

Análisis del rendimiento de luminancias relativas de acabados de láminas metálicas con fotografías digitales

Relative luminance analysis of metal sheet finishes with digital photographs

Violeta Escobar Ruiz¹ , Verónica Escobar Ruiz² , Haydee Pérez Castro³ , Jorge Flores González⁴ 

¹ Docente en la Universidad Autónoma de Guadalajara Campus Tabasco; violeta.escobar@edu.uag.mx. Tabasco, México.

² Científico en el Departamento de Meteorología de la Universidad de Reading. v.escobarruiz@reading.ac.uk. Reino Unido.

³ Profesora Investigadora en la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. haydee.perez@ujat.mx. Tabasco, México.

⁴ Profesor Investigador en la División Académica de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. jorge.flores@ujat.mx. Tabasco, México.

Resumen: El sobrecalentamiento por cubierta causado por altos niveles de radiación solar es especialmente intenso en cubiertas metálicas. El aumento de la reflectancia del acabado superficial en las cubiertas ha demostrado ser una estrategia de control térmico, por lo que el presente estudio propone una metodología para conocer el comportamiento de las reflectancias solares de acabados comunes para láminas metálicas, mediante el seguimiento de sus luminancias relativas (LR) obtenidas por medio de imágenes de mapa de bits capturadas con una herramienta convencional como una cámara fotográfica digital. Para ello se dispuso de una escena con 8 muestras de láminas metálicas con los acabados objeto de estudio - incluidos blancos de conocida reflectancia solar alta - en condiciones de intemperie para comprobar el comportamiento de sus luminancias respecto a una muestra de referencia de color blanco. Se ingresaron las fotografías capturadas a lo largo de 10 meses en un software programado con este propósito pudiendo evidenciar que los acabados blancos conservaron sus niveles de LR a lo largo del estudio, no así el resto de los acabados, los cuales presentaron una disminución moderada de sus LR respecto a la muestra de referencia. Se concluye que el uso exterior de acabados blancos en cubiertas metálicas es una estrategia adecuada de control térmico ya que son capaces de conservar sus niveles de reflectancia solar por periodos de tiempo relativamente prolongado sin demandar un mantenimiento constante.

Citación: Escobar Ruiz, V.; Escobar Ruiz, V.; Pérez castro, H.; Flores González, J.; Análisis del rendimiento de luminancias relativas de acabados de láminas metálicas con fotografías digitales. *Entrópico* 2023, 1, 2. <https://doi.org/10.33413/eau.2023.273>

Editor académico: Heidi De Moya Simó y Gilkauris Rojas Cortorreal

Recibido: 25/09/2023

Aceptado: 05/10/2023

Publicado: 01/11/2023



Copyright: © 2022 por los autores. Enviado para una posible publicación de acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Palabras claves: Cubiertas metálicas, Reflectancia solar, Luminancia relativa, Sobrecalentamiento por cubierta, Clima cálido.

Abstract: Roof overheating caused by high levels of solar radiation is particularly intense on metal roofs. Increasing surface finish reflectance on roofs has proven to be an accurate thermal control strategy, so this study proposes a methodology to understand the behavior of the solar reflectances of common finishes for metal sheets, by monitoring their relative luminances (LR) obtained with bitmap images captured using a conventional tool such as a digital camera. For this purpose, a scene with 8 samples of metallic foils with the finishes under study - including those of known high solar reflectance - was set up in outdoor conditions to check the behavior of their luminances compared to a white reference sample. The photographs taken over a period of 10 months were entered into a software programmed for this purpose, showing that the white finishes maintained their LR levels throughout the study, unlike the rest of the finishes, which showed a moderate decrease in their LR compared to the reference sample. It is concluded that the exterior use of white finishes on metal roofs is an

appropriate thermal control strategy, as they are capable of conserving their solar reflectance levels for relatively long periods of time without requiring constant maintenance.

Keywords: Metal sheet roof, solar reflectance, relative luminance, roof overheating, hot climate

1. Introducción

La demanda de espacios habitables, confortables, asequibles y energéticamente eficientes, que permitan afrontar los desafíos del desarrollo sustentable, requiere de un conocimiento profundo del comportamiento térmico de los materiales de construcción y del estudio de las posibilidades de los materiales constructivos al alcance de la mayor parte de la población.

El uso de láminas metálicas en la construcción tiene ventajas que le permiten ser un material apto para su inclusión en sistemas de edificación sustentable. Entre ellas podemos mencionar: alta capacidad de reciclaje, durabilidad y ligereza. Además, la construcción a base de láminas metálicas autoportantes es de las más difundidas en el México (INEGI, n.d.), por su bajo costo, facilidad y rapidez de instalación. Sin embargo, son precisamente las cubiertas metálicas las que tienen el comportamiento menos favorable en la transmisión de energía al interior de los espacios cubiertos (Barrios et al., 2012; Kabre, 2010) debido a que el calor específico y la conductividad térmica de los metales es muy alta y hace que la temperatura de los mismos se eleve rápidamente a niveles más altos que otros materiales.

