividad (visible e infrarrojo cercano)	0,4 ⁽²⁾	
Emisividad (infrarrojo térmico)	0,9 ⁽²⁾	
Masa térmica:	189,4 KJ/m ² .K	
Transmitancia térmica	1,96 W/m ² .K	
Temperatura del suelo	25,8°C ⁽⁴⁾	
Infiltraciones	Constante-1,00 ac/h ⁽⁵⁾	
Superficie vidriada	0%	

⁽¹⁾ Valores de los casos de validación (medidos *in situ*)

⁽²⁾ Valores de la Base de datos Design Builder

⁽³⁾ Valores de bibliografía y comprobados con mediciones [Bergman *et al.*, 2011][ASHRAE, 1993]

⁽⁴⁾ Valores igualados a la temperatura del aire exterior

⁽⁵⁾ Valor de Bibliografía [Al-Obaidi, Ismail and Abdul Rahman, 2014]

A4.1.1 RESULTADOS BASE

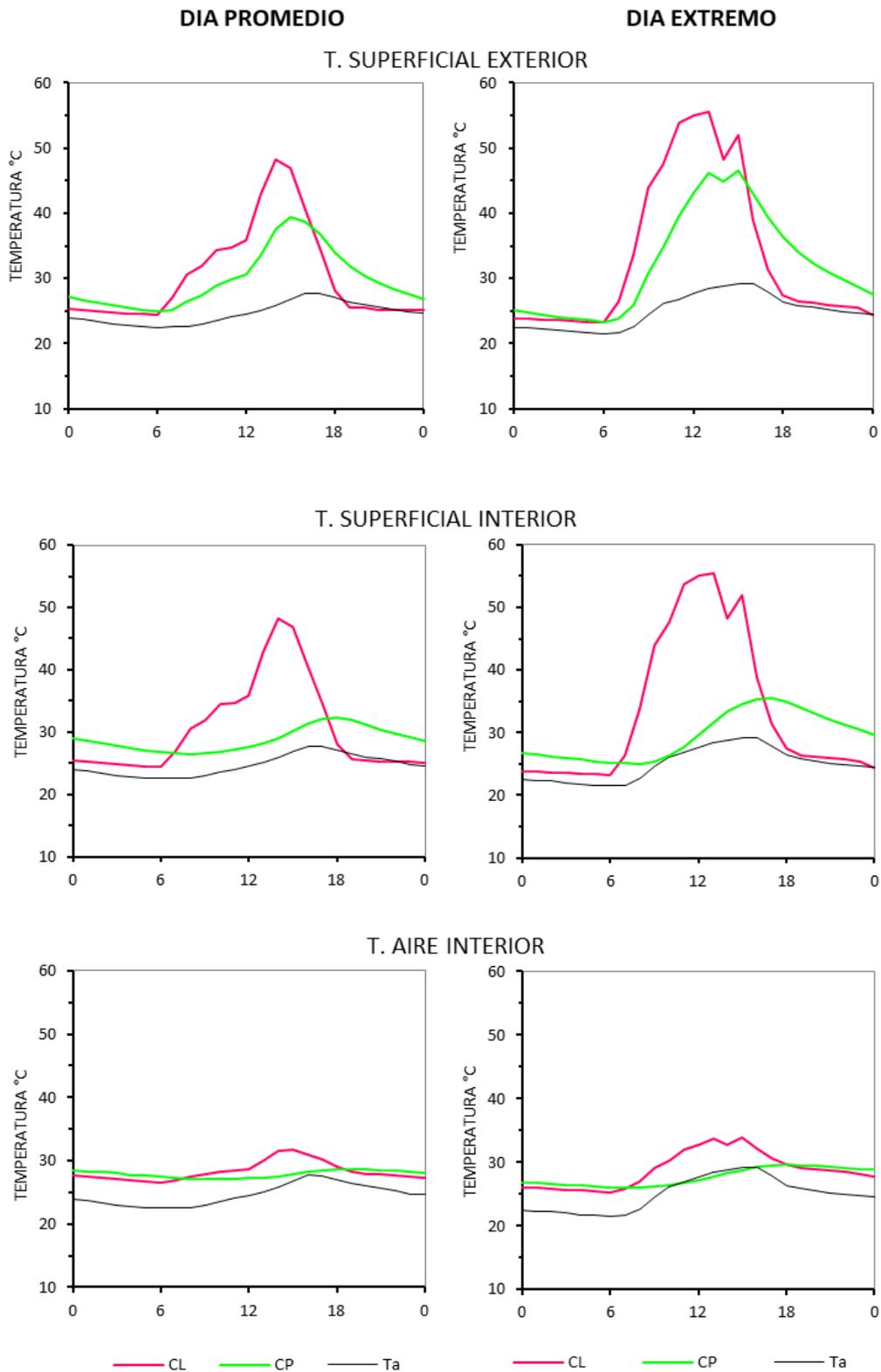


Figura 153 Resultados horarios del MODELO BASE de la CL (magenta) y la CP (verde): Temperatura Superficial exterior, temperatura superficial interior y la temperatura del aire interior.

A4.2 INCLINACIÓN Y ORIENTACIÓN

Además de la influencia de estas variables sobre la temperatura superficial interior, se ha evaluado su influencia sobre la radiación solar captada y la radiación de onda larga emitida.

A5.2.1 INFLUENCIA SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR

En primera instancia, el análisis de la influencia de estas variables sobre la RADIACIÓN SOLAR, se realiza considerando valores teóricos con un modelo de cielo sin nubes, para luego ser comparados con los valores de un cielo con nubes de acuerdo a los datos medidos.

Los resultados de la radiación solar con el MODELO DE CIELO SIN NUBES han sido obtenidos con el uso del software Heliodón 2.6 [Beckers and Masset, 2003], mientras que los resultados del MODELO DE CIELO CON NUBES han sido obtenidos del software Design Builder.

– RADIACIÓN SOLAR TEÓRICA: MODELO DE CIELO SIN NUBES.

El primer análisis de la influencia de estos parámetros sobre la radiación solar recibida se enfoca en los dos días de solsticio: 21 de diciembre y 21 de junio, **Figura 154**.

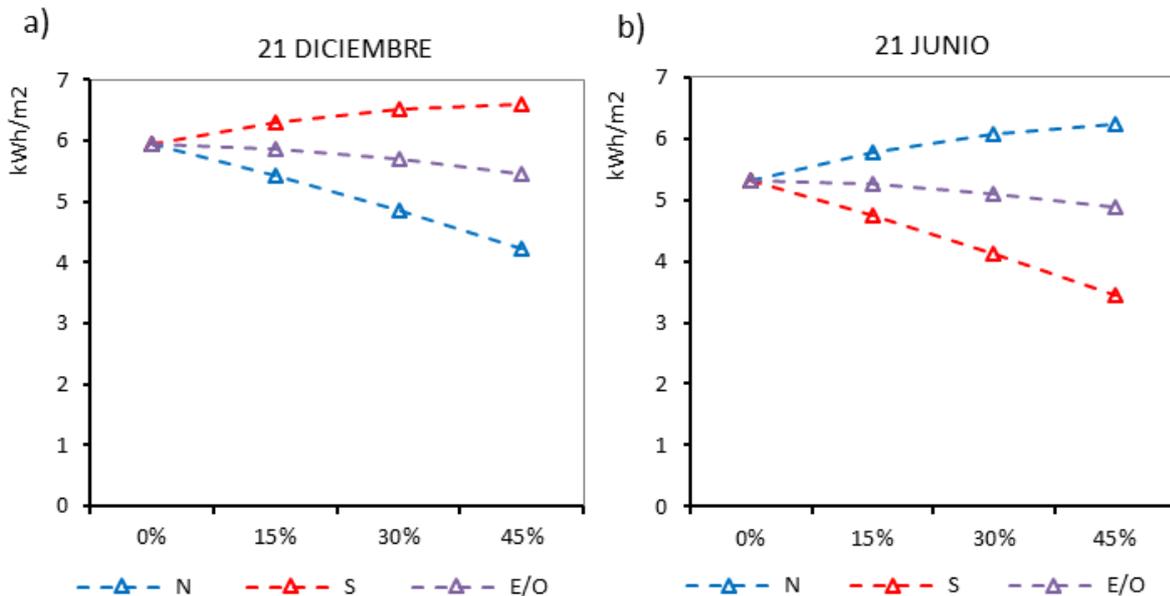


Figura 154 Comparación de la radiación solar teórica recibida sobre la cubierta, lat 3°21'S, con diferentes inclinaciones y orientaciones, en los días de solsticio: 21 de diciembre y 21 de junio.

De acuerdo a estos resultados, el 21 de diciembre la radiación captada con la máxima inclinación (45%) orientada hacia el norte, tiene una reducción con respecto al plano horizontal (0%) de 1.9 kWh/m², mientras que la orientación sur con la misma inclinación muestra un incremento de 0.7 kWh/m², **Figura 154a**.

Por otra parte, el 21 de junio con la máxima inclinación (45%), la misma orientación norte tiene un incremento de 1 kWh/m² con respecto al plano horizontal (0%), y esta vez la orientación sur con la misma inclinación tiene una reducción de 1.7 kWh/m², **Figura 154b**.

Debido a la simetría de los recorridos solares en esta ubicación geográfica, las orientaciones norte y sur tienen comportamientos opuestos en cada uno de los solsticios.

En cuanto a la orientación este y oeste, en los dos solsticios se observa una reducción de 0.5 kWh/m² con una inclinación del 45%.

Hasta ahora, estos resultados evidencian la alta influencia de los dos parámetros de análisis sobre la radiación captada en los días de solsticio. Sin embargo, en el caso de las orientaciones norte y sur, aunque la influencia de la INCLINACIÓN sobre la radiación captada es alta, debido a la localización geográfica de esta región la influencia de estas dos ORIENTACIONES puede quedar anulada en un promedio anual.

Por otra parte, en el caso de la orientación este y oeste, tanto la INCLINACIÓN como la ORIENTACIÓN muestran una influencia sobre la reducción de la radiación solar recibida en los dos días de solsticio.

Para tener un enfoque más amplio de la influencia de estas variables sobre la radiación solar recibida, el siguiente análisis se centra en los días cuando el sol alcanza su mayor perpendicularidad en esta ubicación geográfica (3°27''S): 13 DE MARZO Y 29 DE SEPTIEMBRE, y en los resultados ANUALES, **Figura 155**.

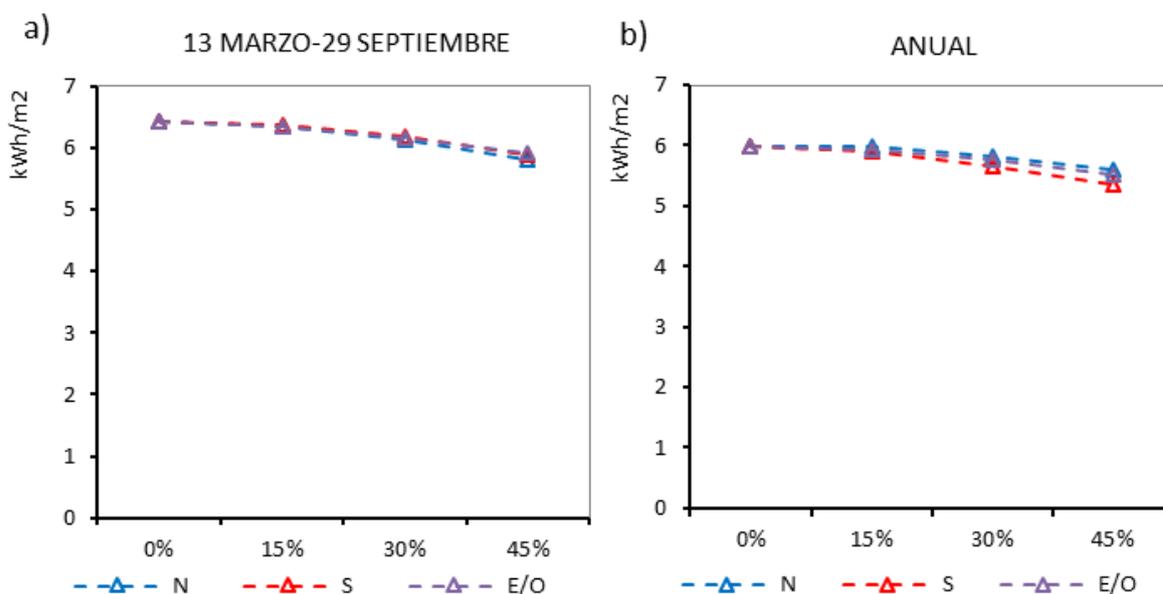


Figura 155 Simulación de la radiación solar recibida sobre la cubierta con un modelo de cielo sin nubes, lat 3°21'S, con diferentes inclinaciones y orientaciones. a) 13 de marzo y 29 de septiembre. b) Promedio de radiación anual.

De acuerdo a estos dos periodos de análisis, la diferencia de la radiación recibida, entre todas las orientaciones es mínima. La mayor diferencia se muestra en los resultados anuales, 0.16 kWh/m², entre la orientación norte y sur con una pendiente del 45%, **Figura 155b**. Mientras que en los días de mayor perpendicularidad de los rayos solares, la diferencia entre todas las orientaciones es nula, **Figura 155a**.

Estos últimos resultados ratifican que la variable de la ORIENTACIÓN no tiene una influencia representativa sobre la radiación recibida en el promedio anual. Sin embargo, en lo que respecta a la INCLINACIÓN, esta variable si muestra una influencia marcada sobre la radiación recibida por la cubierta.

La variable de la inclinación con cualquier orientación muestra una reducción significativa con respecto al plano horizontal. La mayor reducción de la radiación captada anualmente es de 0.7 kWh/m², de 6 kWh/m² con una inclinación del 0% a 5.3 kWh/m² con una inclinación del 45%, lo que representa un decremento del 12%.

En consecuencia, los resultados con este modelo de cielo teórico (sin nubes) muestran que el parámetro de **la ORIENTACIÓN no tiene una influencia representativa sobre la radiación captada en la cubierta.**

Por otra parte, **la INCLINACIÓN si es un parámetro a tomar en cuenta para la reducción del flujo solar captado sobre la cubierta.**

– RADIACIÓN SOLAR MEDIDA: MODELO DE CIELO CON NUBES.

En este apartado se analiza la influencia de la inclinación y la orientación sobre la radiación recibida considerando un modelo de cielo con nubes a partir de los valores medidos. Los resultados toman en cuenta los datos de radiación solar de los dos días tipo: el Día Promedio y el Día Extremo, ajustados a cada una de las fechas de análisis: SOLSTICIO y EQUINOCCIO (día con la mayor perpendicularidad de los rayos solares en esta latitud).

Debido a la simetría de los recorridos solares en esta latitud, el análisis con este modelo de cielo se realiza sólo en el solsticio de diciembre y el equinoccio de septiembre.

En busca de analizar el impacto de la nubosidad sobre la radiación captada, los resultados con el modelo de cielo con nubes han sido comparados con los valores obtenidos con el modelo de cielo totalmente despejado

En el **SOLSTICIO DE DICIEMBRE**, la diferencia entre la ORIENTACIÓN norte y sur con la inclinación máxima es de 0.9 kWh/m² y 1.1 kWh/m² en el Día Promedio y el Día Extremo respectivamente, **Figura 156b**. Esta diferencia es mucho menor de la que se registra en los resultados obtenidos con el modelo de cielo sin nubes, 2.5 kWh/m², **Figura 156a**.

Por otra parte, la diferencia entre la orientación este y oeste con la inclinación máxima es de 0.12 kWh/m², a diferencia de los resultados con un cielo sin nubes donde la diferencia entre esta dos orientaciones es cero. Debido a la diferente nubosidad que existe entre el periodo de la mañana y la tarde, la radiación captada de estas dos orientaciones no es igual, como sucede en el modelo de cielo sin nubes. Aun así, la diferencia entre estas dos orientaciones es mínima.

