

EL RECORRIDO EN ESPACIOS DE BAJA INTENSIDAD LUMÍNICA

PRESENTADO POR: EDGARD EDUARDO ESPINOZA CATERIANO

DIRIGIDO POR: ISABEL CRESPO CABILLO

PROGRAMA DE DOCTORADO: ARQUITECTURA, ENERGÍA Y MEDIOAMBIENTE
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE BARCELONA (ETSAB)
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA (UPC)

2022

Agradecimientos

A mi directora de tesis, Isabel Crespo, por guiarme en este largo recorrido, a veces con luz y otras en penumbra, sin perder el norte.

A los profesores de la UPC por compartir conmigo lo más valioso que poseen: el conocimiento.
¡Gracias Helena, Toni, Judit, Agnese, Elena, Carlos, Anna, Cristina, Benoit, Fidel y Jaume!

Al gobierno del Perú por ortorgarme la beca Generación Bicentenario.

A las instituciones y empresas que sin su apoyo no hubiese sido posible acceder a los casos de estudio: Museo de Badalona, Aire Ancient Bath, MACBA, CCCB y Feroz.

A cada uno de mis compañeros de doctorado por compartir su experiencia, tiempo y amistad.
¡Muchas gracias Carlos, Moritz, Badia, Bruno y Laura!

A los amigos que me ha alentado durante todos estos años, en especial a Cristian y Magaly.

A mi prima Jose por brindarme su ayuda incondicional en momentos claves.

A mi padrino, amante del conocimiento y primer doctor de la familia.

A mi ahijado, curioso de las ciencias y las artes.

A mis padres, siempre presentes.

ÍNDICE

Índice	1
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Justificación.	APORTAR BASE TEÓRICA PARA LOS DISEÑOS LUMÍNICOS EN CONDICIONES DE BAJA INTENSIDAD COMO ESPACIOS DE MEDITACIÓN, DE CONSERVACIÓN O DE ESTUDIO.
1.2. Objetivos.	DETERMINAR SI EN SITUACIONES DE BAJA INTENSIDAD, LOS PARÁMETROS DEL DISEÑO LUMÍNICO SON LOS MISMOS QUE EN SITUACIONES DE ALTA INTENSIDAD.
1.3. Hipótesis.	EN ESCENAS DE MUY BAJA INTENSIDAD, LA TEMPERATURA DE COLOR ES EL FACTOR MÁS IMPORTANTE EN EL DISEÑO LUMÍNICO.
1.4. Estado del arte.	LA BIBLIOGRAFÍA EXISTENTE SE ENFOCA SOBRETUDO EN CONDICIONES DE ALTA INTENSIDAD. LOS ESTUDIOS PARA BAJAS INTENSIDADES SE HAN DESARROLLADO EN ÁMBITOS DE ESCENOGRAFÍA Y MUSEOGRAFÍA.
1.5. Estructura del trabajo.	EL PLANTEAMIENTO DE LA TESIS, LA DOCUMENTACIÓN, LOS CASOS DE ESTUDIOS, EL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y LAS CONCLUSIONES.
Capítulo 2. LA LUZ Y EL DISEÑO LUMÍNICO: El marco teórico	13
2.1. Fuentes de luz.	PRINCIPIOS, MAGNITUDES, LEYES, RENDIMIENTO LUMINOSO, CURVAS FOTOMÉTRICAS Y DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL DE LA ENERGÍA RADIANTE.
2.2. Objetos iluminados.	LA REFLEXIÓN, LA ABSORCIÓN, LA REFRACCIÓN, EL RELIEVE, LA TEXTURA, LA RUGOSIDAD Y EL COLOR.
2.3. Observador.	LOS TIPOS DE VISIÓN, EL CAMPO VISUAL, LA ACOMODACIÓN Y ADAPTACIÓN DEL OJO, LA PERCEPCIÓN VISUAL Y EL CONFORT VISUAL.

2.4. Parámetros del diseño lumínico.	LOS NIVELES DE LUZ, LOS CONTRASTES DE LUMINANCIAS, DESLUMBRAMIENTO, LOS CONTRASTES DE COLOR, LA TEMPERATURA DE COLOR Y COLOR DE LA LUZ, EL ÍNDICE DE RENDIMIENTO DE COLOR, EL TIEMPO DE ADAPTACIÓN A LA OSCURIDAD Y LA DIRECCIONALIDAD.	
2.5. Estrategias del diseño lumínico.	COMBINACIÓN Y JERARQUIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS EN ESPACIOS DE ALTA Y BAJA INTENSIDAD LUMÍNICA.	
Capítulo 3. INVESTIGACIÓN		57
3.1. Metodología.	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN, OBSERVACIONES, MEDICIONES Y RESULTADOS.	
3.2. Casos de estudio.	CINCO CASOS APLICADOS: MUSEO DE BADALONA, BAÑOS TERMALES AIRE, EXPOSICIÓN EN CAPILLA MACBA, RESTAURANTE FERROZ Y EXPOSICIÓN EN CCCB.	
Capítulo 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS		125
4.1. Análisis de resultados por caso de estudio.	LOS RESULTADOS MÁS DESTACADOS DE LOS CINCO CASOS DE ESTUDIO.	
4.2. Análisis comparativo de casos de estudio.	DONDE SE PONEN EN EVIDENCIA Y SE COMPARAN LOS DATOS MÁS SIGNIFICATIVOS Y SU RANGO DE MAGNITUD A PARTIR DE LAS MEDICIONES Y LAS OBSERVACIONES.	
Capítulo 5. CONCLUSIONES		135
5.1. Confirmación de la hipótesis.		
5.2. Líneas de trabajo para posteriores investigaciones.		
REFERENCIAS		
Bibliografía		139
Índice de tablas		146
Índice de figuras		147
ANEXOS		151

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN



Figura 1. L'empire des lumières. René Magritte. 1953. Guggenheim New York.