La protección de las envolventes y aberturas de los edificios contra la incidencia solar es una premisa de suma importancia en el diseño arquitectónico bioclimático. Sin embargo, la cubierta, que es por sí misma un elemento de protección, cuenta tan solo con las propiedades térmicas y ópticas de sus componentes como medios para prevenir el calentamiento causado por la sobreexposición solar, mismo que puede alcanzar temperaturas de entre 75 °C y 80 °C (Gagliano et al., 2012), conduciendo este calor al interior del recinto.

El sobrecalentamiento por cubierta puede llegar a elevar su temperatura hasta 25°C por encima de la temperatura del aire exterior. Dicho sobrecalentamiento incide directamente en la temperatura de radiación de un recinto, generando el efecto de asimetría de planos radiantes por encima de la cabeza, mismo que acentúa la sensación de discomfort (Kabre, 2010).

La revisión referente a estudios de sobrecalentamiento por cubierta indica que el acabado superficial de los materiales que la conforman juega un papel muy importante en el grado de transferencia de energía al interior de los espacios habitados. Por lo tanto, una buena parte de la efectividad de la cubierta recae en este aspecto (Europe et al., 2009).

Entre las estrategias más recurrentes en el diseño de cubiertas de todo tipo, que como objetivo tenga la disminución del sobrecalentamiento por ganancias solares, se encuentra la utilización de recubrimientos superficiales de alta reflectancia. Un ejemplo de ello es el sistema "Cool Roof" o "Techo fresco". Un "Cool Roof (CR)" es un tipo de cubierta que refleja la luz solar y emite el calor de manera más eficiente que los techos convencionales oscuros (Borge-Diez et al., 2013) reduciendo la demanda de refrigeración en los edificios.

Dentro de los materiales utilizados con este fin se pueden encontrar una variedad de revestimientos o pinturas que contienen materiales poliméricos transparentes, como el acrílico, y pigmentos blancos, como el dióxido de titanio o el óxido de zinc, para hacerlos opacos y reflectantes (Heat Island Group, 2022). Dichos revestimientos tienen reflectancias que van de 0.74 a 0.80, mientras que su emisividad infrarroja es de 0.9 para todos los casos (Europe et al., 2009). Se aplican en espesores superiores a los de las pinturas blancas convencionales, consiguiendo valores de reflectancia más elevados en sustratos lisos (Heat Island Group, 2022).

Actualmente existen productos en el mercado que ofrecen diversos grados de aislamiento térmico basados en el principio de los “techos frescos” antes descrito, pudiendo ser productos impermeabilizantes o pinturas base agua. Algunos de ellos incorporan sustancias anti-moho para evitar manchas y prolongar su efectividad.

En diferentes estudios llevados a cabo por el European Cool Roof Project junto con el Intelligent Energy Europe Programme se han documentado importantes reducciones del flujo de calor por la cubierta después de la aplicación del acabado reflectante. Los resultados han arrojado disminuciones de 25°C de la temperatura superficial (Synnefa et al., 2012) y de un promedio del 70% en gastos de refrigeración para los periodos de mayor radiación solar (Zinzi & Romero, 2010).

El objetivo de este estudio es identificar el rendimiento de las reflectancias solares de acabados superficiales comunes en láminas metálicas mediante la observación de sus luminancias, lo cual permita predecir su comportamiento térmico a lo largo de su vida útil o entre periodos de mantenimiento con herramientas de uso común como una cámara digital réflex.

Los reflectómetros solares bajo las normas ASTM C1549-09 y ASTM E903 son instrumentos utilizados para este fin, sin embargo, son equipos sofisticados no siempre disponibles en los inventarios de los laboratorios universitarios, por lo que, la metodología planteada en el presente estudio es una opción que podría arrojar información valiosa y cuantificable para reemplazar el uso de la instrumentación citada (Lira Oliver & Guevara Mon, 2017).

Para definir las características de los acabados de cada una de las láminas se tomaron en cuenta los siguientes objetivos específicos: 1) evaluar el rendimiento de la reflectancia de diferentes productos de alta reflectancia solar de venta en el mercado entre los que se encuentran principalmente aquellos fabricados ex profeso para evitar el sobrecalentamiento, así como pinturas blancas de uso común, 2) observar el comportamiento de productos de baja reflectancia solar (oscuros) comúnmente utilizados en cubiertas metálicas para identificar la diferencia entre la reflectancia de acabados oscuros y la de acabados claros, 3) evaluar el rendimiento de la reflectancia de una lámina metálica natural sin ningún acabado y a su vez constatar su comportamiento a lo largo del tiempo. Como referencia se usó la reflectancia de una lámina con un importante nivel de oxidación y una lámina negra con el mayor nivel de absorción solar posible.