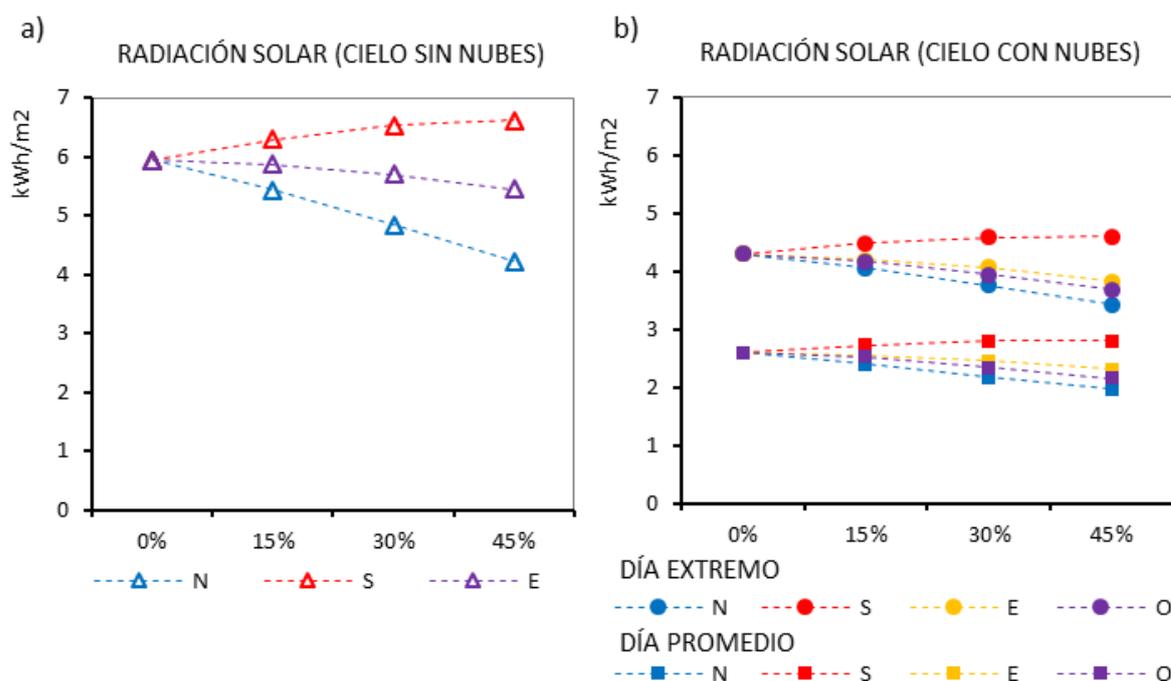


Figura 156 Radiación recibida sobre la cubierta a diferentes inclinaciones y orientaciones en el solsticio de diciembre. a) Radiación teórica: modelo de cielo sin nubes. b) Radiación medida: cielo con nubes, del Día Promedio y el Día Extremo.

En cuanto a la INCLINACIÓN, la diferencia entre los valores extremos (0%-45%) con una orientación norte es de 0.5 kWh/m² en el Día Promedio y 0.7 kWh/m² en el Día Extremo, **Figura 156b**. Otra vez, esta diferencia es mucho menor a la que se obtiene con el modelo de cielo sin nubes, 1.9 kWh/m², **Figura 156a**.

Por tanto, en los días de solsticio, la nubosidad reduce de manera significativa el impacto de la INCLINACIÓN y la ORIENTACIÓN sobre la radiación recibida por la cubierta, en comparación con los resultados con el modelo de cielo sin nubes.

En cuanto a los **DÍAS DE EQUINOCCIO**, conforme a los resultados con el modelo de cielo con nubes, **Figura 157b**, la máxima diferencia entre todas las ORIENTACIONES incluso con la inclinación de 45% es de 0.01 kWh/m² tanto para el Día Extremo como para el Día Promedio. Al igual que los resultados con el modelo de cielo sin nubes, esta variable tiene una influencia casi nula sobre la radiación solar recibida.

En cuanto a la INCLINACIÓN, la diferencia entre los valores extremos (0%-45%) es de 0.12 kWh/m² en el Día Promedio y 0.23 kWh/m² en el Día Extremo. A diferencia de los resultados con el modelo de cielo sin nubes, **Figura 157a**, esta vez la variable de la inclinación tiene una influencia muy reducida sobre la radiación solar recibida por la cubierta.

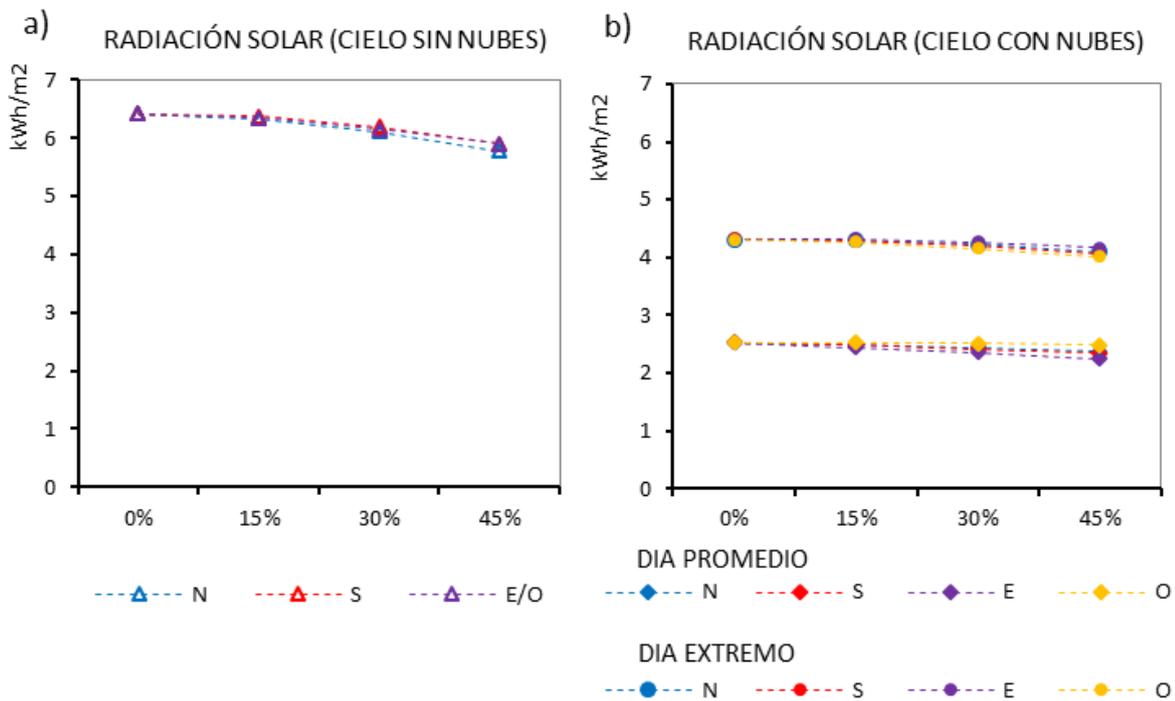


Figura 157. Radiación recibida sobre la cubierta a diferentes inclinaciones y orientaciones en el día de equinoccio. a) Radiación teórica: modelo de cielo sin nubes. b) Radiación medida: cielo con nubes, del Día Promedio y el Día Extremo

Por tanto, en los Días de Equinoccio, aunque la variable de la inclinación tiene una mayor repercusión sobre la radiación recibida que la orientación, esta repercusión aún es poco representativa.

De acuerdo a los resultados con este modelo de cielo con nubes, debido a que la mayor parte del flujo solar proviene de la componente difusa, la radiación recibida depende en mayor proporción del porcentaje de cielo visto que de las trayectorias solares. Por lo tanto, la inclinación y la orientación de la cubierta tienen una repercusión mínima tanto en los Días de Solsticio como en los Días de Equinoccio.

Conforme a todo lo expuesto en este apartado, debido a la simetría de las trayectorias solares de esta latitud, la variable de la ORIENTACIÓN tiene una influencia casi nula sobre la radiación recibida de la cubierta, de acuerdo a los resultados obtenidos con el modelo de cielo con nubes y con el modelo de cielo sin nubes.

De acuerdo a los resultados con este modelo de cielo con nubes, que corresponden a valores medidos de radiación solar y porcentaje de cobertura del cielo medidos en esta región,

En consecuencia, de acuerdo al análisis realizado en este apartado se ha podido determinar que **la influencia de la INCLINACIÓN y la ORIENTACIÓN de la cubierta sobre el flujo solar recibido de la cubierta es POCO SIGNIFICATIVA en esta región.**

A5.2.2 INFLUENCIA SOBRE LA RADIACIÓN DE ONDA LARGA.

Debido a la importancia del flujo de onda larga sobre el balance energético de la cubierta, al igual que con la radiación solar, se ha analizado la influencia de la inclinación y la orientación sobre este flujo.

Este análisis se ha separado para el periodo diurno y nocturno, tomando en cuenta las propiedades térmicas de la cubierta y los factores climáticos medidos. Los detalles del cálculo se han realizado de acuerdo al estudio de [Torres-Quezada *et al.*, 2016]

De acuerdo a los resultados en el PERIODO DIURNO, **Figura 158**, tanto la inclinación como la orientación tienen una influencia poco significativa sobre el flujo de onda larga, tanto en el Día Promedio como en el Día Extremo.

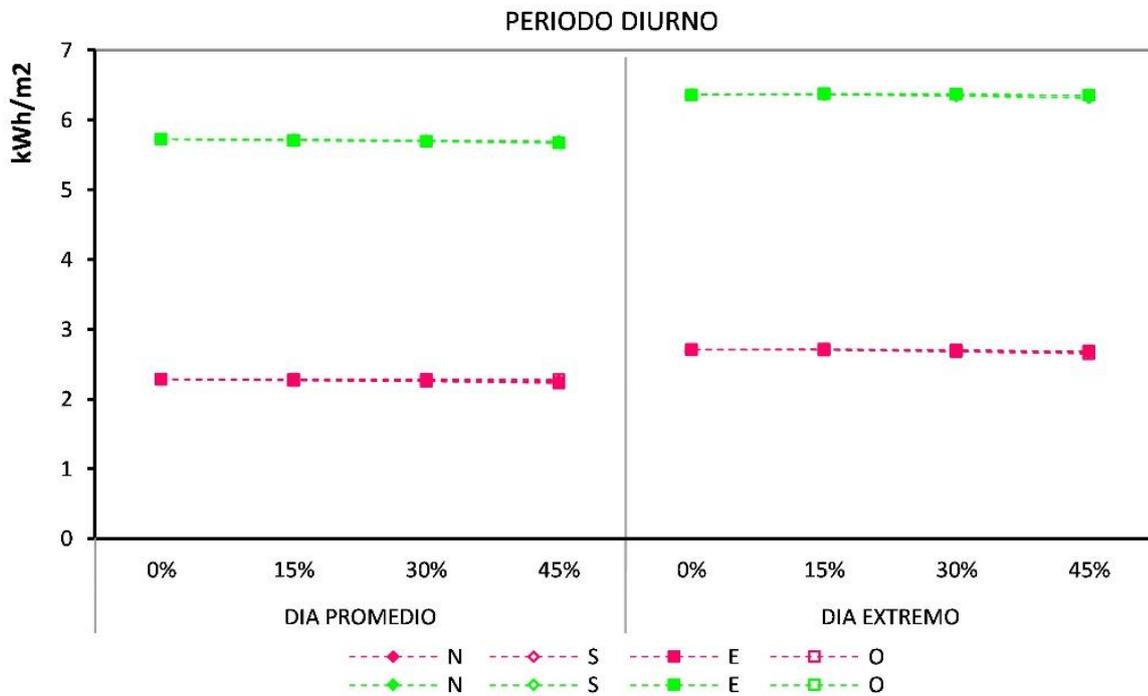


Figura 158 Promedio diario de la radiación de onda larga de la CL (magenta) y la CP (verde) con diferentes inclinaciones y orientaciones, en el Día Promedio y el Día extremo.

De una inclinación del 0% con un SVF del 100 % a una inclinación del 45% con un SVF del 96%, la máxima reducción del flujo es de 0.05 kWh/m² en la CL y 0.07 kWh/m² en la CP, que sucede en el Día Extremo ya que tiene menores temperaturas de cielo que en el Día Promedio.

Debido a que la reducción del SVF correspondiente al incremento de la inclinación es mínima, del 100% al 96%, y sumado a la poca capacidad de enfriamiento que tiene el cielo en esta región, dan como resultado que la diferencia del flujo de onda larga entre las diferentes inclinaciones sea muy reducida.

De igual manera, en el PERIODO NOCTURNO, estos parámetros tienen una influencia casi nula sobre la radiación de onda larga, en especial en la CL, **Figura 159**.

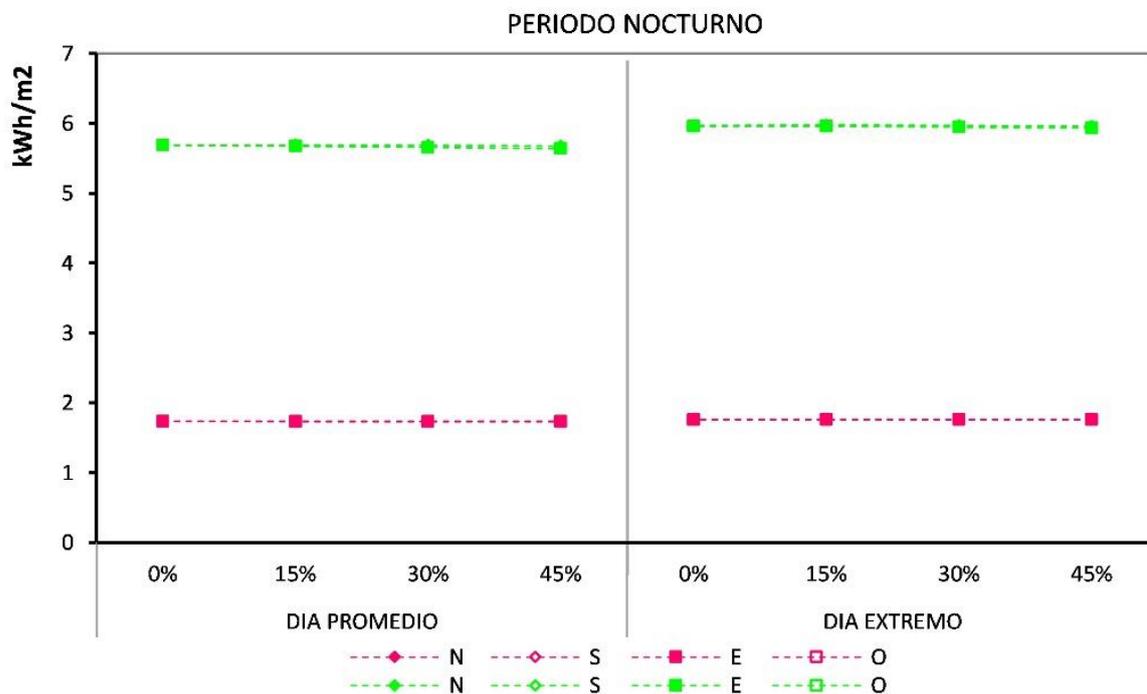


Figura 159 Promedio nocturno de la radiación de onda larga de la CL (magenta) y la CP (verde) con diferentes inclinaciones y orientaciones, en el Día Promedio y el Día extremo.

La mayor reducción del flujo en este periodo es de 0.06 kWh/m² en la CP, mientras que en la CL esta reducción es casi imperceptible.

Hay que hacer notar que tanto en el periodo diurno como en el nocturno, el flujo de calor emitido por la CP es mayor que el de la CL, debido a que tiene un factor de emisividad más alto (0.90). Por tanto, cualquier parámetro que modifique este flujo, tiene una mayor repercusión sobre la CP que en la CL.

A través de estos resultados se ha podido determinar que la influencia de estos dos parámetros sobre la radiación de onda larga emitida es muy reducida en las dos cubiertas, tanto en el periodo diurno como en el nocturno. Sin embargo, estas reducciones, por mínimas que sean, influirán sobre el comportamiento de la temperatura superficial interior de la cubierta, en especial en el periodo nocturno cuando este parámetro depende primordialmente de este flujo.

A5.2.3 INFLUENCIA SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA CUBIERTA.