“¿Pero de cuánta luz tiene necesidad el hombre para poder vivir?
¿Y de cuánta oscuridad? ¿Hay un estado del alma o una
circunstancia de la vida especialmente sensible en donde las
cantidades mínimas de luz son suficientes para una buena vida?
O es más, ¿necesitamos lugares oscuros y en la sombra,
necesitamos la oscuridad de la noche para poder acceder a
determinadas experiencias?

Peter Zumthor (2009)

La luz es un componente del espacio sin el cual la arquitectura no existe como tal. Los espacios arquitectónicos deben considerar su iluminación como parte integrante del diseño formal, no sólo para que puedan ser vistos, sino para que puedan ser comprendidos. El mismo espacio puede percibirse de maneras diferentes según sea su estructura, su recorrido o su iluminación.

El diseño lumínico es pues un aspecto importante del diseño arquitectónico. Para poder resolver este diseño con solvencia hay que tener en cuenta cómo actúan cada uno de los atributos que participan de la escena lumínica. Primero, las características de las fuentes de luz (intensidad, índice de rendimiento de color, temperatura de color, rendimiento, etc.). Segundo, las características de las superficies donde incide la luz (índice de reflexión, textura, color, etc.). Por último, las características del observador (personas mayores, niños, personas condicionadas por una vivencia concreta como reposo, intimidad, etc.).

La correcta o adecuada combinación de estos elementos dará como resultado una percepción del espacio u otra muy distinta. Existen muchos trabajos que analizan cómo actúan cada uno de los componentes lumínicos, tanto de luz natural como de luz artificial, para espacios de trabajo, fábricas, oficinas, escuelas, etc. donde los requerimientos parten de una condición de intensidades lumínicas altas.

Desde el punto de vista fisiológico, en condiciones de alta intensidad de luz las personas tienen una visión fotópica. En estas condiciones las células fotosensibles de la retina, bastoncillos y conos, actúan en pleno rendimiento y los aspectos prioritarios a definir en un diseño lumínico son, por ejemplo, cómo matizar los excesos de luz, cómo modificar una fuente para alterar la dirección de propagación, cómo combinar las luminancias dentro del campo visual del observador, evitar los excesivos contrastes o cómo destacar elementos del contorno gracias al correcto contraste de luminancias.

Cuando nos encontramos en un espacio de baja intensidad de luz los parámetros a considerar en el diseño lumínico tienen un orden de prioridad distinto al de los espacios con alta intensidad lumínica. El cambio en la intensidad de luz produce cambios en el tipo de visión y, por tanto, en la percepción visual de la escena. En la visión escotópica, regida por células fotosensibles llamadas bastones, la capacidad de distinguir los colores de las superficies se reduce y la sensibilidad de la visión periférica aumenta; al contrario de lo que sucede en la visión fotópica, guiada por los conos de la retina. En cambio, la visión mesópica, la transición entre los dos tipos de visión anteriores, se caracteriza por tener las ventajas y desventajas de ambos tipos de visión, aunque con menor grado. Los cambios en los tipos de visión nos llevan a pensar en buscar distintas estrategias de diseño lumínico dependiendo del nivel de luz del entorno.

Este trabajo ha analizado este tipo de situaciones, a partir del análisis de casos concretos para establecer cómo y cuánto cambian las prioridades de un diseño lumínico que se desarrolle en estas condiciones, como por ejemplo centros de relajación, centros de aguas termales, ciertos restaurantes, museos o exposiciones de patrimonio arqueológico, centros de meditación, instalaciones efímeras que pretenden provocar emociones o cualquier otro sitio donde se requiera un bajo nivel de luz para conducirnos a un estado de calma y concentración.

1.1 Justificación.

Hoy en día en Perú existe un gran interés por la construcción de museos para poner en valor el patrimonio histórico, vemos así que existen proyectos de pequeña, mediana y gran envergadura en la capital (Holmquist, 2019). Los museos son espacios donde las condiciones lumínicas deben estar muy controladas por motivos de conservación de los objetos expuestos (Schielke, 2020). Sin embargo, observamos una predisposición mantener niveles altos de luz en los espacios interiores, como los museos, con la premisa de tener más luz para tener una mejor visión (Sharif-Askari & Abu-Hijleh, 2018). De hecho, existen reglamentos, normas y recomendaciones que estipulan los niveles mínimos y máximos de luz; pero en ninguno de ellos encontraremos indicaciones para lograr iluminar un espacio con sensibilidad y calidad, características que van a depender únicamente del criterio del diseñador (Muñoz Heras, 2012).

Un nuevo estudio pormenorizado de espacios con diferentes usos pero que requieran muy poca luz servirá de punto de partida para repensar el recorrido de estos espacios, en donde las características de la luz, la superficie y la visión son fundamentales para fortalecer el vínculo entre el símbolo y el significado del objeto. La presente investigación consiste en evaluar la iluminación de lugares destinados a conservar bienes inmuebles, muebles o de consumo; reduciendo el nivel de luz sin perjuicio en la visión de los objetos. Es, por tanto, a partir de la relación que se va a establecer entre los diversos factores en juego que el proyectista va a lograr su objetivo: crear un espacio propicio para la introspección y el aprendizaje individual en el que el manejo de la luz sea un ejemplo extrapolable a cualquier otro espacio de baja intensidad lumínica.

1.2 Objetivo.

Describir y cuantificar los parámetros más importantes que intervienen en un diseño lumínico para espacios con muy poca intensidad. Estos parámetros y sus valores umbral han de contribuir a establecer criterios útiles en el diseño lumínico en general. Los criterios que se haya de aplicar han de estar basados en la investigación objetiva que lleva a un conocimiento contrastado. El objetivo específico es contribuir a establecer esos criterios para espacios que requieran una situación lumínica de muy baja intensidad, como son museos y exposiciones del patrimonio arqueológico o centros que busquen un estado anímico de recogimiento, intimidad o reflexión personal en una configuración de recorrido como baños termales, restaurantes, etc.