2. Métodos

Los acabados de las láminas metálicas considerados para el análisis fueron los siguientes: 1) esmalte blanco acrílico, 2) revestimiento “Cool Roof”, 3) pintura blanca vinil-acrílica, 4) impermeabilizante blanco 100% acrílico base agua de 3 años de durabilidad, 5) lámina galvanizada al natural sin acabado, 6) lámina oxidada, 7) esmalte rojo óxido acrílico y 8) esmalte negro acrílico.

La instalación del experimento se realizó en la planta de azotea de un edificio de 2 niveles, localizado en un medio urbano denso, en la ciudad de Villahermosa, Tabasco en México. El estado de Tabasco se encuentra situado en una región tropical de clima cálido húmedo, cercana al nivel del mar, en el paralelo 18° de latitud norte. La temperatura media anual es de 27.4°C. La temperatura promedio mensual máxima se presenta en el mes de mayo y es de 35.3°C y la temperatura promedio mensual mínima se presenta en el mes de enero y es de 19.9°C. La precipitación media de estado de Tabasco es de 1,924 mm anuales, ésta se presenta todo el año, siendo más abundante en los meses de junio a octubre (Servicio Meteorológico Nacional, 2023). Para la ciudad de Villahermosa encontramos tasas de radiación solar directa de alrededor de 4.94 kWh/m²/día en promedio (NASA, 2022).

Para el estudio se dispuso de una serie de láminas metálicas galvanizadas de 28 x 46 cm, las cuales se colocaron sobre una estructura metálica orientada hacia el sur con 6° de inclinación, la mínima sugerida por la mayoría de los fabricantes para garantizar su estanqueidad pero que resulta poco favorable por permitir la acumulación de polvo en su superficie (ver Figura 1). Esta inclinación, además, proporciona una mayor exposición a los rayos solares por recibirlos de manera casi perpendicular a las horas de mayor radiación. Ambos factores: acumulación de polvo y deterioro por exposición a

los rayos del sol, permitieron evaluar la durabilidad de la reflectancia en los acabados estudiados en condiciones adversas.



Figura 1: Disposición de la estructura con las muestras de acabados para láminas metálicas galvanizadas. Elaboración propia.

Dentro de la estructura en donde se colocaron los segmentos de lámina se reservó un espacio para la colocación de una pieza de madera de triplay de 6 mm pintada con pintura blanca vinil acrílica, la cual sería colocada sólo para las mediciones y posteriormente retirada para su resguardo.

Con la ayuda de una cámara digital Reflex Cannon EOS 1100D y un trípode, se capturaron 15 fotografías digitales del conjunto de acabados a lo largo de 10 meses (ver Tabla 1:). Las tomas se realizaron programando la cámara con prioridad en la apertura del diafragma y con una relación focal de $f/3.5$, cuidando que las condiciones fueran lo más similares posibles entre cada una de ellas y poniendo especial atención en el posicionamiento del trípode; la ubicación y orientación de las láminas; y el horario en el que se hicieron las tomas.

Tabla 1: Fechas en las que se realizaron las fotografías de los acabados objeto de estudio.

No. De medición	Fecha toma de la fotografía	No. Día estudio
1	10 de septiembre	10
2	17 de septiembre	17
3	13 de octubre	43
4	24 de octubre	54
5	26 de octubre	56
6	6 de noviembre	67
7	13 de noviembre	74
8	28 de noviembre	89
9	14 de diciembre	105
10	5 de enero	127
11	1 de febrero	154
12	7 de marzo	188
13	26 de marzo	207
14	6 de mayo	248
15	30 de junio	303

Con todos los acabados a estudiar en un mismo sitio y expuestos a idénticas condiciones fue posible registrar el comportamiento de sus reflectancias a lo largo del periodo de estudio.

Dentro de la escena capturada, junto a las láminas con los diferentes acabados se colocó una referencia de color blanco, la cual era retirada del sitio una vez hecha la toma y resguardada de la luz y el polvo. Con lo cual cada una de las imágenes digitales conservaría una luminancia constante, siendo posible conocer la diferencia entre la luminancia del blanco de referencia y las del resto de los acabados.

Las imágenes se ingresaron en un programa realizado en la plataforma de programación MATLAB®. (MATLAB, 2010). Este programa obtiene la luminancia relativa de cada uno de los píxeles que componen la imagen y posteriormente entrega el promedio de dicha luminancia para una sección previamente seleccionada. El programa permite abrir la imagen en una ventana emergente, en la cual, con la ayuda del mouse es posible seleccionar una sección de la imagen, obteniendo solo el promedio de los píxeles incluidos en la selección. De manera tal que para cada imagen capturada se obtuvieron los valores de luminancia relativa de cada acabado a estudiar, incluido el acabado de referencia.