– INCLINACIÓN

La **Figura 160** y muestran los resultados horarios del análisis de la variable de la INCLINACIÓN con orientación ESTE, en el Día Promedio y en el Día Extremo,

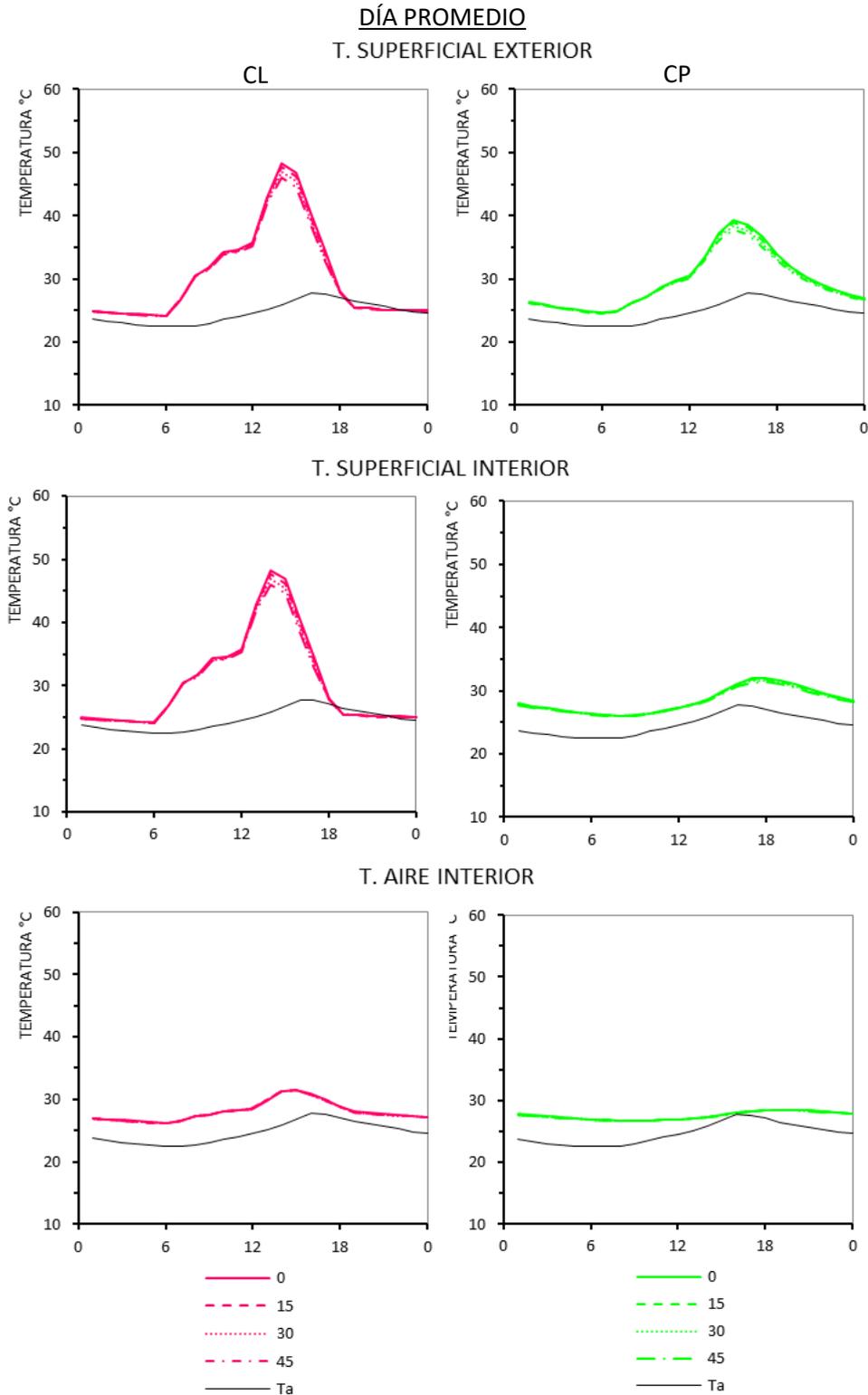


Figura 160 INCLINACIÓN: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y CP (derecha), en el Día Promedio.

DÍA EXTREMO

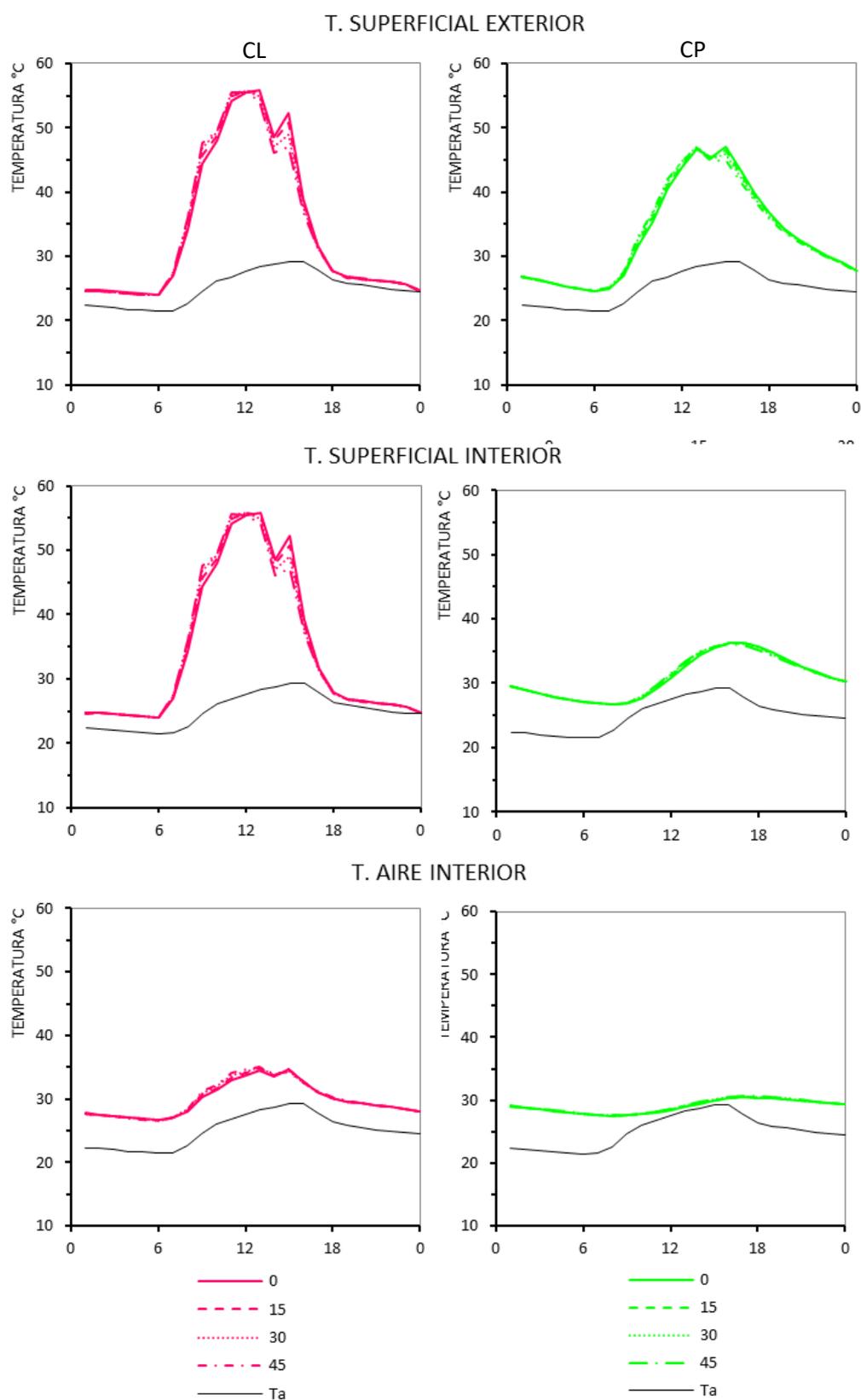


Figura 161 INCLINACIÓN: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Extremo.

– **ORIENTACIÓN**

La **Figura 162** y **Figura 163** se muestra los resultados de la variable **ORIENTACIÓN** con una inclinación de **45%** en el Día Promedio y el Día Extremo respectivamente.

DÍA PROMEDIO

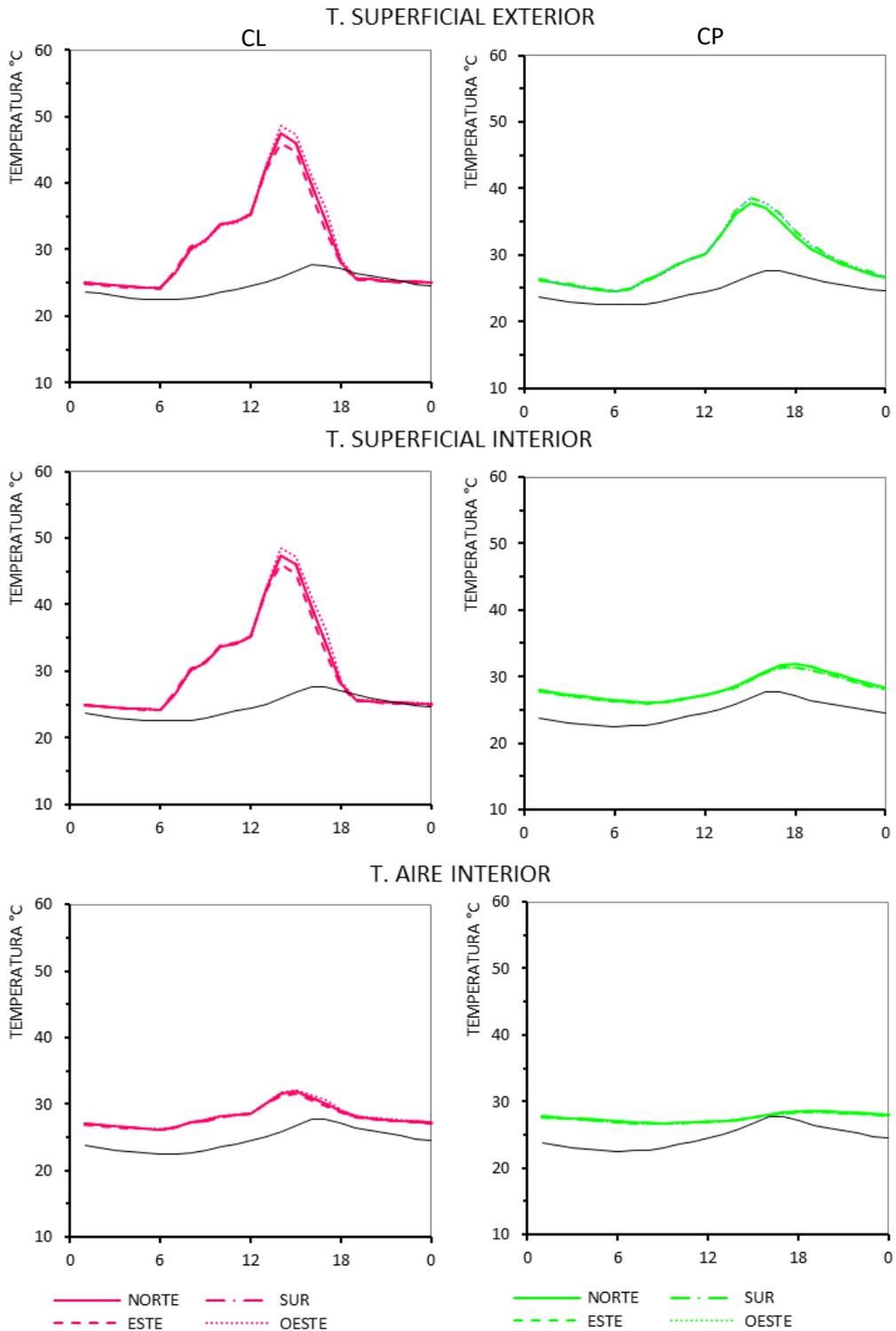


Figura 162 ORIENTACIÓN: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Promedio.

DÍA EXTREMO

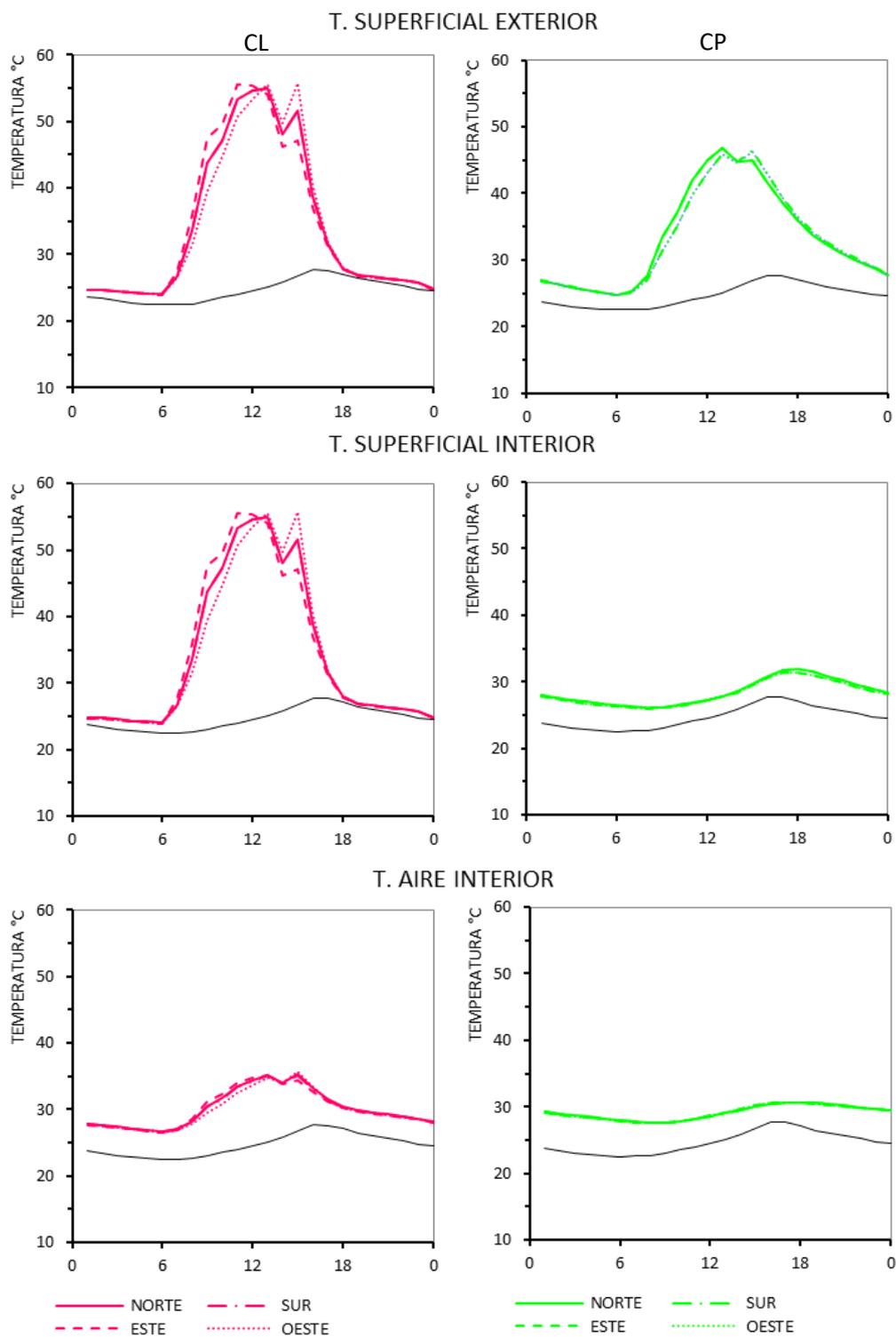
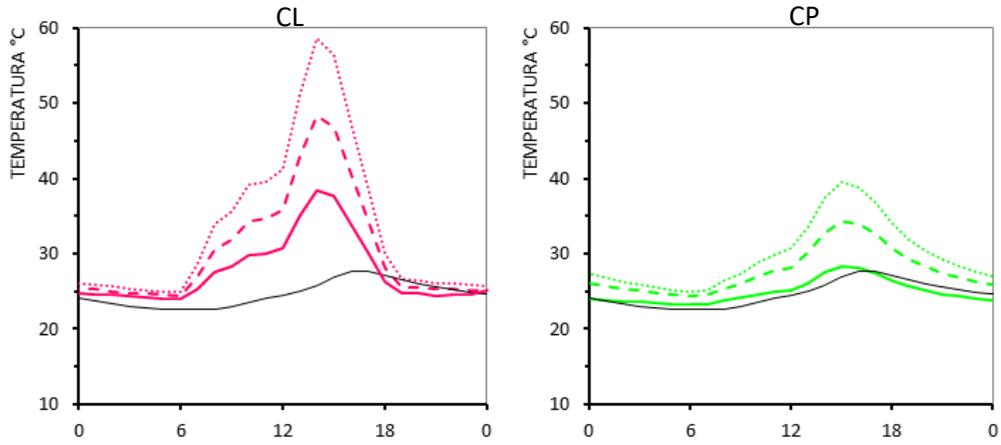


Figura 163 ORIENTACIÓN: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Extremo.