1.3 Hipótesis.

En situaciones de muy baja intensidad lumínica en que el observador está en condiciones de visión escotópica o mesópica, los parámetros a considerar en el diseño lumínico tienen diferente jerarquía que en espacios con alto nivel de luz. Algunas de las variables lumínicas pasan a ser secundarias y las características de temperatura de color y de color de la luz se sitúan en un primer plano de importancia entre los componentes del diseño lumínico.

1.4 Estado del arte.

La presente investigación se centra en la manera de iluminar espacios con recorrido y baja intensidad lumínica. Hay muchos ejemplos de arquitectura construida en torno al desplazamiento de las personas. En este trabajo nos enfocaremos en aquellos espacios cuyo recorrido e iluminación permite inducir al usuario a un estado de calma y concentración. Al respecto, diversos pensadores han reflexionado en la relación entre el ejercicio de caminar y de pensar. Desde la filosofía de Aristóteles, fundador de la escuela peripatética, hasta los testimonios de Friedrich Nietzsche: “All truly great thoughts are conceived while walking”; Henry Thoreau: “Methinks the moment my legs begin to move, my thoughts begin to flow”; y, mucho más reciente, Frédéric Gros con su libro *Philosophy of Walking*. Además, la universidad de Stanford publicó un estudio que señala el incremento del 80 % de la creatividad, al realizar test de usos alternativos diseñados por J.P. Guilford, entre los participantes que caminaron versus los que permanecieron sentados (Oppezzo & Schwartz, 2014). Cuando John Butcher (Walk21, 2006), en la Carta internacional del caminar, comenta: “Caminar es tan natural como respirar”, entendemos que no sólo hace referencia a la capacidad innata de andar; sino también a la necesidad que implica para el pleno desarrollo del ser humano. Por tanto, cuando las luminancias son bajas y las personas se encuentran abstraídas en el pensamiento, el suministro de un suelo firme, visible y confiable se convierte en una necesidad.

A lo largo de la historia ha habido culturas en que el interés por la penumbra y el recorrido ha sido parte fundamental de la arquitectura, prueba de ello son el Templo de Ramsés II, el Partenón de Atenas, el Panteón de Agripa o las iglesias románicas (Moretti, 2013). Una mirada a los orígenes de la arquitectura oriental nos va a permitir identificar también una cierta tendencia a mantener los interiores con niveles muy bajos de iluminación, de modo que “mientras que a los cristianos les fascinaba la luz y los brillos, los maestros constructores chinos y japoneses creaban centros de sombra y calma con la ayuda de luz difusa, luz que sabían guardar con maestría” (Behling & Behling, 2002). La preferencia por filtrar el ingreso de la luz con entramados, telas y fibras otorga a los espacios un significado de recogimiento que permite apreciar la arquitectura desde un estado de sosiego (Tanizaki, 1994). Hoy en día, los espacios de baja intensidad de luz, aún son materia de investigación y experimentación entre los profesionales que diseñan con la luz. En palabras de Sverre Fehn: “Creo que la arquitectura habla de la luz, pero yo pienso que es una cuestión de sombras. El hombre busca un lugar en el que estar, un lugar en el que se pueda esconder de la luz, el sol, y encontrar sus sombras” (Binet, Casati, Oechslin, Ando, & Cachola, 2002). Hoy en día sabemos que iluminar con mayor intensidad no es sinónimo de calidad, por tanto, es necesario profundizar en el estudio de los parámetros que debemos considerar en baja intensidad lumínica.

La investigación del diseño lumínico en espacios con poca luz ha sido abarcada desde diferentes puntos de vista. Edgar Domínguez (2015) nos advierte sobre la importancia de diseñar con sombra ya que nos permite acercarnos a la naturaleza más profunda del hombre. Sobre la construcción de la sombra, René Sánchez (2005), nos indica que la oscuridad puede agudizar la concentración ya que un espacio de culto bien logrado permite sincronizar los recursos de afectación multisensorial con la finalidad de exaltar el ritual. En referencia al filtro necesario en las aberturas con visión del exterior, Alexis Aguilar (2014), nos advierte que el riesgo de deslumbramiento es mayor cuando los usuarios ocupan posiciones frontales en relación a las ventanas. Judit López (2015) destaca que la transición gradual de luminosidad, el uso de la sombra en el recorrido y la adecuada elección de materiales, permite una mejor adaptación visual a un entorno más oscuro.

Además, se han revisado los avances en diferentes campos de estudio en donde la luz es un tema transversal. Existe numerosa bibliografía acerca de la luz y su vínculo con la arquitectura (Samuel, 2007). La mayor parte de estos textos explican, desde diversos puntos de vista, la importancia de la materia lumínica para percibir el medio en el que se desenvuelve el ser humano. Entre ellos destacan, por la profundidad de sus conclusiones y la estrecha relación con el tema que pretendemos poner en manifiesto aquí, los trabajos de Hopkinson, Lam y Gibson. Para el primero de ellos, la iluminación es el factor más importante a considerar en el diseño arquitectónico. El autor afirma que un espacio tendrá una apariencia satisfactoria si la luz y el color nos despierta sensaciones agradables (Hopkinson & Kay, 1972). Lam (1986), por su parte, complementa lo anterior advirtiendo que la iluminación que satisface las necesidades biológicas, además, permite realizar cualquier tarea visual en simultáneo. Gibson, comparte con Lam que la visión no es sólo una imagen en la retina, sino que es parte de un proceso biológico, intelectual y de interpretación (Gibson, 1974). Los tres autores coinciden en que la percepción visual depende de las características propias de la luz, la materia y la visión, por ello profundizaremos en cada una de ellas.