2.1 Sistema de medición de luminancias relativas por medio de fotografías digitales

Una superficie blanca, con una alta reflectancia, será capaz de reflejar en mayor medida los rayos de luz visible que impacten su superficie, con lo que la cantidad de luz reflejada percibida por el ojo humano (luminancia absoluta) será directamente proporcional al nivel de flujo luminoso incidente (iluminancia) y a la porción de dicho flujo que ésta puede reflejar (coeficiente de reflectancia).

En la reproducción de imágenes no es factible la reproducción de las luminancias absolutas de la escena original, con lo cual se reproducen las luminancias de manera proporcional a la máxima luminancia disponible en el medio de reproducción. Una vez normalizados los valores de las luminancias absolutas de la escena a un blanco de referencia obtenemos la "luminancia relativa" (LR). La cual tiene un valor de 0 a 100, siendo 0 el negro absoluto y 100 el valor de la máxima luminancia para esa imagen. (Poynton, 2012).

De forma similar, en las fotografías digitales de formato RGB, se registran los valores para los componentes rojo, verde y azul de cada uno de los colores que componen la imagen. Con valores que van de 0 a 1.

De esta forma el color (1,1,1) representa un blanco puro de referencia y el (0,0,0) un negro absoluto de referencia. Para conocer la luminancia de cada color en la imagen se aplica un coeficiente a cada uno de los valores RGB que la componen, el cual es función de la ponderación espectral para el rojo, el verde y el azul respectivamente.

Aplicando la siguiente fórmula (Poynton, 2012) es posible obtener la luminancia relativa (Y) de cada uno de los píxeles en la imagen: $Y = (0.299)R + (0.587)G + (0.114)B$. Donde: R valor rojo del píxel, G valor verde del píxel, B valor azul del píxel y Y la luminancia relativa (por ejemplo, Y = 1 corresponde a una imagen en blanco y Y = 0 a una imagen en negro).

2.2 Tratamiento de los datos

Si se considera un coeficiente de reflectancia máximo para el acabado blanco de referencia que, de acuerdo con la literatura es de alrededor de 0.8, y se considera que este valor se mantiene sin cambios a lo largo del experimento, se puede asumir que la luminancia relativa registrada en las capturas fotográficas será igualmente estable. Por lo tanto, se infiere que las diferencias del valor de la luminancia relativa de los acabados estudiados (LRA) con respecto al valor de la luminancia relativa del acabado blanco de referencia (LRR) serán directamente proporcionales a las diferencias de sus luminancias absolutas. Mediante el análisis de las diferencias entre la luminancia relativa del acabado

blanco de referencia y las de los acabados estudiados, es factible conocer la tendencia en el comportamiento de la reflectancia de los acabados puestos a prueba.

Después de obtener los valores para las luminancias relativas de cada uno de los acabados en las 15 fotografías capturadas, se procedió a su análisis en gráficas para observar los cambios a lo largo del tiempo.

3. Resultados

Los registros de la luminancia relativa del acabado blanco de referencia presentaron una variación significativa. También se encontró una considerable variabilidad de las luminancias relativas del resto de los acabados estudiados, siendo mayor para la lámina metálica natural, y los esmaltes color rojo óxido y negro. Por otro lado, las superficies de pintura vinil acrílica blanca, Cool Roof, esmalte blanco y el metal oxidado presentaron dispersiones menos acentuadas (ver Figura 2). Aunque las capturas fueron hechas para que las variables tales como, horario de la toma de las fotografías, posición de la cámara con respecto a la escena a capturar y la programación de la apertura de la cámara fueran las mismas en todos los casos, los pequeños cambios en la dirección de la luz incidente, debido a las condiciones climatológicas o bien a la variación que se da de la dirección de los rayos del sol a lo largo del año, aunado a las características de rugosidad de los diferentes materiales, no permitieron a los sensores de la cámara tener una gran precisión. Sobre todo, para los acabados con mayor especularidad como son la lámina natural y los acabados a base de esmalte.

Muchos de los instrumentos especializados utilizados para medir reflectancias solares y emitancias superficiales encuentran dificultades con ciertos materiales, especialmente con aquellos que presentan altos niveles de especularidad como son los acabados metálicos. Es muy probable que los sensores de la cámara encuentren este mismo tipo de dificultades.

Tabla 2: Valores de las luminancias relativas de los acabados (LRA) y de la referencia (LRR) para cada uno de los días de estudio Elaboración propia.