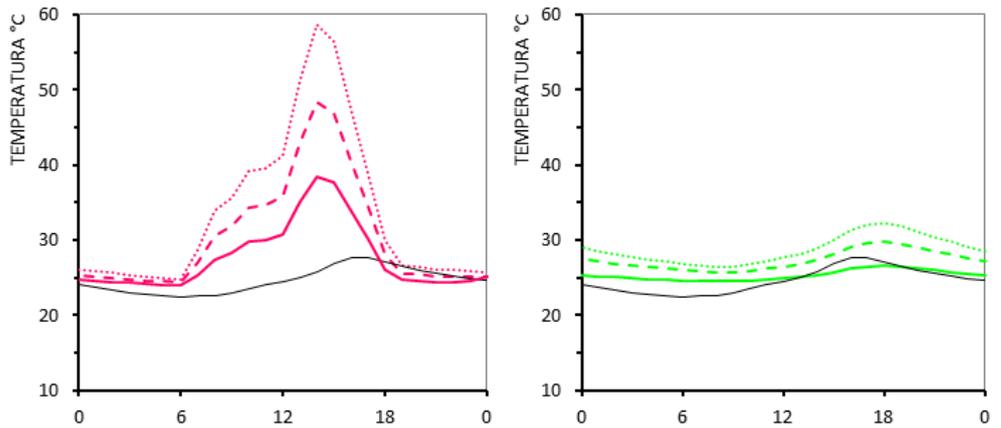
A4.3 REFLECTIVIDAD AL VISIBLE

DÍA PROMEDIO

T. SUPERFICIAL EXTERIOR



T. SUPERFICIAL INTERIOR



T. AIRE INTERIOR

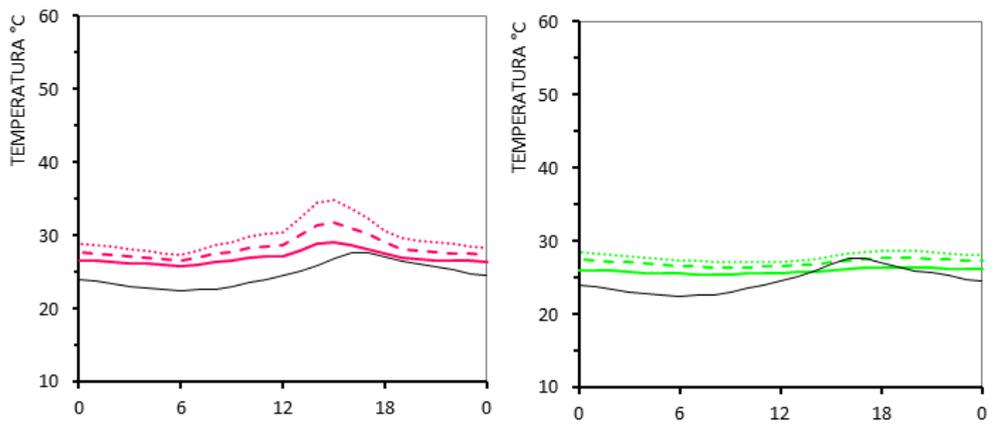


Figura 164 REFLECTIVIDAD: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Promedio.

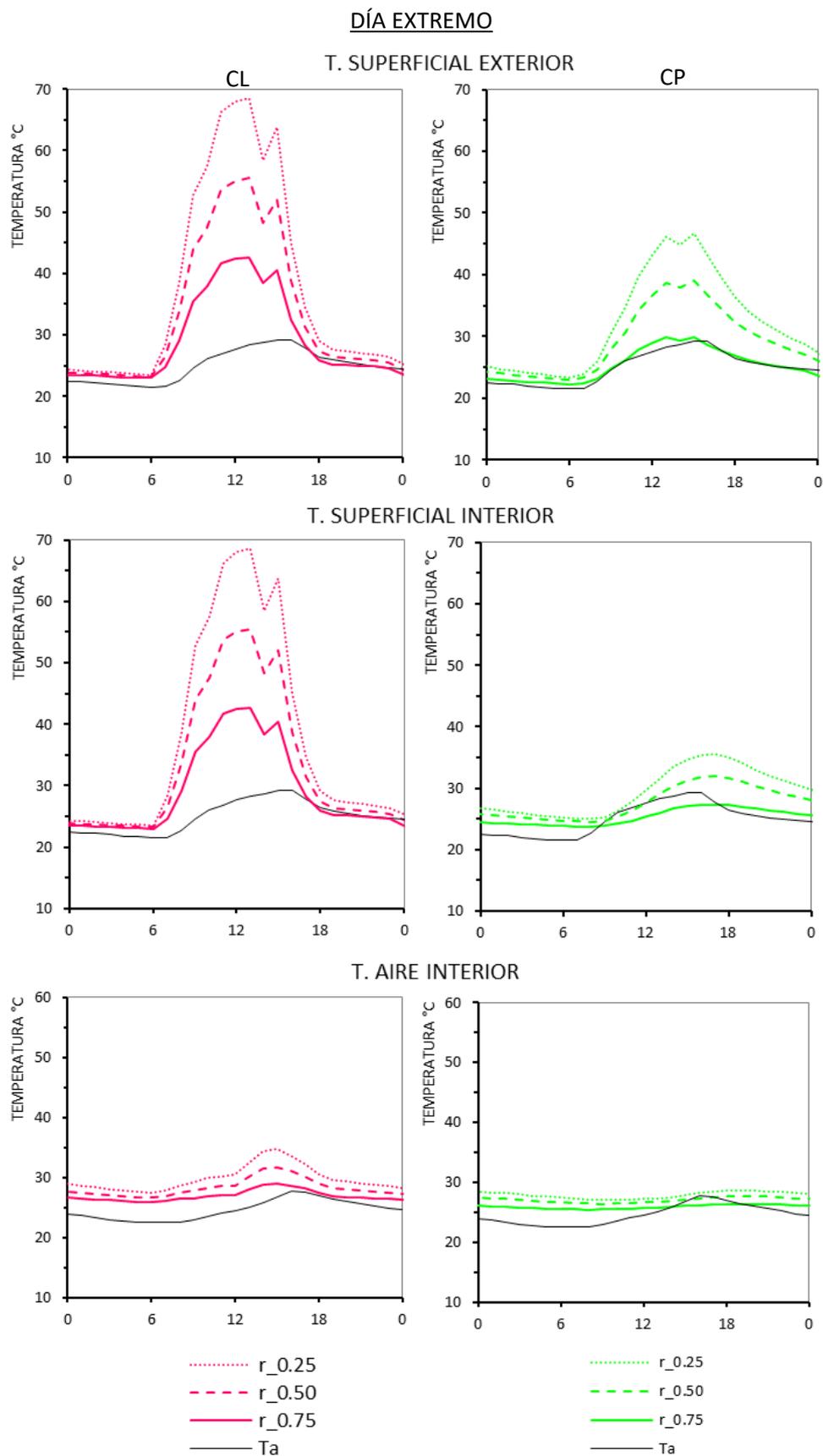


Figura 165 REFLECTIVIDAD: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), Día Extremo.

A4.4 EMISIVIDAD

DÍA PROMEDIO

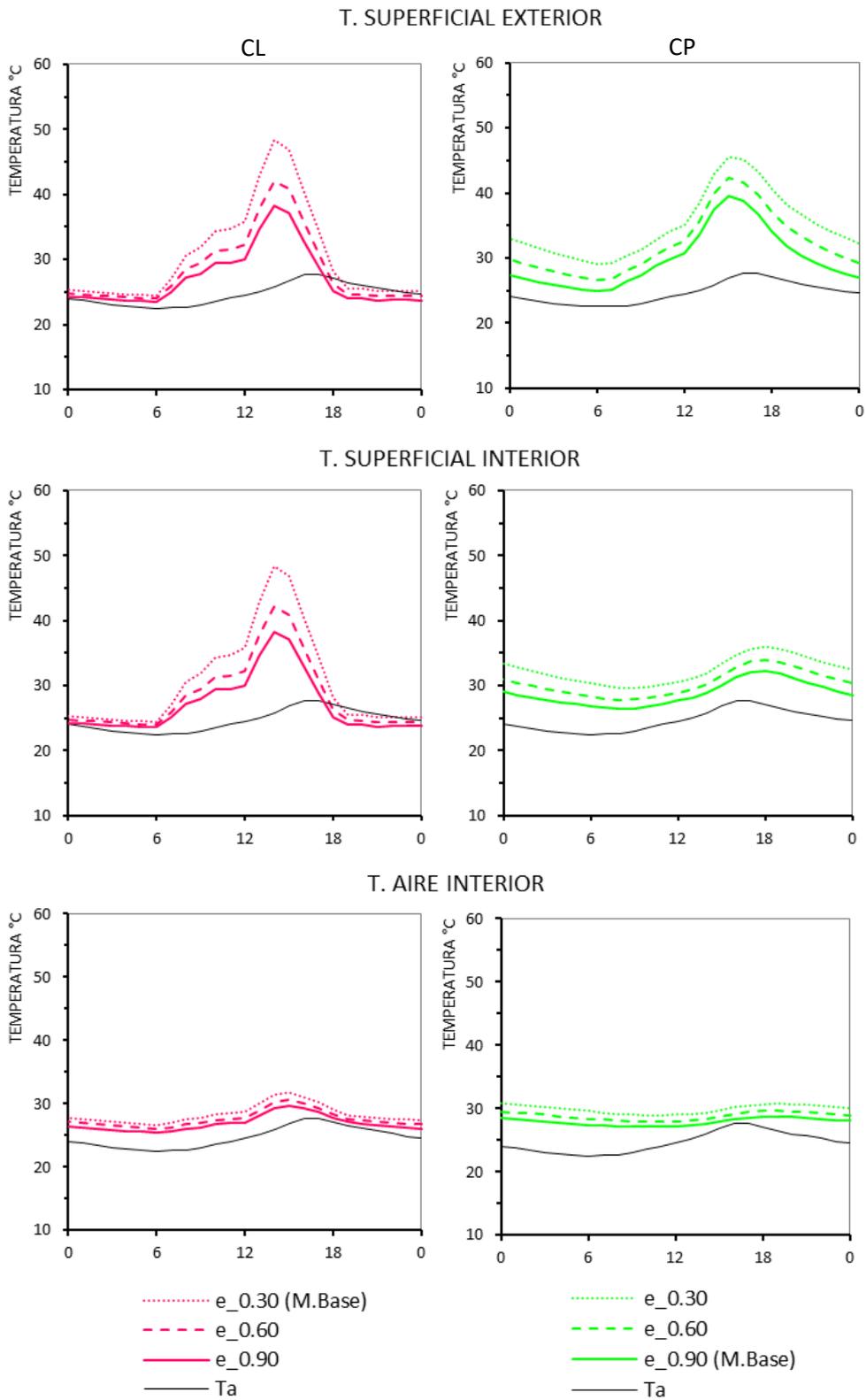
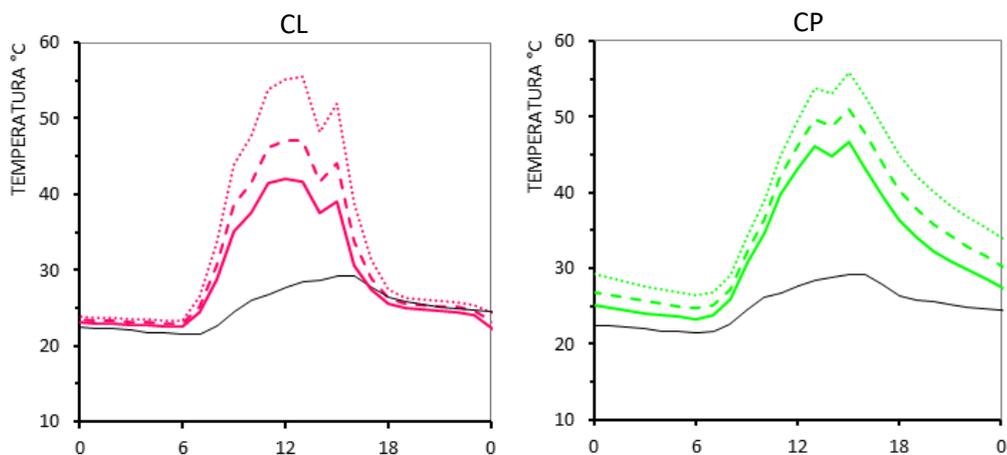


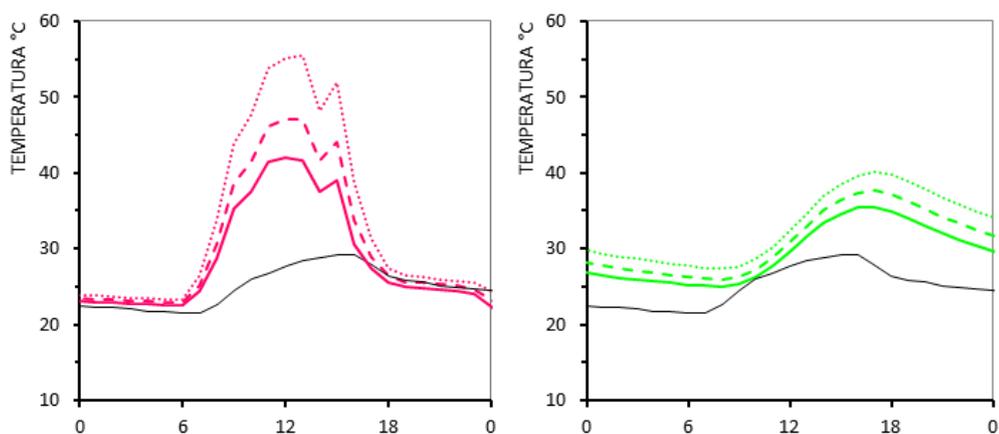
Figura 166 EMISIVIDAD: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Promedio.

DÍA EXTREMO

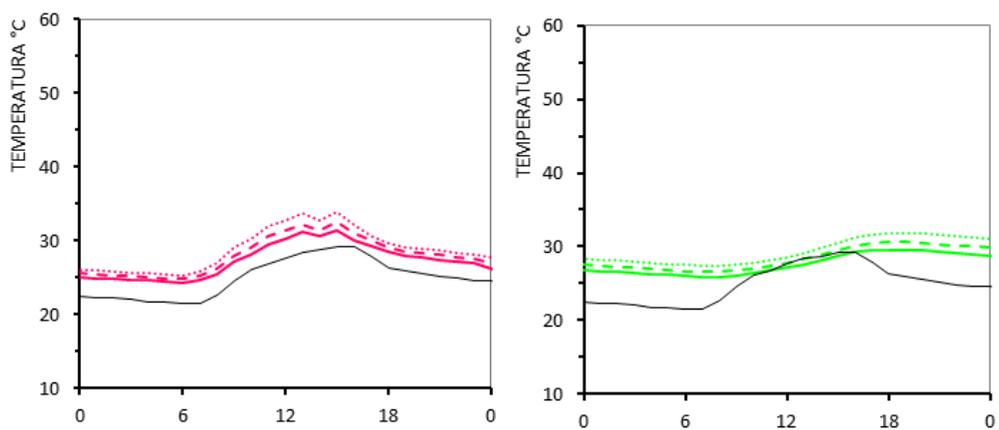
T. SUPERFICIAL EXTERIOR



T. SUPERFICIAL INTERIOR



T. AIRE INTERIOR



..... e_0.30 (M.Base)
 - - - e_0.60
 - - - e_0.90
 — Ta

..... e_0.30
 - - - e_0.60
 - - - e_0.90 (M.Base)
 — Ta

Figura 167 EMISIVIDAD: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Extremo.