Entre las características de la luz encontramos la intensidad, la dirección, el rendimiento, la distribución espectral de la fuente de luz, la temperatura de color, el índice de reproducción cromática y los aspectos relacionados al tiempo de funcionamiento de la lámpara. En cuanto a la intensidad de luz y la temperatura de color uno de los primeros en relacionarlas fue Kruithof. El físico elaboró un diagrama con curvas para delimitar una zona de confort visual. En el conocido gráfico se establece que para bajos niveles de luz son deseables bajas temperaturas de color, mientras que para altos niveles de luz el rango se desplaza y se amplía en favor de altas temperaturas de color (Kruithof, 1941). El componente subjetivo para evaluar si un entorno es agradable ha sido revisado por varios expertos y se encontraron diferentes enfoques. Harington (1954) encontró que, utilizando la misma lámpara incandescente con diferentes filtros para cambiar la temperatura de color, los sujetos evaluados percibieron mayor claridad aparente en altas temperaturas de color. Bodman (1967) concuerda con Kruithof y destaca en sus hallazgos que la tarea visual solo mejora notablemente a medida que se incrementa la iluminancia. Smith and Rea (1979) evaluaron el rendimiento visual a diferentes niveles de iluminancia, con lámparas de distribución espectral diferentes entre sí, concluyendo que la satisfacción de los encuestados mejora cuando las luminancias aumentan.

El índice de rendimiento de color es otra de las características cromáticas de las fuentes de luz. Este es un parámetro que se considera por la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) desde 1965. Sin embargo, el procedimiento para calcular el índice de rendimiento de color está establecido desde el CIE 13.2-1974 y más tarde corregido en el CIE 13.3-1995. Los primeros estudios ya encontraron la ventaja de tener una distribución espectral balanceada en beneficio de la percepción con mayor claridad y satisfacción de los evaluados (Aston & Belichambers, 1969). Boyce (1977) y Kanaya et al (1979) introdujeron en sus estudios el índice de rendimiento de color, concluyendo que es la única variable que a medida que aumenta su valor mejora la valoración subjetiva del observador. Años más tarde, se midió la evaluación objetiva de discriminación de colores y la evaluación subjetiva de satisfacción del usuario, utilizando lámparas con diferente temperatura de color y un alto índice de rendimiento de color; se concluyó que el aumento de iluminancia fue la única variable favorable en la evaluación objetiva y que el cambio en temperatura de color no significa un cambio en la evaluación subjetiva de los participantes (P. R. Boyce & Cuttle, 1990).

Conjuntamente, en otro estudio se concluye que si las lámparas tienen un alto índice de rendimiento de color, la temperatura de color no afecta en la percepción visual de las superficies (P. Boyce, Akashi, Hunter, & Bullough, 2003). Diversos autores indican que la temperatura de color no siempre debe limitarse a un nivel de iluminación determinado para despertar sensaciones agradables (Viénot, Durand, & Mahler, 2009). La tendencia actual hacia el uso de los sistemas LED de iluminación obliga a repensar el papel de la temperatura de color propia de la fluorescencia (Yoon & Kim, 2014). Los estudios recientes apuntan a que el índice de rendimiento de color es un factor importante del confort visual que no fue considerado en la evaluación de Kruithof ya que se introdujo posteriormente a su estudio.

Además de las características de la fuente de luz es importante tener en cuenta las características de la materia. Weigel (1973) menciona: “El cálculo demuestra que el color de los cuerpos no es absoluto, y que depende no sólo de las propiedades de la reflexión espectral, sino también del carácter espectral de la luz que los ilumina.” (p.39). El mismo autor indica que la sensación de color está determinada también por las dimensiones superficiales del objeto, el color del espacio circundante y otros parámetros relacionados a la excitación de la luz en la superficie, tales como la intensidad, el tiempo y la región en la retina en la que actúa la excitación. En todo caso, Weigel hace referencia a que la manera en que percibimos los colores responde en primer lugar a la selectividad de la materia para reflejar ciertas longitudes de onda y luego a los aspectos relacionados a la visión y el estímulo. Cuando la luz se encuentra con la materia, la radiación electromagnética puede ser absorbida, transmitida y/o reflejada dependiendo de la opacidad del cuerpo. Las longitudes de onda reflejadas selectivamente se juntan y conforman un color, bajo la mezcla sustractiva de colores, que queda determinada en la teoría de Young – Helmholtz. Bouma (1949), en el capítulo de la evolución histórica de la teoría del color, comenta que el estudio del color comienza cuando Newton descompone la luz solar. Bouma también expone que la teoría de Young – Helmholtz incluye las seis leyes de mezcla aditiva de colores y establece el fundamento de la colorimetría. Las leyes constituyen, además, información relevante para el cálculo fotométrico de las magnitudes luminotécnicas. Años después esta teoría será retomada por Munsell (1915) para desarrollar el sistema de color basado en valor, tono y saturación. Young (1802) fue quién propuso que hay tres tipos de receptores en la retina con diferentes sensibilidades máximas. Más tarde, Helmholtz (1866) desarrolló la teoría tricromática o teoría de los tres componentes, en donde define que cada una de las células fotorreceptoras tienen preferencia a diferente longitud de onda. Las tres curvas de sensibilidad fueron primero determinadas por König & Ritter (1892) e Ives (1912) ; luego, Wright (1928) y Guild (1931) volvieron a determinar los coeficientes tricromáticos de los colores; y posteriormente, Svaetichin apoyó la teoría tricromática con una demostración biológica (Svaetichin & MacNichol, 1958).