Captura (No.)	LRA*								LRR*	Día
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)		
1	0.84	0.85	0.84	0.82	0.59	0.12	0.20	0.12	0.84	10
2	0.80	0.79	0.80	0.77	0.69	0.14	0.26	0.15	0.80	17
3	0.88	0.90	0.89	0.86	0.49	0.16	0.24	0.06	0.89	43
4	0.84	0.87	0.86	0.83	0.41	0.15	0.22	0.05	0.85	54
5	0.90	0.91	0.92	0.88	0.72	0.18	0.38	0.22	0.92	56
6	0.83	0.86	0.87	0.84	0.64	0.15	0.32	0.13	0.84	67
7	0.86	0.90	0.91	0.87	0.67	0.16	0.35	0.18	0.88	74
8	0.86	0.91	0.91	0.88	0.46	0.15	0.26	0.06	0.88	89
9	0.82	0.88	0.87	0.84	0.43	0.14	0.24	0.06	0.85	105
10	0.86	0.90	0.90	0.84	0.67	0.15	0.38	0.19	0.89	127
11	0.83	0.86	0.86	0.79	0.45	0.12	0.24	0.06	0.85	154
12	0.83	0.83	0.84	0.73	0.44	0.06	0.19	0.05	0.85	188
13	0.95	0.94	0.95	0.88	0.67	0.11	0.33	0.14	0.96	207
14	0.87	0.85	0.83	0.71	0.46	0.07	0.21	0.06	0.87	248
15	0.95	0.95	0.94	0.87	0.61	0.17	0.46	0.09	0.94	303
R	0.57	0.39	0.34	-0.20	-0.16	-0.36	0.30	-0.27		
R²	0.33	0.15	0.11	0.04	0.02	0.13	0.09	0.07		

Nota: *1. Esmalte blanco acrílico; 2. Revestimiento "Cool Roof"; 3. Pintura blanca vinil-acrílica; 4. Impermeabilizante blanco 100% acrílico base agua; 5. Lámina galvanizada al natural (sin acabado); 6. Lámina Oxidada; 7. Esmalte rojo óxido acrílico; 8. Esmalte negro acrílico.

LRA = Luminancia relativa acabados. LRR = Luminancia relativa referencia.