A4.5 DOBLE CAPA

DÍA PROMEDIO

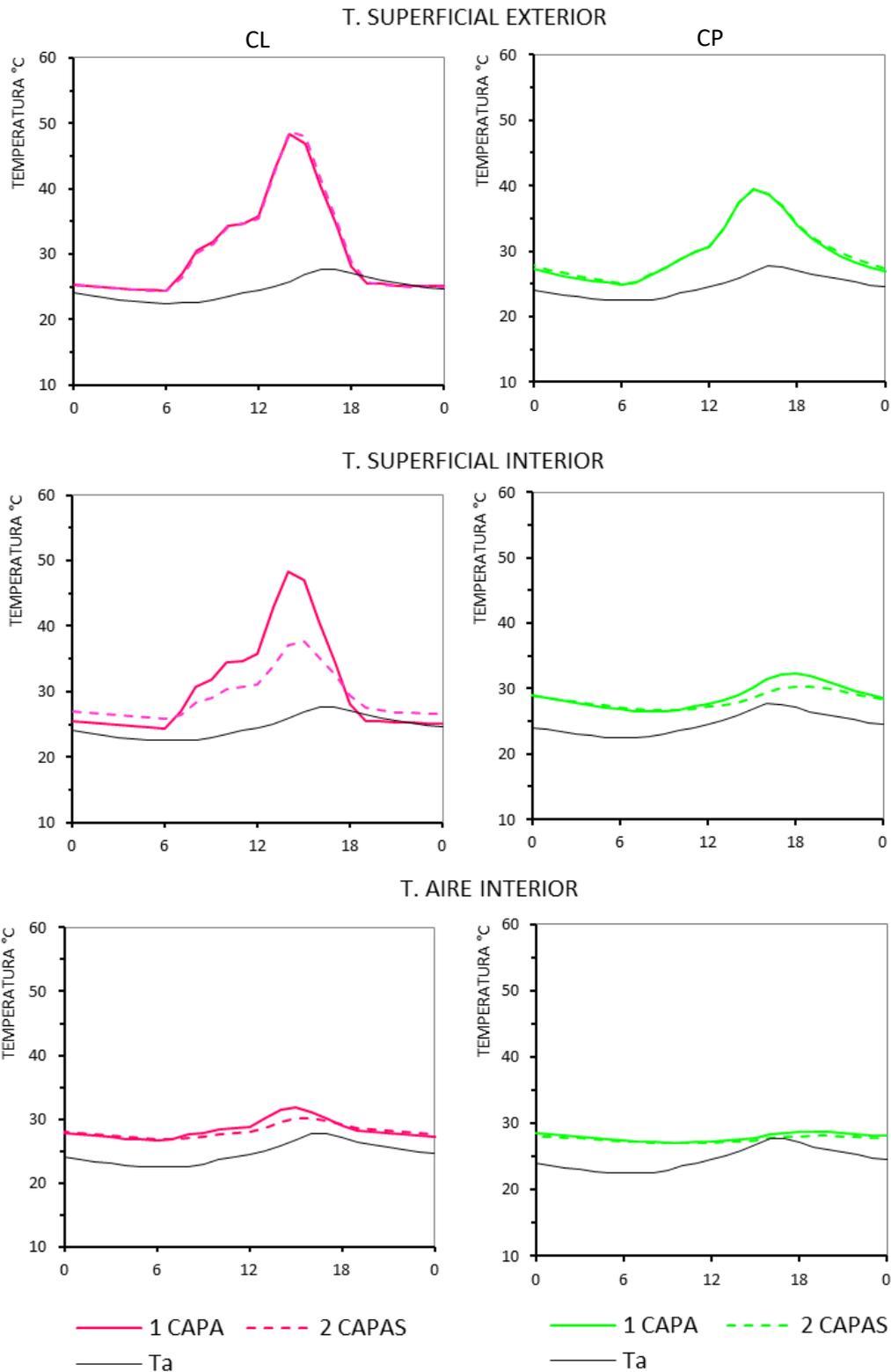
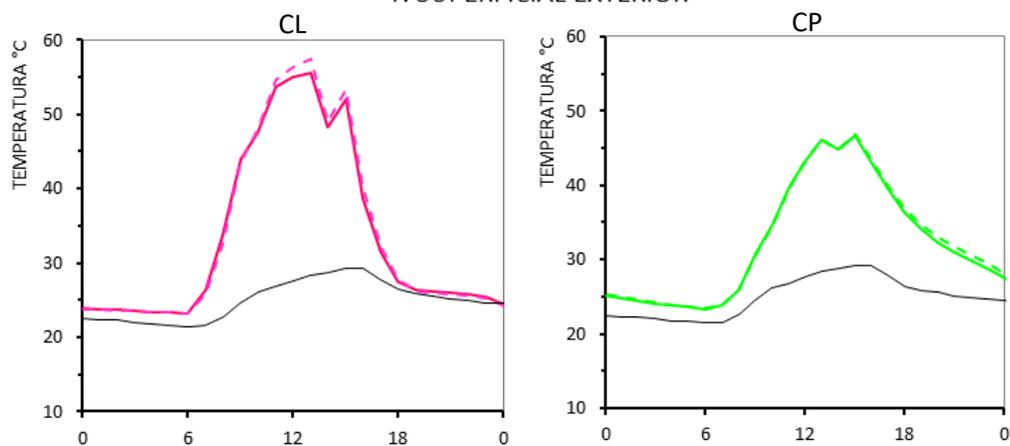


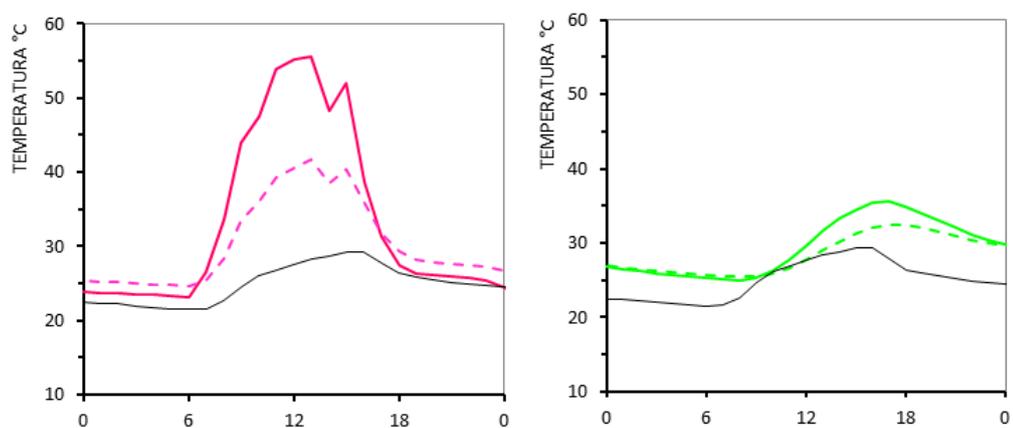
Figura 168 DOBLE CAPA: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Promedio.

DÍA EXTREMO

T. SUPERFICIAL EXTERIOR



T. SUPERFICIAL INTERIOR



T. AIRE INTERIOR

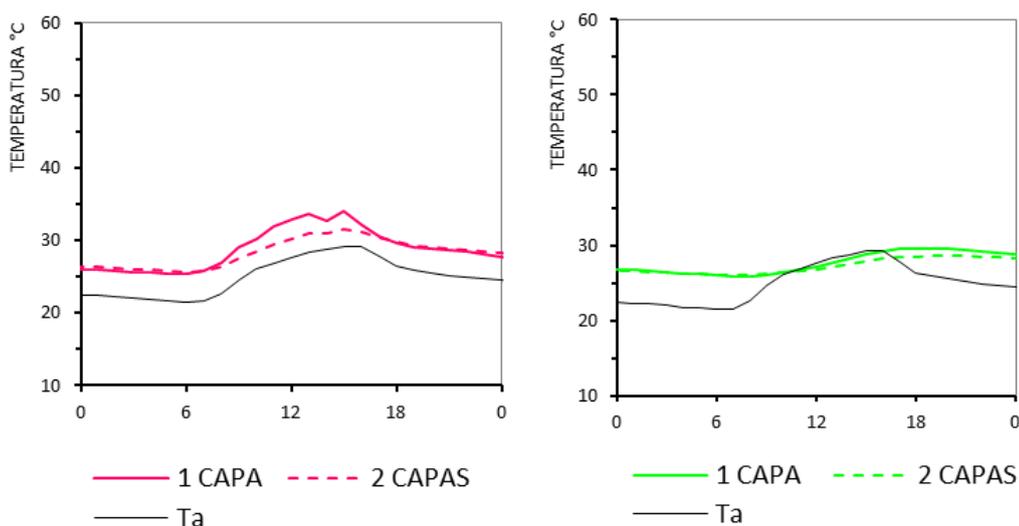


Figura 169 DOBLE CAPA: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Extremo.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LA CUBIERTA EN UN CLIMA CÁLIDO HÚMEDO.
Repercusión energética en el edificio.

- Agencia Estatal de Meteorología (2012). *Atlas de Radiación Solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT., Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España.* Available at: http://www.aemet.es/documentos/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar/atlas_de_radiacion_24042012.pdf (Accessed: 11 May 2016).
- Akbari, H., Levinson, R., Berhe, A. A., Graveline, S., Foley, K., Delgado, A. H. and Paroli, R. M. (2005). *Aging and Weathering of Cool Roofing Membranes.* Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Akbari, H., Wray, C. P., Levinson, R. M. and Xu, T. T. (2006). *Inclusion of Solar Reflectance and Thermal Emittance Prescriptive Requirements for Steep-Sloped Nonresidential Roofs in Title 24, Report to the California Energy Commission.*
- Akbari, H. and Konopacki, S. (1998). The Impact of Reflectivity and Emissivity of Roofs on Building Cooling and Heating Energy Use, in *Proceedings of Thermal VII: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII*, pp. 29–39.
- Akbari, H., Levinson, R. and Berdahl, P. (1996). ASTM standards for measuring solar reflectance and emittance of construction materials and comparing their steady-state of surface temperature., in *Proceedings of the 1996 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Pacific Grove, Calif.*
- Al-Obaidi, K. M., Ismail, M. and Abdul Rahman, A. M. (2014). Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review, *Frontiers of Architectural Research*, 3(3), pp. 283–297. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foar.2014.06.002>.
- Alados-Arboledas, L., Vida, J. and Olmo, F. J. (1995). The estimation of thermal atmospheric radiation under cloudy conditions, *International Journal of Climatology*, 15(1), pp. 107–116. <http://doi.wiley.com/10.1002/joc.3370150111>.
- Allen, L. K. K., Elias, S. and Lim, C. H. (2008). Thermal Performance Evaluation of roofing systems and materials in Malaysian residential development, in *Proceedings of SENVAR, ISESEE, Humanity and Technology.*, pp. 387–395.
- ANSI/ASHRAE (2001). *Standard 90.2-2004, Energy Efficient Design of Low-Rise Residential Buildings, ASHRAE/IES 90.2-2007R.* Atlanta, USA.
- ARCONEL (2013). *Boletín Estadístico Sector Eléctrico Ecuatoriano 2010.* Available at: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/boletines-estadisticos/>.
- ARCONEL (2014). *Estadística Sector Eléctrico Ecuatoriano 2014C.* Available at: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/boletines-estadisticos/>.
- Arellano, B. and Roca, J. (2015). Global Urban Sprawl, in *International Conference on Regional Science*, pp. 121–145.
- ASHRAE (1993). *Handbook Fundamentals, American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers.* Georgia Atlanta.
- ASHRAE (2001). Handbook of Fundamentals. Thermal radiation-Heat transfer. (Chapter 3).

ASTM A792 / A792M-10 (2015). *Standard Specification for Steel Sheet, 55 % Aluminum-Zinc Alloy-Coated by the Hot-Dip Process*, ASTM International. West Conshohocken, PA: www.astm.org.

Atkinson, G. A. (1950). *Building in the Tropics*, Royal Institute of British Architects, 57, pp. 313–319.

Atmaca, I., Kaynakli, O., and Ygit, A. (2007). Effects of radiant temperature on thermal comfort. *Building and Environment*, 42(9), pp. 3210–3220. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.08.009>

Azari, R. and Abbasabadi, N. (2018). Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends, *Energy and Buildings*, 168, pp. 225–235. <http://10.0.3.248/j.enbuild.2018.03.003>.

Badia Masoud (2014) *What is the most effective architectural geometric design solution of roofing system to reduce solar radiation on buildings in Hot Semi - humid Climate Region: Jeddah, Saudi Arabia*. Universidad Politécnica de Cataluña.

Baneshi, M., Gonome, H. and Maruyama, S. (2016). Cool black roof impacts into the cooling and heating load demand of a residential building in various climates, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 152, pp. 21–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.023>.

Beckers, B. (2012) *Solar energy at urban scale*. Hoboken : John Wiley & sons.

Berdahl, P., Akbari, H., Levinson, R. and Miller, W. A. (2008). Weathering of roofing materials – An overview, *Construction and Building Materials*, 22, pp. 423–433. <http://10.0.3.248/J.CONBUILDMAT.2006.10.015>.

Berdahl, P. and Bretz, S. E. (1997). Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials, *Energy and Buildings*, 25, pp. 149–158. [http://10.0.3.248/S0378-7788\(96\)01004-3](http://10.0.3.248/S0378-7788(96)01004-3).

Berdahl, P. and Fromberg, R. (1982). The thermal radiance of clear skies, *Solar Energy*, 29(4), pp. 299–314. [http://10.0.3.248/0038-092X\(82\)90245-6](http://10.0.3.248/0038-092X(82)90245-6).

Bergman, T., Lavine, A., Incropera, F. and Dewitt, D. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Danvers: John Wiley & sons.

Bertoldi, P. and Atanasiu, B. (2009). *Electricity consumption and efficiency trends in European Union*, JRC Scientific and Technical Reports. <http://doi:10.2788/39332>

Biwole, P. H., Woloszyn, M. and Pompeo, C. (2008). Heat transfers in a double-skin roof ventilated by natural convection in summer time, *Energy and Buildings*, 40(8), pp. 1487–1497. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.02.004>.

Boulifa, M., Adane, A., Rezagui, A. and Ameer, E. Z. (2015). Estimate of the Global Solar Radiation by Cloudy Sky Using HRV Images, *Energy Procedia*, 74, pp. 1079–1089. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.747>.

Bretz, S. E. and Akbari, H. (1997). Long-term performance of high-albedo roof coatings, *Energy and Buildings*, 25, pp. 159–167. [http://10.0.3.248/S0378-7788\(96\)01005-5](http://10.0.3.248/S0378-7788(96)01005-5).

Cabeza, L., Barrenechea, C., Miró, L., Morera, J., Bartolíc, E. and Fernández, I. (2013). Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, pp. 536–542. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.017>.

CCE(Cámara de la Construcción de Ecuador) (2014) .Boletín Técnico, 29-4.

CCE (2011) *Eficiencia energética en la construcción en Ecuador*. 11th edn, Norma Ecuatoriana de la Construcción. 11th edn. Quito, Ecuador.

Celis, F., Garcia, R., Trebilcock, M., Escorcía, O., Bruscato, U. and Diaz, M. (2012) .Análisis energético de las viviendas del centro-sur de Chile, *Arquitectura y Ambiente*, 8(1), pp. 62–75. <http://10.0.15.173/arq.2012.81.07>.

Chastas, P., Theodosiou, T. and Bikas, D. (2016) .Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review, *Building and Environment*, 105, pp. 267–282. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.040>.

Chou, S. K. and Lee, Y. K. (1988) .A simplified overall thermal transfer value equation for building envelopes, *Energy*, 13(8), pp. 657–670. [http://10.0.3.248/0360-5442\(88\)90096-5](http://10.0.3.248/0360-5442(88)90096-5).

Clark, G. and Allen, C. (1978) .The Estimation of Atmospheric Radiation for Clear and Cloudy Skies, in *Proceedings 2nd National Passive Solar Conference (AS/ISES)*, pp. 675–678.

Coch, H. (1998) .Bioclimatism in vernacular architecture, *Renewable and Sustainable Energy and Reviews*, 2, pp. 67–87.

Coch, H. and Serra, R. (1995) *Arquitectura y energía natural*. Barcelona : Edicions UPC.

Conelec (2008) *Atlas solar del Ecuador con fines de generación eléctrica.*, Corporación para la Investigación Energética. Quito, Ecuador.

CONELEC (1999) *Estadística del Sector Eléctrico Ecuatoriano 1990-1988*. Quito, Ecuador. Available at: <http://www.conelec.gob.ec/>.

Der-petrosian, B. and Johansson, E. (2001) .Construction and Environment – Improving energy efficiency, *Building Issues 2000*, 10(2), pp. 1–21.

Díaz, O. (2012) “ *La cubierta metálica en el clima cálido húmedo : análisis del comportamiento térmico y efecto en el confort del techo de zinc de la vivienda vernácula dominicana* ”. Universidad Politécnica de Cataluña.

de Diego, M. (2017) *ARQUITECTURA ALTERNATIVA III: ARQUITECTURAS DE EMERGENCIA*. Universitat Politècnica de Valencia.

Dimoudi, A., Androutsopoulos, A. and Lykoudis, S. (2006) .Summer performance of a ventilated roof component, *Energy and Buildings*, 38, pp. 610–617. <http://10.0.3.248/j.enbuild.2005.09.006>.

Dollfus, J. (1954) *Les aspects de l'architecture Populaire dans le monde*. París: Editions Albert Morancé.

Downs A (1999) .Some Realities about Sprawl and urban decline, *Housing Policy Debate*, 10(4), pp. 955–974.

Edmonds, I. R. and Greenup, P. J. (2002) .Daylighting in the tropics, *Solar Energy*, 73(2), pp. 111–121. [http://10.0.3.248/S0038-092X\(02\)00039-7](http://10.0.3.248/S0038-092X(02)00039-7).

Eilert, P. (2000) *High Albedo (Cool) Roofs: Codes and Standards Enhancement*, Pacific Gas and Electric Company. San Francisco, USA.

ENERGYPLUS (2015) .EnergyPlus TM Documentation Auxiliary EnergyPlus Programs Extra programs for EnergyPlus, pp. 1–144.

EnergyStar (2010) *ENERGY STAR® Program Requirements for Roof Products Partner Commitments Commitment*.

Escobar, V. (2013) *Parámetros de diseño de cubiertas ventiladas metálicas para clima cálido húmedo en Tabasco*. Universidad Politécnica de Cataluña.

Escobar, V. (2017) *La cubierta ventilada metálica en el clima cálido húmedo*. Universidad Politécnica de Catalunya.