Al respecto de las características de la visión, Purkinje (1825) fue uno de los primeros en estudiar el cambio de visión entre el día y la noche. Mas tarde Kries (1882) formuló la teoría de la duplicidad, en ella se advierte que el cambio de la visión fotópica a la visión escotópica lleva consigo un cambio de sensibilidad a las longitudes de onda. En la visión mesópica ocurre el cambio a la máxima sensibilidad a las longitudes de onda entre 510nm y 555nm. En la visión escotópica, incluso al perder la sensibilidad a los colores, se aprecia mayor claridad ante las longitudes de onda más cortas. En el proceso de cambio entre los tipos de visión, el tiempo juega un papel fundamental (De Ponte, 1996). Por ello, se han realizado numerosos estudios acerca del tiempo de adaptación a la oscuridad. El

primero en denominar el fenómeno como “Adaptación” fue Aubert, H. en 1825 (Mandelbaum, 1941). Años después se continuó estudiando las diferentes variables en el fenómeno de la adaptación y se estableció que en situaciones equiparables la luz roja, en comparación a la luz blanca, permite que el tiempo de adaptación a la oscuridad sea más corto (Hecht & Hsia, 1945). La menor sensibilidad, en la visión escotópica, a las longitudes de onda larga permite que los bastones sigan un proceso de activación más rápido. En estudios más recientes, se postuló que el tiempo de adaptación a la oscuridad, aún en los márgenes de la visión fotópica, depende de la temperatura de color, el índice de rendimiento de color y la curva de distribución de energía espectral. El estudio fue realizado para encontrar la mejor manera de iluminar la entrada a los túneles de las autopistas. El resultado indica que la temperatura de color alrededor de 4000 K permite reducir el tiempo de adaptación a la oscuridad en entornos de alta intensidad lumínica (Dong, Shang, Zhao, & Qin, 2018).

Como vemos, existen diferentes enfoques con respecto a la repercusión de la temperatura de color en el diseño lumínico. La temperatura de color es un componente de la luz que se empieza a considerar a partir del siglo XX. En 1900, el físico austriaco Max Planck describió matemáticamente la distribución de potencia espectral que se produciría a diferentes temperaturas por un objeto perfectamente radiante, llamado "cuerpo negro" porque no se reflejaría luz en él (Casas, 1975). Pocos años después, en 1912, el ingeniero eléctrico Peter Cooper Hewitt patentó la primera lámpara de descarga con vapor de mercurio. La diferencia más notable con respecto a las lámparas incandescentes, inventadas en el siglo anterior, era que el color de la luz emitida era de un azul verdoso (Bright & Arthur, 1949). En 1962, el ingeniero de General Electric, Nick Holonyak desarrolló el primer diodo de emisión de luz (LED) que emitía con mayor energía en las ondas cortas (Holonyak & Bevacqua, 1962). Con el desarrollo de nuevas tecnologías en el siglo XXI se fue mejorando la distribución espectral de los LED. Es así que, con la llegada de la electricidad, las lámparas de filamento, más tarde las de descarga y luego los LED, ya no es lo mismo alumbrar que iluminar, ahora importa la percepción humana (Domínguez Carreño, 2015).

El hombre está adaptado a la luz diurna y a sus cambios en el color de la luz. A pesar de que el cambio de temperatura de color hacia los tonos más cálidos es más notorio cuando el sol está cerca del horizonte, la percepción subjetiva del color de la luz se mantiene como favorable ya que entendemos que obedece al cambio de intensidad y dirección del recorrido solar. Wyszecki, G. & Stiles W. S. (1982) explica que la propia luz de mediodía puede estar sometida a fuertes oscilaciones entre extremos de 5000 K y 15000 K dependiendo de si el cielo está cubierto o despejado. La CIE ha creado un sistema de estándares constantes que permitan hacer comparaciones con la realidad, los Iluminantes CIE (CIE & Technical Committee ISO/TC 274, 2020). El iluminante estándar CIE D50 toma como promedio el espectro de un cuerpo negro radiante de incandescencia a 5000 K, simulando el sol de mediodía. El iluminante estándar CIE D65, toma como referencia la luz de medio día en el norte y oeste de Europa y se aproxima a una temperatura de color de 6500 K.

Al respecto del uso simultáneo de dos o más fuentes de luz con diferente temperatura de color, Lam nos advierte que la mente responde negativamente al uso inconsistente de diferentes fuentes de luz sin justificación aparente, sin embargo, existe una respuesta positiva si ayuda a diferenciar elementos en el campo visual ya que sirve de orientación y añade información útil en el campo visual. Si se utilizan fuentes de luz con diferente temperatura de color el efecto no será perturbador si son utilizados para iluminar diferentes tipos de objetos y superficies. Según Lam, la única situación

en la que se justifique el uso de dos fuentes de luz con diferente temperatura de color será cuando en la misma superficie se discriminen áreas con información visual distinta para el observador.

En diversos manuales de luminotécnica, la temperatura de color es un aspecto más a considerar dentro de varios otros relacionados al diseño de la luz. De la publicación de IESNA (Rea, 2000) y ERCO (Hofmann & Ganslandt, 1992) se extraen los parámetros a considerar en el diseño lumínico:

- Niveles de luz
- Contrastes de luminancias
- Deslumbramiento
- Tiempo de adaptación visual
- Temperatura de color y color de la luz
- Índice de rendimiento de color
- Contrastes de color
- Direccionalidad (luz general, de tareas, de acento)