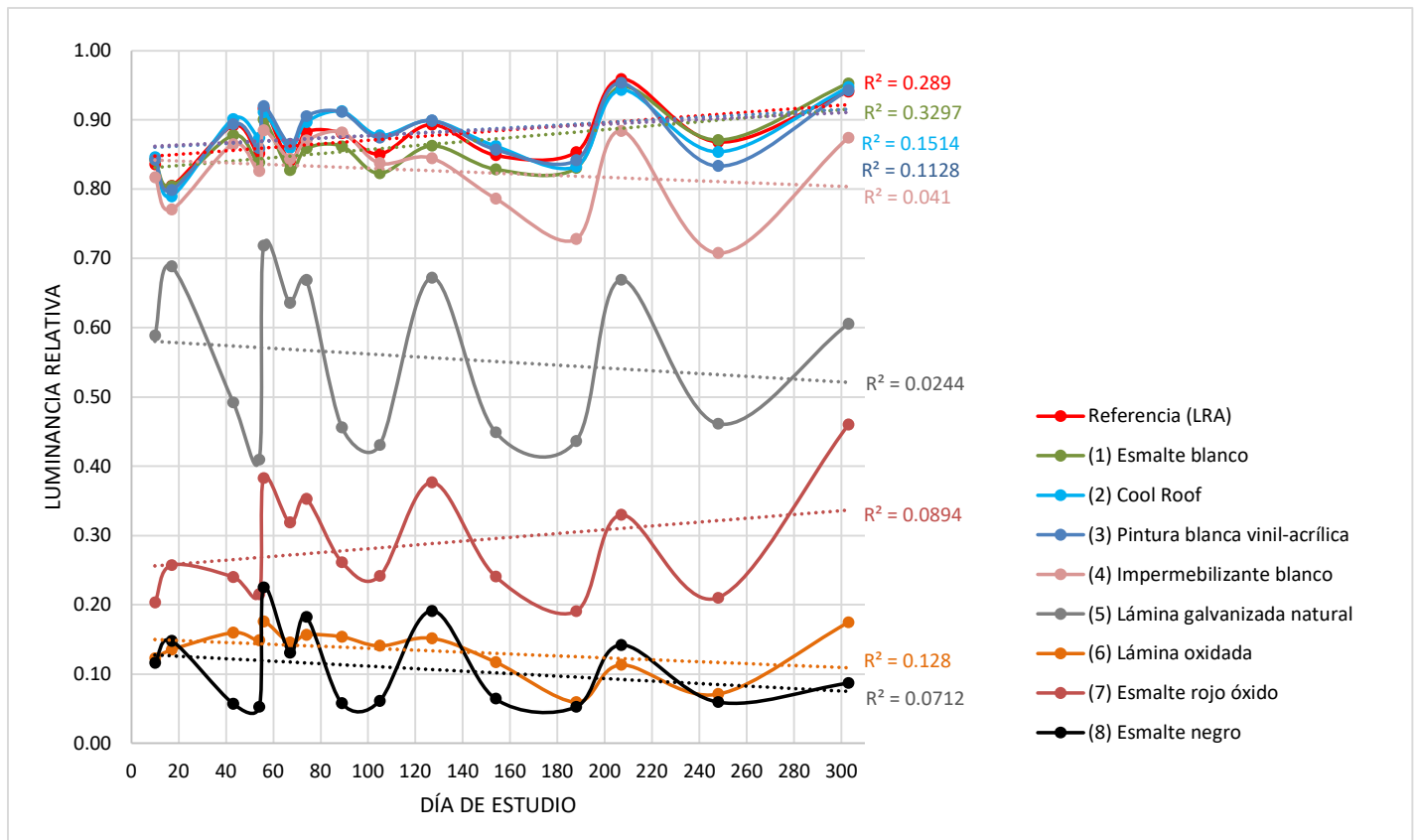


Figura 2: Comportamiento de las luminancias relativas (LRR y LRA) de los acabados de las láminas metálicas. Elaboración propia.

La mayoría de los acabados aplicados a las láminas metálicas presentaron una disminución de sus valores de luminancia relativa a lo largo del tiempo. La correlación entre la luminancia relativa de la mayoría de los acabados estudiados y el paso del tiempo es negativa, de débil a moderada, a excepción de los acabados blancos (1, 2 y 3) y el esmalte rojo óxido (7), que presentaron correlaciones inversas (ver Tabla 2).

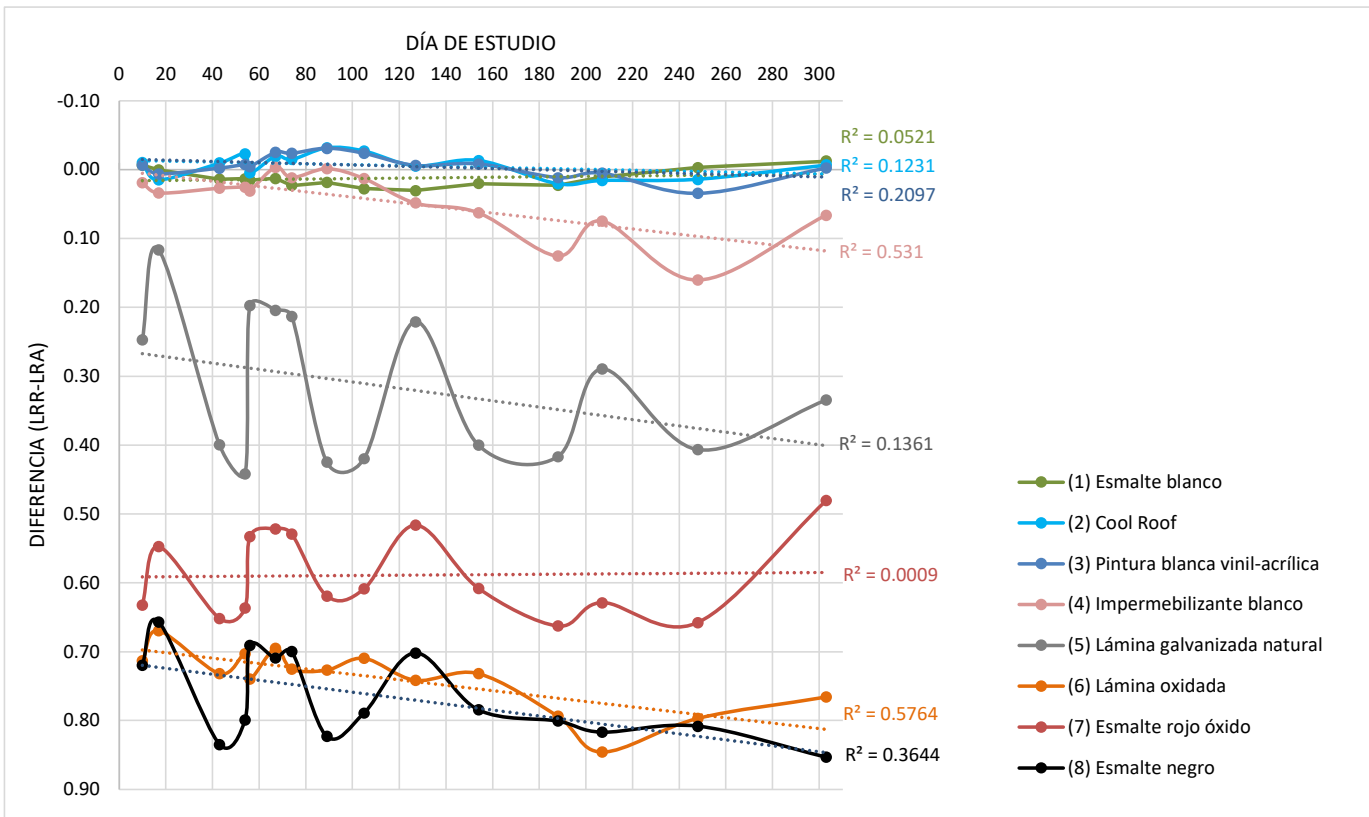
Con el objetivo de realizar una observación más precisa del comportamiento de las luminancias de los acabados estudiados, se realizó un análisis de las diferencias entre la luminancia relativa de referencia y las del resto de los acabados (ver Tabla 3).