Fanger, P. O., Bahhid, L., Olesen, B. W. and Langkilde, G. (1980) .Comfort limits for heated ceilings, *ASHRAE Transactions*, 86(2), pp. 141–156.

GAD_SANTAROSA (2016) *CATASTRO MUNICIPAL DE SANTA ROSA*. Santa Rosa.

Gagliano, A., Patania, F., Nocera, F., Ferlito, A. and Galesi, A. (2012) .Thermal performance of ventilated roofs during summer period, *Energy and Buildings*, 49, pp. 611–618. <http://10.0.3.248/j.enbuild.2012.03.007>.

Geetha, N. and Velraj, R. (2012) .Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage—A review, *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 29(2), pp. 913–946.

George, R. L. and Maxwell, E. L. (1999) .High-resolution maps of solar collector performance using a climatological solar radiation model, in *Proceedings The Solar 99 Conference*, pp. 242–248.

Ghaedi, A., Ghaedi, H. and Ghaedi, H. (2012) .The Role of Roof Shapes in Design of Green Building Systems (Case Study: Iran, BandarAbbas), in *Procedia APCBEE*, pp. 335–340. <http://10.0.3.248/j.apcbee.2012.03.055>.

Golany, S. (1996) .URBAN DESIGN MORPHOLOGY PERFORMANCE, *Atmospheric Environment*, 30(3), pp. 455–465.

H. Akbari, S. Konopacki, D. P. (2000) *Updates on Revision to ASHRAE Standard 90.2: Including Roof Reflectivity for Residential Buildings*, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California.

Holman, J. P. (1997) *Heat transfer*. New York: McGraw-Hill Companies.

Idris, A., Virgone, J., Vergnault, E., David, D. and Idriss, A. I. (2017) .Energy Saving Potential with a Double-Skin Roof Ventilated by T Natural Convection in Djibouti, in *Energy Procedia*, pp. 361–373. <http://10.0.3.248/j.egypro.2017.11.149>.

Inamhi (2013) *Atlas Hidrológico y Metereológico Estudiantil 2013*, Instituto Nacional de Metereología e Hidrología. Quito, Ecuador.

- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) (2008) *NTE_INEN 2221:Paneles de Acero. Requisitos*. Quito, Ecuador: INEN.
- Jayasinghe, M. T. R., Attalage, R. A. and Jayawardena, A. I. (2003) .Roof orientation, roofing materials and roof surface colour: their influence on indoor thermal comfort in warm humid climates, *Energy for Sustainable Development*. International Energy Initiative, Inc., 7(1), pp. 16–27.
- Jim, C. Y. (2015) .Diurnal and partitioned heat-flux patterns of coupled green-building roof systems, *Renewable Energy*, 81, pp. 262–274. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.044>
- Kalmár, F., Kalmár, T. (2012). Interrelation between mean radiant temperature and room geometry. *Energy and Buildings*, 55, pp. 414–421. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.025>
- Kamal, M. A. (2012). An Overview of Passive Cooling Techniques in Buildings : Design Concepts and Architectural Interventions, *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*, 55(1), pp. 84–97.
- Kennedy, J. (2017) “*Permanently Unfinished*”: *The Evolution of Architecture in the Galapagos Islands*, *ArchDaily*. Available at: <http://www.archdaily.com/802383/permanently-unfinished-the-evolution-of-architecture-in-the-galapagosislands> > ISSN 0719-8884 (Accessed: 1 February 2017).
- Koch-Nielsen, H. (2002) *Stay cool : a design guide for the built environment in hot climates*. London, UK: Earthscan.
- Koenigsberger, O., Ingersoll, T., Mayhew, A. and Szokolay, S. (1975) *Manual of tropical housing and building climatic design*. Hyderabad: Orient Blackswan.
- Kolokotroni, M., Gowreesunker, B. L. and Giridharan, R. (2013) .Cool roof technology in London: An experimental and modelling study, *Energy and Buildings*, 67, pp. 658–667. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.011>.
- Kolokotsa, D., Diakaki, C., Papantoniou, S. and Vlissidis, A. (2012) .Numerical and experimental analysis of cool roofs application on a laboratory building in Iraklion, Crete, Greece, *Energy and Buildings*, 55, pp. 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.011>.
- Konya, A., Swanepoel, C. and Fontes, R. (1981) *Diseño en climas cálidos manual práctico*. Madrid, España: H. Blume.
- Kua, H. W. and Wong, C. L. (2012) .Analysing the life cycle greenhouse gas emission and energy consumption of a multi-storied commercial building in Singapore from an extended system boundary perspective, *Energy and Buildings*, 51, pp. 6–14. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.027>.
- Kumar, M., Mahapatra, S. and Atreya, S. K. (2009) .Bioclimatism and vernacular architecture of north-east India, *Building and Environment*, 44, pp. 878–888. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.008>.
- Lai, C. M., Huang, J. Y. and Chiou, J. S. (2008) .Optimal spacing for double-skin roofs, *Building and Environment*, 43(10), pp. 1749–1754. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.11.008>.
- Lauber, W., Cheret, P., Ferstl, K. and Ribbeck, E. (2005) *Tropical architecture : sustainable and humane building in Africa, Latin America, and South-East Asia*. New York: Prestel.

Lee, S., Park, S. H., Yeo, M. S. and Kim, K. W. (2009) .An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof, *Building and Environment*, 44, pp. 1431–1439.

Levine, M., D., Ü.-V., K., B., Geng L., H. D., S., L., G., L., A., M. M., et al. (2007) *Residential and commercial buildings. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)]*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Liu, F., Meyer, A. S. and Hogan, J. (2010) *Mainstreaming building energy efficiency codes in developing countries : global experiences and lessons from early adopters*. Washington, DC: World Bank.

López, J., Isalgué, A., Coch, H., and Alonso, C. (2014). Yellow is green: An opportunity for energy savings through colour in architectural spaces, *Energy and Buildings*, 78, pp 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.04.011>

Loudon, A. G. (1968) .Summertime temperatures in buildings without airconditioning., in *Thermal environment in modern buildings - aspects affecting the design team*, p. 47.

Luiz, E. W., Martins, F. R., Costa, R. S. and Pereira, E. B. (2018) .Comparison of methodologies for cloud cover estimation in Brazil - A case study, *Energy for Sustainable Development*, 43, pp. 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.12.001>.

MCSE (2015) *Balance Energético Nacional 2015*. Quito, Ecuador.

Muscio, A. and Akbari, H. (2017) .An index for the overall performance of opaque building elements subjected to solar radiation, *Energy and Buildings*, 157, pp. 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.010>.

Nahon, R., Blanpain, O. and Beckers, B. (2016) .Impact of the anisotropy of the sky vault emissivity on the building envelope radiative budget, in *Proceedings First International Conference on Urban Physics*, pp. 26–39.

Noelia, A., Erica, C. and Alicia, C. M. (2014) .Urban Passive Cooling. Aging Effects on Optical Properties of Roof Tiles, *Energy Procedia*, 57, pp. 3181–3190. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.068>

NOVACERO (2016) *CATÁLOGO DE PRODUCTOS NOVACERO*. Available at: www.novacero.com (Accessed: 1 June 2016).

Nurnberg, D., Ycaza, J. E. and Holm, O. (1982) *Arquitectura vernácula en el litoral*. Guayaquil, Ecuador: Archivo Histórico del Guayas.

Olgay, V. (1963) .Design with Climate_ Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. Princeton University.

ONU (2000) *Población de Ecuador*. Quito, Ecuador.

Pagés-Ramon, A. (2014) *Caracterització del sector de l'edificació des del punt de vista de les emissions de gasos d'efecte hivernacle*. UPC.

- Patania F, Gagliano A, Nocera F, Ferlito A, Galesi A (2011) .Energy analysis of ventilated roof sustainability in energy and buildings smart innovation, *Sytems and Technologies*, 7, pp. 15–23.
- Prado, R. T. A. and Ferreira, F. L. (2005) .Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials, *Energy and Buildings*, 37, pp. 295–300. <http://10.1016/j.enbuild.2004.03.009>
- Raftery, P., Keane, M. and Costa, A. (2011) .Calibrating whole building energy models: Detailed case study using hourly measured data, *Energy and Buildings*, 43(12), pp. 3666–3679. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.039>.
- Real-Estate-Research-Corporation (1974) *The cost of sprawl: environmental and economic costs of alternative residential development patterns at the urban fringe*. Portland Regional Planning History.26.
- Santamouris, M. and Kolokotsa, D. (2013) .Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art, *Energy and Buildings*, 57, pp. 74–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.11.002>.
- Serra, R. y Coch, H. (2001) *ARQUITECTURA Y ENERGÍA NATURAL*. Barcelona: Edicions UPC.
- Simpson, J. R. and McPherson, E. G. (1997) .The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona, *Energy and Buildings*, 25(2), pp. 127–137. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(96\)01002-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(96)01002-X).
- Song, Z., Zhang, W., Shi, Y., Song, J., Qu, J., Qin, J., Zhang, T., *et al.* (2013) .Optical properties across the solar spectrum and indoor thermal performance of cool white coatings for building energy efficiency, *Energy and Buildings*, 63, pp. 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.051>.
- Stone, B., Hess, J. J. and Frumkin, H. (2010) .Urban form and extreme heat events: Are sprawling cities more vulnerable to climate change than compact cities?, *Environmental Health Perspectives*, 118(10), pp. 1425–1428. <http://10.05.9/ehp.0901879>.
- Suehrcke, H., Peterson, E. L. and Selby, N. (2008) .Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate, *Energy and Buildings*, 40, pp. 2224–2235. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.015>.
- Swinbank, W. C. (1963) .Long-wave radiation from clear skies, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), pp. 339–348. <https://doi.org/10.1002/qj.49708938105>.
- Synnefa, a., Santamouris, M. and Livada, I. (2006) .A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment, *Solar Energy*, 80, pp. 968–981. <http://10.1016/j.solener.2005.08.005>
- Tabares-velasco, P. C., Christensen, C., Bianchi, M. and Booten, C. (2012) *Verification and Validation of EnergyPlus Conduction Finite Difference and Phase Change Material Models for Opaque Wall Assemblies Verification and Validation of EnergyPlus Conduction Finite Difference and Phase Change Material Models for Opaque Wall Asse*. Colorado, USA.
- Tambaco, A. (2012) *Análisis de la arquitectura vernácula del Ecuador: Propuestas de una arquitectura contemporánea sustentable* . Universidad Politecnica de Cataluña.

Tong, S., Li, H., Zingre, K. T., Wan, M. P., Chang, V. W. C., Wong, S. K., Toh, W. B. T., *et al.* (2014) .Thermal performance of concrete-based roofs in tropical climate, *Energy and Buildings*, 76, pp. 392–401. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.02.076>.

Torres-Quezada, J. (2015) *Radiación por cubierta*. Universidad Politécnica de Catalunya.

Torres-Quezada, J., Pages, A., Coch, H. and Isalgué, A. (2016) .Radiative Performance assessment of two roofs in Mediterranean and Equatorial climates., in *First International Conference on Urban Physics*, pp. 337–348.

Torres-Quezada, J., Coch, H., Isalgué, A. and López, J. (2018) *The roof impact on the heat balance of low height buildings at low latitudes, PLEA: Smart and Healthy within the 2-degree limit*.

Trefil, J. (2003) *The nature of science : an A-Z guide to the laws and principles governing our universe*. Auburn, WA, U.S.A: Houghton Mifflin Harcourt.

Ubidia, J. A. M., Ruiz, M. C. G. and Navarrete, I. P. (1987) *Vocabulario de arquitectura campesina en el litoral ecuatoriano*. Quito, Ecuador: Museo Antropológico del Banco Central del Ecuador.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, P. D. (2015) *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision,(ST/ESA/SER.A/366)*.

Villi, G., Pasut, W. and de Carli, M. (2009) .CFD modelling and thermal performance analysis of a wooden ventilated roof structure, *Building Simulation*, 2(3), pp. 215–228. <http://10.0.3.239/s12273-009-9414-7>.

Vorre, M. H., Jensen, R. L. and Le Dréau, J. (2015) .Radiation exchange between persons and surfaces for building energy simulations, *Energy and Buildings*, 101, pp. 110–121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.005>.

Wacker, S., Gröbner, J., Zysset, C., Diener, L., Tzoumanikas, P., Kazantzidis, A., Vuilleumier, L., *et al.* (2015) .Cloud observations in Switzerland using hemispherical sky cameras, *Journal of Geophysical Research*, 120, pp. 695–707. <http://doi:10.1002/2014JD022643>

Whitney, W. D. and Smith, B. E. (1901) *The Century dictionary and cyclopedia*. New York: Century CO.

Wilson, A. and Jetz, W. (2016) *Remotely Sensed High-Resolution Global Cloud Dynamics for Predicting Ecosystem and Biodiversity Distributions.*, *PLoS biology*. Available at: <http://www.earthenv.org/>. (Accessed: 10 May 2016).

Wilson, A. M. and Jetz, W. (2016) .Remotely Sensed High-Resolution Global Cloud Dynamics for Predicting Ecosystem and Biodiversity Distributions, *PLOS Biology*, 14(3): e1002415. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002415>.

Wong, N. H. and Li, S. (2007) .A study of the effectiveness of passive climate control in naturally ventilated residential buildings in Singapore, *Building and Environment*, 42, pp. 1395–1405. <http://doi:10.1016/j.buildenv.2005.11.032>

Yohanis, Y. and Norton, B. (2002) .Life-cycle operational and embodied energy for a generic single storey office building in the UK., *Energy*, 27, pp. 77–92.

Yumrutaş, R., Ünsal, M. and Kanoğlu, M. (2005) .Periodic solution of transient heat flow through multilayer walls and flat roofs by complex finite Fourier transform technique, *Building and Environment*, 40(8), pp. 1117–1125. <http://10.0.3.248/J.BUILDENV.2004.09.005>.

Zingre, K. T., Wan, M. P., Wong, S. K., Toh, W. B. T. and Lee, I. Y. L. (2014) .Modeling of cool roof heat transfer in tropical climate, *Energy*, 82, pp. 813–826. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.045>.

Zingre, K. T., Wan, M. P., Wong, S. K., Toh, W. B. T. and Lee, I. Y. L. (2015) .Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate, *Energy*, 82, pp. 813–826. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.092>.

SOFTWARES

Adobe (2017) *Adobe Photoshop 10.0*.

Beckers, B. and Masset, L. (2003) .HeliodonTM_2.6-1 software. Available at: www.heliodon.net.

DesignBuilder (2016) .DesignBuilder Software Ltd - Home. Available at: <https://www.designbuilder.co.uk/> (Accessed: 12 January 2016).

DOE (2017) .EnergyPlus Licensing | EnergyPlus. Available at: <https://energyplus.net/licensing>

PÁGINAS WEB

Arias, M. (2015) *Las regiones del Ecuador*. Available at: <https://miaarias99.files.wordpress.com/2015/05/regiones-del-ecuador.jpg> (Accessed: 5 August 2016).

EOSDIS (2018) *Atmospheric Science Data Center*. Available at: <https://earthdata.nasa.gov/about/daacs/daac-asdc> (Accessed: 1 February 2017).

INEC (1990) *CENSO DE POBLACIÓN Y VIVIENDA 1990*. Available at: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/sistema-integrado-de-consultas-redatam/> (Accessed: 1 May 2016).

INEC (2010) *CENSO DE POBLACIÓN Y VIVIENDA 2010*. Available at: <http://redatam.inec.gob.ec/cgibin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPV2010&MAIN=WebServerMain.inl> (Accessed: 1 May 2016).

INEC (2011) *X Censo Nacional de Población y VI Vivienda de 2011*. Available at: <http://sistemas.inec.cr:8080/bincri/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=2011&lang=esp> (Accessed: 3 March 2018).

Metoffice (2015) *How we measure cloud*. Available at:
<https://www.metoffice.gov.uk/guide/weather/observations-guide/how-we-measure-cloud>
(Accessed: 25 July 2018).

Oficina Nacional de Estadística (ONE) (2010) *IX Censo Nacional de Población y Vivienda 2010*. Available at:
<http://redatam.one.gob.do/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPV2010&MAIN=WebServerMain.inl> (Accessed: 3 March 2018).

WeatherCompanyLLC (2016a) *ESTACION METEOROLÓGICA SANTA ROSA*. Available at:
<https://www.wunderground.com/personal-weather-station/dashboard?ID=IELOROEL3#history>
(Accessed: 24 December 2016).