La combinación de estos parámetros no está establecida y depende de los criterios del diseñador lumínico, cuyo fin último debe ser un balance entre la correcta visión para desarrollar las actividades y la satisfacción del usuario final del espacio. Si bien la evidencia científica apunta que el uso de una determinada temperatura de color en el diseño lumínico no tiene una repercusión en la valoración subjetiva del espacio, las características cromáticas de la luz sí tienen incidencia en la percepción adecuada de los colores. Además, nuevos estudios señalan que también repercuten en el desempeño de ciertas actividades. El estudio de Grupo Prilux e International School San Patricio Toledo utilizando la tecnología White Adaptive System (WAS) ha demostrado que el cambio de temperatura de color afecta el desempeño de los alumnos (CEI & Prilux, 2019). En la investigación se concluye que las altas temperaturas de color favorecen la concentración en corto plazo; la luz neutra facilita la lectura y escritura que requiere un tiempo más prolongado; y la luz cálida induce a la relajación. En relación a la concentración, durante la elaboración del presente trabajo se elaboró un estudio en bibliotecas universitarias y comunitarias, concluyendo que los espacios dirigidos principalmente al estudio presentan un contraste de luminancia de 10 a 1 destacando la superficie de trabajo sobre el entorno, mientras que en los espacios con menor concentración en el estudio, la relación entre luminancias es inversamente proporcional ya que permite hacer un registro constante del entorno que rodea al usuario. ¿Acaso en entornos de baja intensidad lumínica el uso de diferentes temperaturas de color, junto al contraste de luminancias, puede tener un beneficio en la percepción de la escena visual del observador? Para dar respuesta a esta pregunta es necesario un nuevo estudio pormenorizado de aquellos espacios, que debido a los objetos y/o las actividades que allí se realizan, requieren reducir los niveles de iluminación. Museos, balnearios urbanos, galerías de arte, instalaciones artísticas y restaurantes, servirán de punto de partida para observar, analizar y evaluar la manera en que la luz y sus características acompañan el propósito del diseño.

Este trabajo busca reflexionar acerca de las condiciones en el diseño lumínico que nos permita andar, ver y pensar dentro de un entorno íntimo y domesticado por la luz. Como hemos visto en la revisión de la literatura, cuando las componentes del recorrido y la baja intensidad lumínica son requerimientos en el diseño lumínico, es necesario reformular la combinación de los parámetros. Por ello, la presente tesis implica un aporte de innovación en el estudio del diseño lumínico.

1.5 Estructura del trabajo.

El trabajo se estructura en cinco capítulos. Esta organización va a permitir sintetizar cada uno de los aspectos abordados: la introducción o planteamiento de la tesis, el marco teórico, la investigación, el análisis de los resultados y las conclusiones.

El primer capítulo, la introducción, presenta la definición de la tesis. Este capítulo permite entender lo que motivó a empezar con este trabajo, la idea que se propone evaluar y la finalidad de la investigación. Además, se busca hacer una explicación concisa de lo estudiado alrededor del tema hasta la actualidad y establecer un orden de toda la información presentada. Por tanto, se encuentra dividido en cinco partes: justificación, hipótesis, objetivos, estado del arte y estructura del trabajo.

El segundo capítulo reúne los componentes del diseño lumínico. Este capítulo se divide en cinco secciones: las fuentes de luz, los objetos iluminados, el observador, los parámetros y las estrategias del diseño lumínico. La primera sección se enfoca en las características de la luz y en la manera en que se mide; la segunda sección abarca los aspectos relacionados a la interacción entre la luz y la materia; la tercera sección comprende los aspectos fisiológicos relacionados a la visión; la cuarta sección define los parámetros del diseño lumínico; y, en la quinta sección se combinan estos parámetros para formular las estrategias a utilizar en el diseño lumínico. Para desarrollar este capítulo y entender los factores que intervienen en el proceso visual, la consulta de diferentes fuentes bibliográficas ha sido fundamental. Por un lado, se estudia la óptica para entender tanto las propiedades de la luz como también su comportamiento con la materia y la retina. Por otro lado, se identifican los parámetros del diseño que son producto de la interacción de la luz con la materia y/o con el ojo. Estos parámetros son el nivel de luz, el contraste de luminancias, el deslumbramiento, el contraste de color, el color de la luz, el índice de rendimiento de color, el tiempo de adaptación a la oscuridad e incluso la direccionalidad y distribución de las fuentes de luz. Además, abordaremos la combinación de los parámetros antes mencionados en los espacios de alta y baja intensidad lumínica. Aquí intentaremos diferenciar entre las prioridades que toman cada uno de estos parámetros según el nivel de luz del espacio.

El tercer capítulo, la investigación, consiste en la aplicación de los aspectos teóricos revisados en el capítulo anterior a casos de estudio concretos. Este apartado se divide en dos secciones referidas a la técnica empleada en cada uno de los casos de estudio. En la primera sección se explica de manera detallada la metodología utilizada en esta tesis. En la segunda sección se detallan los cinco casos de estudio desde los criterios de elección hasta los resultados.

En el cuarto capítulo se hace un análisis de los resultados obtenidos. Este capítulo lo dividimos en dos partes: la primera permite hacer reflexiones acerca de cada caso de estudio; mientras que la segunda integra los casos de estudio para leer los resultados de manera transversal.

Por último, en el quinto capítulo hallamos las conclusiones extraídas de los casos estudiados y el análisis de los resultados que puede ser aplicado a cualquier espacio de baja intensidad lumínica.

Además, encontramos la bibliografía consultada para elaborar cada uno de los capítulos, la lista de imágenes y los anexos, con los datos completos obtenidos de cada uno de los casos de estudio.

Capítulo 2: LA LUZ Y EL DISEÑO LUMÍNICO: El marco teórico



Figura 2. Yad Vashem - Centro Mundial de Conmemoración de la Shoá. Moshe Safdie. 2005.
<https://www.yadvashem.org/es/museum.html>

“Lo que nosotros recordamos normalmente no es la propia fuente de luz, sino las superficies sobre las que esta incide”.

Charles Moore (1977)

2.1 Fuentes de luz.

Principios.