La tendencia de los acabados a perder su nivel de luminancia es mucho más clara en el análisis de las diferencias entre la luminancia relativa del acabado blanco de referencia con respecto a la luminancia relativa de las muestras (LRR-LRA), con correlaciones positivas de moderadas a fuertes para los acabados 2, 4, 5, 6 y 8 (ver Figura 3)

Tabla 3: Diferencias entre los registros de la luminancia relativa del blanco de referencia (LRR) y las luminancias relativas de los acabados para las láminas metálicas estudiados (LRA). Elaboración propia.

Captura (No.)	LRA*								LRR*	Día
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)		
1	-0.01	-0.01	-0.01	0.02	0.25	0.71	0.63	0.72	0.84	10
2	0.00	0.02	0.01	0.03	0.12	0.67	0.55	0.66	0.80	17
3	0.01	-0.01	0.00	0.03	0.40	0.73	0.65	0.83	0.89	43
4	0.01	-0.02	-0.01	0.03	0.44	0.70	0.64	0.80	0.85	54
5	0.02	0.00	0.00	0.03	0.20	0.74	0.53	0.69	0.92	56
6	0.01	-0.02	-0.02	0.00	0.20	0.70	0.52	0.71	0.84	67
7	0.02	-0.01	-0.02	0.01	0.21	0.73	0.53	0.70	0.88	74
8	0.02	-0.03	-0.03	0.00	0.42	0.73	0.62	0.82	0.88	89
9	0.03	-0.03	-0.02	0.01	0.42	0.71	0.61	0.79	0.85	105
10	0.03	-0.01	-0.01	0.05	0.22	0.74	0.52	0.70	0.89	127
11	0.02	-0.01	-0.01	0.06	0.40	0.73	0.61	0.78	0.85	154
12	0.02	0.02	0.01	0.13	0.42	0.79	0.66	0.80	0.85	188
13	0.01	0.02	0.01	0.07	0.29	0.85	0.63	0.82	0.96	207
14	0.00	0.01	0.03	0.16	0.41	0.80	0.66	0.81	0.87	248
15	-0.01	-0.01	0.00	0.07	0.33	0.77	0.48	0.85	0.94	303
R	-0.23	0.35	0.46	0.73	0.37	0.76	-0.03	0.60		
R ²	0.05	0.12	0.21	0.53	0.14	0.58	0.00	0.36		

Figura 3: Diferencias entre la luminancia relativa de referencia (LRR) y las luminancias relativas de los acabados de las láminas metálicas estudiados (LRA). Elaboración propia.



De dicho análisis se pudo observar que los acabados blancos en general presentaron luminancias muy parecidas a las del acabado de referencia y no presentaron diferencias observables a lo largo de los 10 meses de estudio, salvo en el caso del impermeabilizante blanco, el cual presenta una tendencia a disminuir su luminancia relativa en un 12% con respecto a el acabado blanco de referencia. (ver Figura 3).

Además, se puede advertir que, a excepción de los acabados blancos (1, 2, y 3) y la lámina con laca rojo óxido (7), el resto de los acabados presentan tendencias moderadas a disminuir sus luminancias relativas respecto al acabado blanco de referencia, registrando las mayores diferencias la lámina con pátina de oxidación (6) y la muestra pintada con esmalte negro (8) (ver Figura 3).

5. Conclusiones

A excepción del impermeabilizante, los otros acabados en color blanco estudiados conservaron sus valores de LR iniciales en todo el periodo de estudio. De esta forma, se infiere que el rendimiento de sus reflectancias solares se comportó de la misma manera, lo cual permitiría garantizar una periodicidad razonable para su mantenimiento o sustitución, por lo que se consideran adecuados para su utilización como estrategia de control térmico en las cubiertas metálicas.

Es posible que el acabado con tecnología Cool Roof, con precios más elevados que los de pinturas convencionales en el mercado, tenga un desempeño muy similar al que tendrían los esmaltes o pinturas vinil-acrílicas blancas. Un estudio específico de sus respectivas emitancias podría establecer un mayor grado de efectividad en alguno de ellos para disipar calor. Sin embargo, al conservar valores LRA muy similares a los del acabado blanco de referencia (LRR) se infiere que sus reflectancias solares no se ven modificadas sustancialmente a lo largo del estudio, por lo que resultan todos ellos igualmente efectivos como estrategia de control térmico.