WeatherCompanyLLC (2016b) *ESTACIÓN METEOROLÓGICA IELOROEL2(ElCambio)*. Available at:
<https://www.wunderground.com/personal-weather-station/dashboard?ID=IELOROEL2#history>
(Accessed: 24 December 2016).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Tipologías de cubiertas y edificaciones de la arquitectura popular de acuerdo a la latitud.	15
Figura 2 Urban and rural population as a proportion of total population, by major area, 1950-2050. Imagen obtenida de [United Nations, Department of Economic and Social Affairs, 2015]	18
Figura 3 Ubicación del Ecuador (sombreado Amarillo) en el mapa mundial.	35
Figura 4 Las regiones del Ecuador. Imagen tomada de https://miaarias99.files.wordpress.com/2015/05/regiones-del-ecuador.jpg	35
Figura 5 Imágenes de las 4 regiones del Ecuador. Imagen tomada de https://www.turismo.gob.ec/	36
Figura 6 Ubicación de la ciudad de Santa Rosa en el territorio del Ecuador.	37
Figura 7 Promedio mensual de la temperatura del aire (máxima, mínima y media) y la Humedad Relativa media (2016) _Santa Rosa. Fuente: Estación Meteorológica Aeropuerto Víctor Larrea	38
Figura 8 Velocidad (arriba), dirección y frecuencia (abajo) del viento. Imagen tomada de http://www.winfinder.com/windstatistics/santa_rosa_aeropuerto	38
Figura 9 Mapa de nubosidad de la tierra. Imagen tomada de https://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=85843&eocn=home&eoci=iotd_previous	39
Figura 10 Imágenes de la nubosidad del cielo de ciudades en diferentes latitudes: Monserrat-España, Sevilla-España, Roma-Italia, Tokyo-Japón y Santa Rosa-Ecuador (de izquierda a derecha). Imágenes tomadas por el autor.	40
Figura 11 Variación de la posición del sol en los solsticios y equinoccios en una ubicación geográfica de latitud 0°. Gráfico obtenido con el uso del software Heliodon [Beckers and Masset, 2003]	41
Figura 12 Comparación entre la radiación solar simulada (RS_sim) y la radiación solar global (RS_global), directa (RS_directa) y difusa (RS_difusa) obtenida del atlas solar del Ecuador.....	41
Figura 13 Promedio anual de la radiación solar directa (izquierda), difusa (medio) y global (derecha). Imagen tomada del atlas solar del Ecuador.	42
Figura 14 Promedio mensual de la nubosidad del cielo (nubosidad), radiación solar global del atlas solar (RS_atlas solar) y radiación solar global simulada (RS_sim).....	43
Figura 15 Superficie urbana de la ciudad de Santa Rosa-El Oro en 1980 (azul) y en 2014 (rojo). Imágenes tomadas de: google earth Pro y plano tomado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ciudad_de_Santa_Rosa-Ecuador.png	44
Figura 16 Tejido urbano (arriba) y cañón urbano (abajo) de la ciudad de Santa Rosa-El Oro. Imagen tomada de google earth Pro, 2017.	45
Figura 17 Tasa de crecimiento de 1990 a 2010: Población, Vivienda y consumo energético residencial de la Región Costa del Ecuador. Fuente: datos del Censo de Población y Vivienda, y el Boletín estadístico ARCONEL, 1990/2010.	46
Figura 18 Distribución por sectores del consumo energético para servicio público. Fuente: elaboración propia de los datos de ARCONEL 2014.....	46
Figura 19 Producción y demanda de la energía del Ecuador. Imagen tomada del Balance energético Nacional 2015, [MCSE, 2015].	47
Figura 20 Distribución por sector de Consumo energético total del Ecuador. Imagen tomada de Balance energético Nacional 2015, [MCSE, 2015].	48

Figura 21 Promedio de radiación anual (kWh/m ² .día) recibida sobre el plano horizontal y las 4 orientaciones en la latitud de la ciudad de referencia (3°27'). Datos obtenidos del software Heliodón.	49
Figura 22 Proporción de la cubierta a nivel edilicio (izquierda), y a nivel urbano (derecha) de acuerdo a las características urbanas de la ciudad de Santa Rosa-El Oro-Ecuador.	50
Figura 23 Balance energético de una vivienda de 1 planta en Ecuador. Imagen tomada de [Torres-Quezada <i>et al.</i> , 2018]	50
Figura 24 Arquitectura vernácula de diferentes provincias de la Región Costa de Ecuador. Imagen tomada de [Nurnberg, Ycaza and Holm, 1982]	51
Figura 25 Viviendas de zonas rurales de la Región Costa de Ecuador, en la actualidad. Imagen tomada de [de Diego, 2017].....	51
Figura 26 Imágenes de viviendas de la Costa de Ecuador (Santa Rosa-El Oro) de 1940-1960. Imágenes tomadas de https://santarosa-digital.blogspot.com.es/	52
Figura 27 Tipos de cubiertas más usadas en la Región Costa del Ecuador en el año 1990 y 2010. Elaboración propia a partir de los datos de INEC 1990 y 2010 [INEC, 1990][INEC, 2010]	52
Figura 28 Tasa de crecimiento de la cubierta de hormigón y metálica en la Región Costa en el periodo 1990-2010.	53
Figura 29 CUBIERTA METÁLICA (arriba) y CUBIERTA DE HORMIGÓN (abajo). Imágenes tomadas de google earth Pro.	53
Figura 30 Viviendas construidas antes del 2000 (izquierda) y después del 2000 (derecha). Imágenes tomadas de google earth Pro.	54
Figura 31 Vivienda tipo en San Cristóbal-Galápagos, Ecuador. Imagen tomada de: http://www.archdaily.com/	54
Figura 32 Espectro de la radiación electromagnética. Imagen tomada de [Bergman <i>et al.</i> , 2011]..	60
Figura 33 Esquema de los flujos de calor entre el exterior e interior a través de la cubierta.	61
Figura 34 Factor de vista de la cubierta percibido por una persona de pie (izquierda) y una persona acostada (derecha)	63
Figura 35 Variables de la cubierta y factores climáticos que modifican y condicionan respectivamente los flujos de calor a través de este elemento.....	64
Figura 36 Temperatura superficial interior de la cubierta con diferentes inclinaciones. Imagen tomada de [Díaz, 2012]	67
Figura 37 Temperatura superficial interior de la cubierta de hormigón con diferentes factores de reflectividad (γ). Imagen tomada de [Tong <i>et al.</i> , 2014]	69
Figura 38 Mediciones de las temperaturas de una cubierta de lámina de acero en Tonsville-Australia, antes y después de la aplicación de una pintura de alta reflectancia solar. Imagen tomada de [Suehrcke, Peterson and Selby, 2008]	70
Figura 39 Factores climatológicos medidos, y temperatura de la cubierta de hormigón medida y calculada con y sin recubrimiento de pintura cool roof. Imagen tomada de [ZINGRE ET AL., 2014]	71
Figura 40 Temperatura superficial exterior (T_s), interior (T_{si}) y flujo de calor (Heat flux) de la cubierta de hormigón (arriba) y la cubierta metálica (abajo) con y sin recubrimiento cool roof. Imágenes tomadas de [Zingre <i>et al.</i> , 2014]	72
Figura 41 Temperatura superficial promedio del periodo diurno (izquierda) y nocturno (derecha) de 16 recubrimientos en cubierta con diferente emisividad. Imagen tomada de [Synnefa, Santamouris and Livada, 2006]	74
Figura 42 Flujo de radiación solar y radiación de onda larga neta medido sobre una cubierta en Terrassa, España. Imagen tomada de [Torres-Quezada, 2015].	75

Figura 43 Flujo de calor a través de 3 tipos de cubierta. Imagen tomada de [Suehrcke, Peterson and Selby, 2008]	78
Figura 44 Flujo de calor hacia el interior a través de una cubierta de hormigón sin aislamiento (a) y con aislamiento (b) en un día soleado de la temporada de verano, invierno, otoño y primavera. Imagen tomada de [Jim, 2015]	80
Figura 45 Flujo de calor hacia el interior a través de una cubierta de hormigón sin aislamiento (a) y con aislamiento (b) en un día nublado de la temporada de verano, invierno, otoño y primavera. Imagen tomada de [Jim, 2015]	81
Figura 46 Temperatura superficial interior de una cubierta de hormigón (sin cámara ventilada UVR y con cámara ventilada VR) con y sin aislamiento. Imagen tomada de [Tong et al., 2014]	82
Figura 47 Factores climáticos medidos y temperatura superficial exterior de una cubierta de hormigón (medida y simulada), en un día soleado (arriba) y en un día nublado (abajo) en Singapur. Imagen tomada de [Zingre et al., 2015]	86
Figura 48 Temperatura del aire exterior (T_o), temperatura superficial exterior (arriba) y temperatura superficial interior (abajo) de una cubierta de hormigón con una sola capa (magenta) y con dos capas (verde) en un día soleado. Imagen tomada de [Zingre et al., 2015].....	87
Figura 49 Temperatura del aire exterior (T_o), temperatura superficial exterior (arriba) y temperatura superficial interior (abajo) de una cubierta de hormigón con una sola capa (magenta) y con dos capas (verde) en un día nublado. Imagen tomada de [Zingre et al., 2015].	88
Figura 50 Temperatura del aire exterior (T_a), temperatura superficial interior de la cubierta de lámina de acero simple (T_{s_1capa}), y la cubierta de lámina de acero ventilada ($T_{s_2 capas}$). Imagen tomada de [Díaz, 2012]	89
Figura 51 Temperatura del aire (T_a), temperatura superficial interior de una cubierta metálica simple (T_{s_1capa}) y una cubierta metálica ventilada (T_{s_2capas}). Imagen tomada de [Escobar, 2017]	90
Figura 52 Detalle de la lámina de acero.....	97
Figura 53 Detalle de la cubierta de losa de hormigón.	97
Figura 54 Esquema de los Flujos de calor, Parámetro de análisis y Casos de Estudio considerados para esta investigación.....	98
Figura 55 Diagrama esquemático del proceso de investigación.....	103
Figura 56 Esquema del funcionamiento de las simulaciones energéticas.....	105
Figura 57 Comparación entre los promedios mensuales de la Nubosidad del Cielo y la Radiación Solar obtenidos por: simulación (RS_simul), atlas solar (RS_atlas) y mediciones (RS_medic).	107
Figura 58 Imagen fotográfica (izquierda) e imagen térmica (derecha) de un semi arco de la bóveda celeste, en el periodo diurno de un día promedio de radiación solar en la ciudad de Santa Rosa.	110
Figura 59 Comparación de los datos medidos y simulados de la nubosidad del cielo en el mes de octubre y diciembre.	111
Figura 60 Comparación entre la radiación horizontal infrarroja con un cielo teórico totalmente despejado ($Q_{sky_0\%}$) y con el cielo cubierto de un DÍA PROMEDIO de acuerdo a las mediciones ($Q_{sky_92\%}$).	112
Figura 61 Comparación entre la radiación horizontal infrarroja de un cielo cubierto (92%) obtenida a través de las mediciones de la temperatura del cielo, $Q_{sky}(T_{sky})$, y los valores obtenidos con el algoritmo de Energy Plus, $Q_{sky}(E.Plus)$	112
Figura 62 Valores horarios de las condiciones climáticas del DÍA PROMEDIO (izquierda) y el DÍA EXTREMO (derecha): a) Radiación Solar (RS), Porcentaje de cielo cubierto (cloud cover). b) Temperatura del Aire (T_a), Humedad Relativa (RH) y Temperatura del cielo (T_{sky}).	115

Figura 63 Comparación de los valores de Reflectividad al visible y la Emisividad al infrarrojo térmico de la cubierta metálica y la cubierta de hormigón de los casos de validación (CL / CP), con los valores en su estado nuevo (CL_new/CP_new).....	118
Figura 64 Reflectividad al visible y emisividad al infrarrojo térmico medida de la CL (círculos) y CP (cuadrados) en su estado actual con diferentes grados de envejecimiento.....	121
Figura 65 Reflectividad al visible y emisividad al infrarrojo térmico medida de la CL (círculos) y CP (cuadrados) con diferentes recubrimientos de pintura.	123
Figura 66 Comparación de la T_{si} entre los valores medidos (MEDIC) y simulaciones: con modelo de cielo de Energy Plus (SIM_EPLUS) y modelo de cielo corregido (SIM_Tsky), de la CL y la CP. Valores Día Promedio.	125
Figura 67 Comparación de la T_{si} entre los valores medidos (MEDIC) y simulaciones: con viento (SIM_CV) y sin viento (SIM_SV), de la CL y la CP. Valores Día Promedio.	126
Figura 68 Comparación de la temperatura superficial exterior, temperatura superficial interior y temperatura del aire interior de la CL, entre los valores medidos (línea continua) y los valores simulados finales (línea discontinua)	127
Figura 69 Comparación de la temperatura superficial exterior, temperatura superficial interior y temperatura del aire interior de la CP, entre los valores medidos (línea continua) y los valores simulados finales (línea discontinua)	128
Figura 70 Resultados Base de la Temperatura superficial interior y la temperatura del aire interior de la CL (magenta) y la CP (verde), durante el Día Promedio y el Día Extremo.	134
Figura 71 Resultados Base del promedio diurno (izquierda) y nocturno (derecha) de la T_{si} de la CL y CP, y la T_a , en el Día Promedio y el Día Extremo.	136
Figura 72 Resultados Base de la CL y CP en el periodo diurno (izquierda) y nocturno (derecha) para el Día Promedio y el Día Extremo, en función de la diferencia entre la temperatura superficial interior y la temperatura del aire exterior ($\Delta T_{si} - T_a$).	137
Figura 73 Variantes de análisis de la variable INCLINACIÓN: 0%, 15%, 30% Y 45%, y la variable ORIENTACIÓN: Norte, Sur, Este y Oeste.....	139
Figura 74 Promedio diurno de la temperatura superficial interior de la CL (magenta) y la CP (verde) con diferentes inclinaciones y orientaciones, en el Día Promedio y el Día Extremo.	140
Figura 75 Promedio nocturno de la temperatura superficial interior de la CL (magenta) y la CP (verde) con diferentes inclinaciones y orientaciones, en el Día Promedio y el Día Extremo.....	142
Figura 76 Variantes de análisis de la variable REFLECTIVIDAD AL VISIBLE: 0.25, 0.50 y 0.75	144
Figura 77 Promedio diurno de la temperatura superficial interior de la CL y CP con diferentes valores de reflectividad al visible, en el Día Promedio y el Día Extremo.	144
Figura 78 Promedio nocturno de la temperatura superficial interior de la CL y la CP con diferentes valores de reflectividad al visible, en el Día Promedio y el Día Extremo.	146
Figura 79 Variantes de análisis de la variable EMISIVIDAD AL INFRARROJO TÉRMICO: 0.30, 0.60 y 0.90.....	148
Figura 80 Promedio diurno de la temperatura superficial interior de la CL y CP con diferentes valores de emisividad al infrarrojo térmico, en el Día Promedio y el Día Extremo.....	148
Figura 81 Promedio nocturno de la temperatura superficial interior de la CL y CP con diferentes valores de emisividad al infrarrojo térmico, en el Día Promedio y el Día Extremo.....	150
Figura 82 Variable DOBLE CAPA: cámara de aire ventilada + Yeso Cartón.	151
Figura 83 Promedio diurno de la temperatura superficial interior de la CL y CP, con el Modelo Base y la doble capa, en el Día Promedio y el Día Extremo.	151
Figura 84 Promedio nocturno de la temperatura superficial interior de la CL y CP, con el Modelo Base y la doble capa, en el Día Promedio y el Día Extremo.	153