Hasta inicios de siglo XX el comportamiento de la luz se explicaba como una onda electromagnética que se desplaza a 300 000 km/s. Actualmente es aceptado por la ciencia que la luz tiene un comportamiento ondulatorio y corpuscular, lo que ha permitido abrir nuevas líneas de investigación en la física cuántica (Coaton & Marsden, 1997). Para los fines que nos ocupan en el presente trabajo hablaremos de la luz como una forma de energía llamada radiación electromagnética. Una determinada porción de está radiación, que varía entre 380 y 780 nanómetros, es capaz de estimular la retina del ojo humano y generar la visión, también llamado espectro de la luz visible. Este espectro puede ser dividido en ocho partes que corresponde con un color (Feijó, 1994), según la siguiente relación:

- 630 a 780 mμ / Rojo
- 590 a 630 mμ / Naranja
- 560 a 590 mμ / Amarillo
- 530 a 560 mμ / Amarillo verde
- 490 a 530 mμ / Verde
- 440 a 490 mμ / Azul
- 380 a 440 mμ / Violeta

La longitud de onda más larga en el espectro visible corresponde con el color rojo mientras que la más corta con el color violeta. Cuando se sobrepasa los límites del espectro visible nos encontramos con las radiaciones infrarrojas por un lado y las ultravioletas por el otro. Desde luego no es casual que nuestro ojo sea más sensible al rango del espectro visible, en donde también se encuentra la máxima radiación proveniente del sol, debido a una adaptación de millones de años a la luz solar.

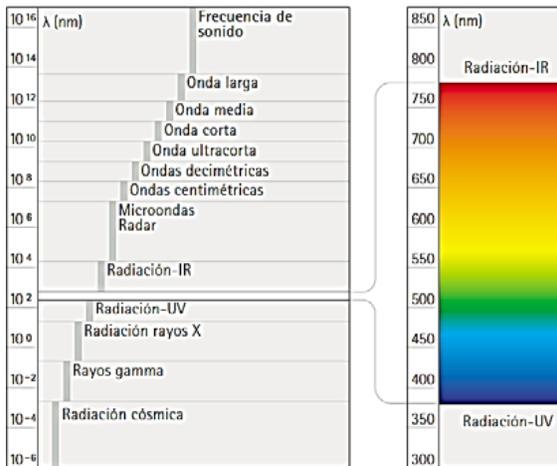


Figura 3. Tipos de onda. Hofmann & Ganslandt. 1992. <https://download.erco.com/en/media/handbook>

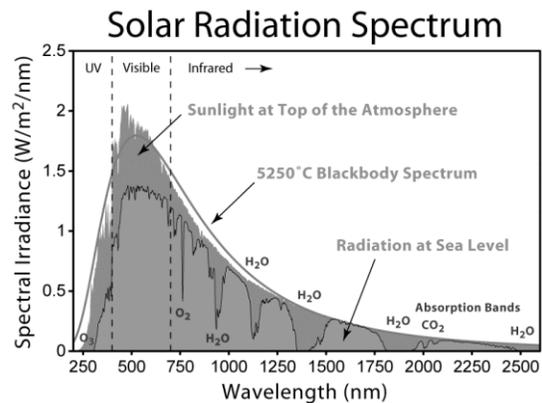


Figura 4. Espectro de radiación solar. Aemet 2018. https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/531_radiacion-solar

Magnitudes.

Una de las características más importantes de la radiación luminosa es que se puede cuantificar. Según sea el caso de la materia en estudio conviene utilizar diversos conceptos relacionados a la luz. Para evaluar la luz es necesaria medirla y para ello hay cuatro unidades fotométricas fundamentales. En el diseño lumínico se prefieren las unidades fotométricas ya que aporta información específica de la energía en el espectro visible. Sin embargo, cabe destacar que estas cuatro unidades fotométricas se corresponden con cuatro unidades radiométricas.

Unidades fotométricas / Unidades radiométricas

Flujo luminoso / *Flujo radiante*

Intensidad luminosa / *Intensidad radiante*

Iluminancia / *Irradiancia*

Luminancia / *Radiancia*

El flujo luminoso (ϕ) es la potencia radiante emitida por una fuente de energía y se mide en lumen (lm). Como dice (Feijó, 1994), "Lumen que tiene una definición práctica como el flujo luminoso emitido en un ángulo sólido de un estereorradián por una intensidad luminosa de una candela". Si el flujo luminoso es multiplicado por el tiempo que permanece en acción obtenemos la cantidad de luz ($Q=\phi.t$), es decir, el caudal de radiación electromagnética en la unidad de tiempo, que es útil, por ejemplo, cuando estamos evaluando el consumo energético.

La intensidad luminosa (I) mide la cantidad de energía que va en una dirección determinada, lo que implica conocer el diagrama polar o también conocida como curva fotométrica de una luminaria. Esta segunda unidad se define como la relación entre la cantidad de luz emitida de una fuente luminosa por unidad de tiempo y el ángulo sólido (ω) en el que se emite ($I=\phi/\omega$), expresado en candelas. La candela se remonta a una definición del siglo XIX como la intensidad que emite una vela.

La iluminancia (E) o nivel de iluminación es el resultado de dividir el flujo luminoso entre la superficie sobre la que incide ($E=\phi/S$). Esta unidad sirve para saber cuánta energía está llegando a una superficie determinada y se mide en lux (lx). Un lux se define como la iluminación de una superficie de un metro cuadrado que recibe un flujo luminoso de un lumen. Esta magnitud suele ser de mayor interés para los productores de lámparas ya que se utiliza en las etapas previas a la ejecución de un proyecto, lo que ha repercutido en que la normativa que regula la iluminación considere equivocadamente sólo estos valores para evaluar el confort visual.

La luminancia (L) es la relación entre la intensidad luminosa aparente de una superficie o una fuente de luz y la unidad de superficie de la misma. En otras palabras, es la intensidad aparente de una superficie o una fuente de luz. Su unidad correspondiente al Sistema Internacional es la candela por metro cuadrado (cd/m^2), sin embargo, la luminancia también ha sido expresada en otros valores como lambert (L), apostilib (abs) y el nit (nt). Esta unidad es muy importante en nuestro estudio puesto que nos proporciona información sobre la magnitud de luz que recibe de las superficies, nuestro sentido de la vista, dependiendo de su materialidad, color e inclinación con respecto a la fuente de luz.