La LRA del esmalte rojo óxido no presentó una tendencia a disminuir a lo largo del estudio, sin embargo, presentó valores considerablemente más bajos a los de la LRR por lo que se infiere presentaría una reflectancia solar menor en la misma proporción a la del acabado blanco de referencia. Por este motivo, no se considera un acabado adecuado para las cubiertas de láminas metálicas por sus efectos adversos en el fenómeno de sobrecalentamiento por causa de elevados índices de radiación solar.

La LRA de la lámina con esmalte negro presentó un nivel equivalente al de la lámina oxidada, con lo cual, se infiere un valor similar para sus respectivas reflectancias solares. Esta observación es relevante cuando se conocen los efectos térmicos negativos de los acabados negros que, en general, cuentan con los valores de absorción solar más elevados. Por lo que, un inadecuado mantenimiento de la cubierta metálica, que permita la aparición de una pátina de óxido considerable, tendrá un desempeño térmico muy desfavorable.

Por último, con relación a la metodología implementada en el presente estudio, se advierte una importante variabilidad en los registros de luminancias relativas en las imágenes, por lo que, para validar la precisión de estas mediciones sería necesario utilizar un luminancímetro o un reflectómetro solar para verificar el comportamiento de las reflectancias solares y comprobar su equivalencia con la luminancia relativa obtenido por medio de las imágenes digitales.

Contribuciones de los autores: Vi.E.R. conceptualizó, diseñó y ejecutó la investigación, llevó a cabo el análisis de datos y redactó el texto del artículo; Ve.E.R. desarrolló y programó el software utilizado para el procesamiento de imágenes digitales, que permitió la obtención de los datos; H.P.C. y J.F.G. participaron en el análisis de datos, aportaron criterios clave para el análisis y contribuyeron en la creación de tablas y gráficos pertinentes. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito”.

Financiamiento: Esta publicación ha contado con el apoyo del Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) del Gobierno Mexicano.

Declaración de disponibilidad de datos: No aplica

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses. Los patrocinadores no tuvieron ningún papel en el diseño del estudio; en la recopilación, análisis o interpretación de datos; en la redacción del manuscrito, o en la decisión de publicar los resultados.

Referencias

- Barrios, G., Huelsz, G., Rojas, J., Ochoa, J. M., & Marincic, I. (2012). Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings. *Energy and Buildings*, 50, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.030>
- Borge-Diez, D., Colmenar-Santos, A., Pérez-Molina, C., & Castro-Gil, M. (2013). Passive climatization using a cool roof and natural ventilation for internally displaced persons in hot climates: Case study for Haiti. *Building and Environment*, 59, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.013>
- Europe, I. E., Task, T. A., Dissemination, D., Due, P. U., & Zinzi, M. (2009). COOL ROOFS “ The Cool Roofs Material DATABASE .” September 2008.
- Gagliano, A., Patania, F., Nocera, F., Ferlito, A., & Galesi, A. (2012). Thermal performance of ventilated roofs during summer period. *Energy and Buildings*, 49, 611–618. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.007>
- Heat Island Group. (2022). Roof Coatings, White. <https://heatisland.lbl.gov/resources/roof-coatings>
- INEGI. (n.d.). México en cifras. Información Nacional por entidad federativa y municipios. <http://www3.inegi.org.mx/>
- Kabre, C. (2010). A new thermal performance index for dwelling roofs in the warm humid tropics. *Building and Environment*, 45(3), 727–738. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.017>
- Lira Oliver, A., & Guevara Mon, A. B. (2017). Práctica 6: MEDICIÓN DE LA REFLECTANCIA SOLAR. La reflectancia solar como proceso determinante en la temperatura ambiente de las islas de calor y en la climatización natural al interior de las edificaciones. (pp. 1–12). http://leias.fa.unam.mx/wp-content/uploads/2018/07/180515_Practica6_LES.pdf
- MATLAB (version 7.10.0 R2010a). (2010). MathWorks, Inc.
- NASA. (2022, April 22). Data Acces Viewer. NASA Prediction of Worldwide Energy Resources. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Poynton, C. A. (2012). *Digital Video and HD: Algorithms and Interfaces (2°)*. Elsevier.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2023). Normales Climatológica por Estado. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=tab>
- Synnefa, a., Saliari, M., & Santamouris, M. (2012). Experimental and numerical assessment of the impact of increased roof reflectance on a school building in Athens. *Energy and Buildings*, 55, 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.01.044>
- Zinzi, M., & Romero, C. (2010). Cool roofs case studies in EU level.