Figura 85 Influencia de todas las variables analizadas en comparación al Modelo Base en el periodo diurno, en el Día Promedio y en el Día Extremo.	155
Figura 86 Influencia de todas las variables analizadas en comparación al modelo base en el periodo nocturno, en el Día Promedio y el Día Extremo.	156
Figura 87 Efectividad de las variables sobre la reducción de la T_{si} de la CL (izquierda) y la CP (derecha) respecto al Modelo Base, en el Día y la Noche, en el Día Extremo.	159
Figura 88 Propiedades radiativas de la CL y la CP de acuerdo al Modelo Base y al Modelo Equivalente.....	160
Figura 89 Comparación del promedio diurno de la temperatura superficial interior de la CL y CP entre el Modelo Base y el Modelo Equivalente, en el Día Promedio y en el Día Extremo.	161
Figura 90 Comparación del promedio nocturno de la temperatura superficial interior de la CL y CP entre el Modelo base y el Modelo Equivalente, en el Día Promedio y en el Día Extremo.	162
Figura 91 Parametrización de la T_{si} de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en función de la reflectividad al visible y la emisividad al infrarrojo térmico, en el periodo DIURNO del Día Promedio.....	164
Figura 92 Parametrización de la T_{si} de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en función de la reflectividad al visible y la emisividad al infrarrojo térmico, en el periodo NOCTURNO del Día Promedio.....	166
Figura 93 Parametrización de la T_{si} de la CL y la CP en función de la reflectividad al visible y al infrarrojo térmico en el promedio diurno (arriba) y en el periodo nocturno (abajo) del DÍA EXTREMO.....	168
Figura 94 Comportamiento térmico de las muestras de la CL (izquierda) y la CP (derecha) en su estado actual con varios años de uso, en el periodo diurno (arriba) y en el periodo nocturno (abajo). Valores del Día Extremo.....	171
Figura 95 Comportamiento térmico de las muestras de la CL (izquierda) y la CP (derecha) con diferentes recubrimientos de pintura, en el periodo diurno (arriba) y en el periodo nocturno (derecha). Valores del Día Extremo.	173
Figura 96 Tramas urbanas de las ciudades de la Costa del Ecuador (Machala y Santa Rosa-El Oro Ecuador). Imágenes tomadas de google earth (las imágenes están orientadas al norte).....	197
Figura 97 Tipologías de viviendas en la Región Costa del Ecuador.....	199
Figura 98 Detalle de instalación de la cubierta ligera metálica, de acuerdo a los sistemas constructivos de la zona de análisis.	200
Figura 99 Detalle de construcción de la cubierta de losa de hormigón, de acuerdo a los sistemas constructivos de la zona de análisis.	201
Figura 100 Proceso de medición de la cobertura de cielo en un día con radiación solar diaria de 4.5 kWh/m ² , 13h00 (10 de Octubre), valor 4/10.	209
Figura 101 Proceso de medición de la cobertura de cielo en un día con radiación solar diaria de 4.45 kWh/m ² , 16h00 (10 de Octubre), valor 9/10.	209
Figura 102 Proceso de medición de la temperatura del cielo, T_{sky}	210
Figura 103 Medición temperatura radiante del cielo a través del termómetro por infrarrojo, en el periodo diurno (izquierda) y nocturno (derecha).	211
Figura 104 Medición temperatura radiante del cielo a través de la cámara térmica, en el periodo diurno.	211
Figura 105 Medición temperatura radiante del cielo a través de la cámara térmica, en el periodo nocturno.....	212
Figura 106 Valores horarios de Radiación Solar medida en el mes de MARZO 2016.....	213
Figura 107 Valores horarios de Radiación Solar medida en el mes de OCTUBRE 2016.	214

Figura 108 Valores horarios de Radiación Solar medida en el mes de DICIEMBRE 2016.	215
Figura 109 Mediciones de los Factores c Factores climáticos en la semana de OCTUBRE 2016, a) radiación solar y cobertura del cielo b) Temperatura promedio del cielo cercana al horizonte (T_{sky_1}) y temperatura promedio del cielo cercana al cénit (T_{sky_2}), porcentaje de cobertura del cielo, y la temperatura del aire exterior.....	216
Figura 110 Mediciones de los Factores climáticos en la semana de DICIEMBRE 2016, a) radiación solar y cobertura del cielo b) Temperatura promedio del cielo cercana al horizonte (T_{sky_1}) y temperatura promedio del cielo cercana al cénit (T_{sky_2}), porcentaje de cobertura del cielo, y la temperatura del aire exterior.....	217
Figura 111 Imagen fotográfica y térmica de un semi-arco de la bóveda celeste en el periodo diurno y nocturno del 10 de octubre de 2016.	220
Figura 112 Mediciones de octubre (arriba) y diciembre (abajo) de la Temperatura promedio del cielo (T_{sky_mean}), porcentaje de cobertura del cielo, y la temperatura del aire exterior (T_a)......	221
Figura 113 Promedio diario, mensual y anual de la radiación solar medida (2016).....	223
Figura 114 Número de días a lo largo del año 2016 con diferentes rangos de radiación solar.....	224
Figura 115 Valor promedio mensual, desviación estandar y valores absolutos (máximo y mínimo) de la radiación solar mensual en Ecuador.....	225
Figura 116 Rango de radiación solar más representativa en esta región. Día Extremo como Límite superior y Día Promedio como Límite inferior.	226
Figura 117 Flujo de radiación solar medido y simulado, de una semana del mes de octubre y diciembre.....	227
Figura 118 Promedio de radiación diaria medida en la semana del mes de octubre y la semana del mes de diciembre.	228
Figura 119 Valores del porcentaje de cobertura del cielo, y radiación solar del Día Promedio y el Día Extremo escogidos de las mediciones del mes de octubre.....	229
Figura 120 Valores del porcentaje de cobertura del cielo, y radiación solar del Día Promedio y el Día Extremo escogidos de las mediciones del mes de diciembre.	229
Figura 121 Temperatura promedio del cielo (T_{sky_mean}), porcentaje de cobertura del cielo y temperatura del aire (T_a), en la semana de mediciones del mes de octubre.	230
Figura 122 Temperatura promedio del cielo (T_{sky_mean}), porcentaje de cobertura del cielo y temperatura del aire (T_a), en la semana de mediciones del mes de diciembre.....	230
Figura 123 Proceso de medición del factor de reflectividad a través de la medición de iluminancias. CP: superficie de hormigón (izquierda), y CL: superficie lámina de acero (derecha).....	236
Figura 124 Proceso del método de medición del factor de reflectividad a través de imágenes fotográficas. CL (izquierda) y CP (derecha).	237
Figura 125 Histogramas ópticos de la superficie de referencia (abajo izquierda) y la superficie metálica (arriba izquierda), imagen de las superficies medidas (derecha).	237
Figura 126 Proceso de medición de la emisividad al infrarrojo térmico. Imagen real (izquierda), datos temperatura radiante (medio) y datos temperatura superficial (derecha).	244
Figura 127 Medición de la temperatura superficial exterior (T_s) e interior (T_{si}) de la CL.....	249
Figura 128 Posición del Termopar en la CL.....	250
Figura 129 Medición de la temperatura superficial exterior (T_s) e interior (T_{si}) de la CP.	250
Figura 130 Posición del termopar en la CP.	250
Figura 131 Posición del termo higrómetro en el espacio interior del caso de validación 1: CL.	251
Figura 132 Posición del termo higrómetro en el espacio interior del caso de validación 2: CP.	251

Figura 133 Datos medidos de la CL (magenta) y la CP (verde) en una semana del mes de octubre de 2016 a) Radiación Solar y cobertura del cielo, b) Temperatura superficial exterior, c) temperatura superficial interior, y d) temperatura del aire interior	252
Figura 134 a) Radiación solar simulada (RS_simul), radiación solar medida (RS_med) y porcentaje de cielo cubierto medido (cielo cubierto). b) temperatura superficial exterior de la cubierta liviana (magenta) y pesada (verde), temperatura del aire exterior (negro).	254
Figura 135 Coeficiente de determinación (r^2) entre la radiación solar y las temperaturas superficiales exteriores de la CL y la CP.	255
Figura 136 Temperatura superficial interior de la CL (magenta) y la CP (verde).	258
Figura 137 Temperatura del aire interior de la CL (magenta) y la CP (verde), en el Día Promedio y en el Día Extremo.	259
Figura 138 Valores promedios diarios de la temperatura del aire interior de la CL y la CP.	260
Figura 139 Valores máximos, mínimos y promedios diarios de la temperatura del aire interior de la CL y la CP, del 06 -12 octubre.	260
Figura 140 Ubicación de la estación meteorológica 1 (Santa Rosa-El Oro-Ecuador). Imagen tomada de: https://www.google.es/maps/place/El+Cambio,+Ecuador/@-3.4442493,-79.9946556,209m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x9033121c14d47945:0x4afa1dc5b8584a45!8m2!3d-3.292249!4d-79.9024779	268
Figura 141 Ubicación de la estación <i>meteorológica 1</i> (El cambio-El Oro-Ecuador). Imagen tomada de: https://www.google.es/maps/place/El+Cambio,+Ecuador/@-3.3005406,-79.8987702,285m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x9033121c14d47945:0x4afa1dc5b8584a45!8m2!3d-3.292249!4d-79.9024779	270
Figura 142 Termo higrómetro TESTO 174H	272
Figura 143 Datalogger + Termopar tipo K AMPROBE.	273
Figura 144 Termómetro infrarrojo TESTO 830 T4. Modo de medición.	274
Figura 145 Cámara térmica FLIR i7	275
Figura 146 Cámara térmica InfRec H2640.	275
Figura 147 Comparación de los valores de temperatura superficial exterior, temperatura superficial interior y temperatura del aire interior de la CL, entre los valores medidos y simulados (simulación 1 y simulación 2).	287
Figura 148 Comparación de los valores de temperatura superficial exterior, temperatura superficial interior y temperatura del aire interior de la CP, entre los valores medidos y simulados (simulación 1 y simulación 2).	288
Figura 149 Relación de la temperatura superficial exterior de la CL (magenta) y CP (verde) con los factores climáticos: radiación solar, cobertura del cielo, vientos y precipitaciones.	292
Figura 150 Comparación de los valores de temperatura superficial exterior, temperatura superficial interior y temperatura del aire interior de la CL, entre los valores medidos (CL_med) y simulados con viento (CL_sim_CV) y sin viento (CL_sim_SV)	296
Figura 151 Comparación de los valores de temperatura superficial exterior, temperatura superficial interior y temperatura del aire interior de la CP, entre los valores medidos (CP_med) y simulados con viento (CP_sim_CV) y sin viento (CP_sim_SV)	297
Figura 152 Modelo Base de la simulación: Planta, Sección y Volumen.	301
Figura 153 Resultados horarios del MODELO BASE de la CL (magenta) y la CP (verde): Temperatura Superficial exterior, temperatura superficial interior y la temperatura del aire interior.	303
Figura 154 Comparación de la radiación solar teórica recibida sobre la cubierta, lat 3°21'S, con diferentes inclinaciones y orientaciones, en los días de solsticio: 21 de diciembre y 21 de junio.	304

Figura 155 Simulación de la radiación solar recibida sobre la cubierta con un modelo de cielo sin nubes, lat 3°21'S, con diferentes inclinaciones y orientaciones. a) 13 de marzo y 29 de septiembre. b) Promedio de radiación anual.	305
Figura 156 Radiación recibida sobre la cubierta a diferentes inclinaciones y orientaciones en el solsticio de diciembre.	307
Figura 157. Radiación recibida sobre la cubierta a diferentes inclinaciones y orientaciones en el día de equinoccio. a) Radiación teórica: modelo de cielo sin nubes. b) Radiación medida: cielo con nubes, del Día Promedio y el Día Extremo	308
Figura 158 Promedio diurno de la radiación de onda larga de la CL (magenta) y la CP (verde) con diferentes inclinaciones y orientaciones, en el Día Promedio y el Día extremo.	310
Figura 159 Promedio nocturno de la radiación de onda larga de la CL (magenta) y la CP (verde) con diferentes inclinaciones y orientaciones, en el Día Promedio y el Día extremo.	311
Figura 160 INCLINACIÓN: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y CP (derecha), en el Día Promedio.	312
Figura 161 INCLINACIÓN: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Extremo.....	313
Figura 162 ORIENTACIÓN: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Promedio.	314
Figura 163 ORIENTACIÓN: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Extremo.....	315
Figura 164 REFLECTIVIDAD: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Promedio.	316
Figura 165 REFLECTIVIDAD: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), Día Extremo.	317
Figura 166 EMISIVIDAD: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Promedio.	318
Figura 167 EMISIVIDAD: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Extremo.....	319
Figura 168 DOBLE CAPA: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Promedio.	320
Figura 169 DOBLE CAPA: Resultados horarios de la T. Superficial exterior, superficial interior y el aire interior de la CL (izquierda) y la CP (derecha), en el Día Extremo.....	321

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Promedios mensuales de los datos climáticos de la ciudad de Santa Rosa (2016). Valor máximo (rojo) y mínimo (azul) anual. Información obtenida de la estación meteorológica del aeropuerto Víctor Larrea.....	37
Tabla 2 Emisividad de 16 recubrimientos de cubierta. Datos tomados de [Synnefa, Santamouris and Livada, 2006]	73
Tabla 3 Comparación de los aspectos ambientales, energéticos y económicos que ofrece una Cubierta Ligera Metálica (CL) y una Cubierta Pesada de Hormigón (CP).....	96
Tabla 4 Variables y variantes de análisis, parámetro de análisis y casos de estudio.	100
Tabla 5 Valores promedio de radiación solar, cobertura del cielo, temperatura del cielo y temperatura del aire del DÍA PROMEDIO y el DÍA EXTREMO.	101
Tabla 6 Periodo de análisis, parámetro de análisis y variables.....	102
Tabla 7 Especificaciones técnicas del caso de validación 1.	116
Tabla 8 Especificaciones técnicas del CASO DE VALIDACIÓN 2.	117
Tabla 9 Valores de reflectividad al visible y emisividad al infrarrojo térmico de la CL y la CP de los casos de validación (estado actual) comparados con los valores en su estado nuevo.	119
Tabla 10 Especificaciones de las muestras medidas de la CL y la CP.....	120
Tabla 11 Valores de reflectividad al visible y al infrarrojo térmico de todas las muestras medidas de la CL y la CP.....	120
Tabla 12 Parámetros de las cubiertas del MODELO BASE, tomados de las mediciones <i>in situ</i>	133
Tabla 13 Resultados Base de la T_{si} de la CL y la CP en el Periodo Diurno y Nocturno en el DÍA PROMEDIO.	138
Tabla 14 Resultados Base de la T_{si} de la CL y la CP en el Periodo Diurno y Nocturno en el DÍA EXTREMO.....	138
Tabla 15 Influencia cuantitativa de las variables analizadas sobre la reducción de la T_{si} de la CL y la CP en comparación al modelo base en el periodo diurno y nocturno, en el Día Promedio.	157
Tabla 16 Influencia cuantitativa de las variables analizadas sobre la reducción de la T_{si} de la CL y la CP en el periodo diurno y nocturno, en el Día Extremo.	158
Tabla 17 Valores de las propiedades radiativas y térmicas de la CL y la CP, de acuerdo al MODELO EQUIVALENTE.....	160
Tabla 18 Reflectividad al visible y Emisividad al infrarrojo térmico de diferentes muestras de la CL y la CP en su estado actual con varios años de uso.	170
Tabla 19 Reflectividad al visible y Emisividad al infrarrojo térmico de diferentes muestras de la CL y la CP con diferentes recubrimiento de pintura.	170
Tabla 20 Cálculo del costo de construcción de $1m^2$ de una CUBIERTA LIGERA METÁLICA	202
Tabla 21 Cálculo del costo de construcción de $1m^2$ de una CUBIERTA PESADA DE HOMIGÓN	202
Tabla 22 Cálculo de la energía integrada de $1m^2$ de una CUBIERTA LIGERA METÁLICA	203
Tabla 23 Cálculo de la energía integrada de $1m^2$ de una CUBIERTA PESADA DE HORMIGÓN.	203
Tabla 24 Valores promedio diario de la radiación solar, radiación difusa, cobertura del cielo y temperatura del cielo en el Día Promedio y el Día Extremo.....	231
Tabla 25 Especificaciones del Caso de validación 1: VIVIENDA CON CUBIERTA METÁLICA.	233
Tabla 26 Especificaciones del Caso de validación 2: VIVIENDA CON CUBIERTA DE HORMIGÓN. ..	235
Tabla 27 Valores de la reflectividad al visible e iluminancias medidas que reciben y reflejan cada una de las superficies.	239

Tabla 28 Valores de reflectividad al visible e histograma de cada muestra medida de la CL y la CP.	239
Tabla 29 Imágenes e Histograma de cada una de las muestras medidas.....	240
Tabla 30 Valores de emisividad al infrarrojo térmico, temperatura radiante, y temperatura superficial de todas las muestras medidas.....	245
Tabla 31 Imagen real y térmica de todas las muestras medidas.	246
Tabla 32 Datos de entrada que contiene un archivo EPW (Energy Plus Weather) _IWEC Format	279
Tabla 33 Datos de entrada configurados del archivo EPW a partir de las mediciones <i>in situ</i> . Rango de incertidumbre de cada uno de los parámetros modificados.	280
Tabla 34 Archivo EPW modificado a partir de las mediciones realizadas <i>in situ</i> , desde el 06 al 12 de octubre.	283
Tabla 35 Coeficiente de pearson entre los valores medidos y los valores de simulación 1 (ENERGY PLUS).....	290
Tabla 36 Coeficiente de Pearson entre los valores medidos y los valores de simulación 2 (T_{sky} medida).....	290
Tabla 37 Promedio de toda la muestra (06-12 de octubre) del coeficiente de determinación entre los valores medidos y simulados con o sin viento, de la CL y la CP.	294
Tabla 38 Índice de correlación de Pearson de cada día de la muestra (06-12 de octubre), entre los valores medidos y simulados con o sin viento, de la CL y la CP.	295
Tabla 39 Parámetros del MODELO DE SIMULACIÓN BASE	302