Leyes.

Para entender los fenómenos alrededor de la luz, es preciso comentar una la ley fundamental que se refiere a la relación entre la dirección de luz, la intensidad y la distancia. La ley establece que: *“El nivel de iluminación sobre una superficie iluminada perpendicularmente es directamente proporcional a la intensidad luminosa en esa misma dirección, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separa a la fuente de luz”* (Martín, 2007).

De esta ley se desprenden tres leyes que nos servirán para entender cómo afecta la luz en la arquitectura.

La primera, la ley inversa del cuadrado de la distancia tiene dos acepciones:

“La iluminancia es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente luminosa y la superficie a iluminar”. (Feijó, 1994)

“La Iluminancia de un punto de un plano ortogonal a la línea que une el punto y la fuente, es directamente proporcional a la intensidad luminosa, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa”. (Feijó, 1994)

La segunda, la ley de la iluminancia horizontal y vertical, se desprende de la anterior y nos da a conocer que la iluminancia en un plano horizontal o vertical es proporcional al coseno o al seno, respectivamente, del ángulo de incidencia. Para visualizarlo se muestra los siguientes gráficos:

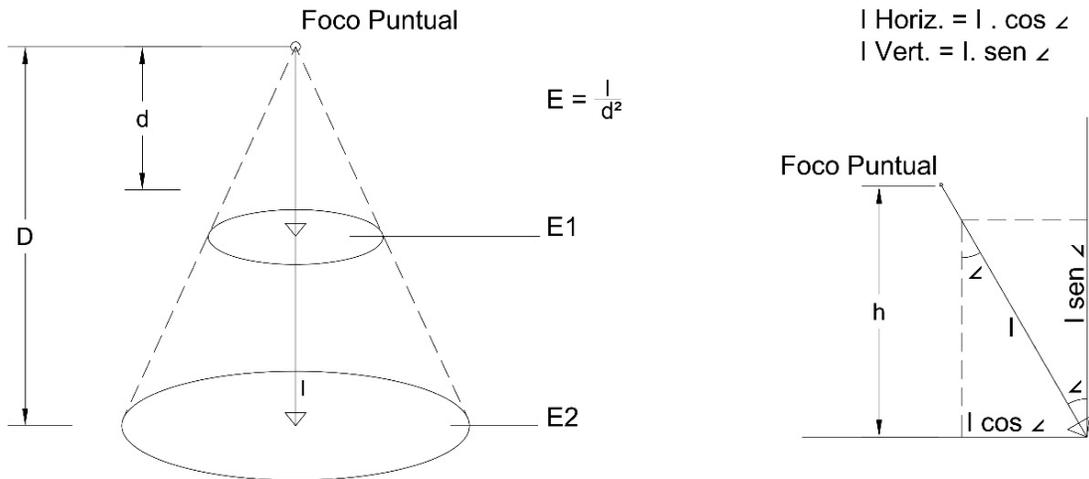


Figura 5. Ley de la inversa de los cuadrados y Ley de iluminancia horizontal. y vertical. Feijó, J. 1994. Ed. U. de Valladolid.

La tercera, la ley de Lambert ha sido definida como: “La luminancia de una superficie luminosa, considerada como un punto, es constante en cualquier dirección que se considere” (Martín, 2007). La luminancia reflejada en superficies está condicionada a dos variables y una constante: el nivel de iluminación, las propiedades reflectantes de la superficie y la posición del observador con respecto a la superficie. La fórmula que relaciona iluminancia y luminancia, útil en Luminotecnia, es:

$$L = (E \cdot r) / \pi$$

en donde E es la iluminancia que recibe la superficie, r es el coeficiente de reflexión del material y π representa la superficie aparente de la fuente luminosa.

Rendimiento luminoso.

Se denomina así a la relación entre la luz producida y la energía eléctrica que se necesita para producirla. Para calcularlo es necesario hallar al cociente del flujo luminoso entre la energía requerida por ese flujo. Cuanto más alto sea el valor del cociente, más eficiente será la fuente de luz. El rendimiento luminoso es conocido también como eficacia luminosa (Morente & Garcia, 2012).

$$\eta = \phi / P$$

Donde: η es el rendimiento luminoso, ϕ es el flujo luminoso medido en lumen y P es la potencia eléctrica de la lámpara, cuya unidad es el watio. El resultado es lm/W.

El rendimiento luminoso indica la eficacia de una lámpara y depende del espectro electromagnético de dicha lámpara y de la manera de obtener la luz. Si la lampara emite energía en diferentes longitudes incluso fuera del espectro visible, entonces la lámpara es menos rentable.

Teóricamente una lámpara con eficacia luminosa máxima sería aquella cuyo espectro luminoso emitiera todas las radiaciones en una longitud de onda monocromática de 555nm. En ese caso el factor de eficacia sería 1 y el rendimiento luminoso 683 lm/w. Sin embargo, esto no es posible porque todas las fuentes de luz tienen pérdidas por calor y radiaciones invisibles; por tanto, el rendimiento también es menor.

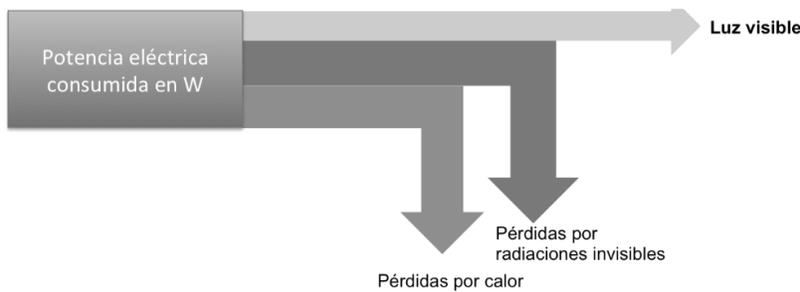


Figura 6.. Eficacia luminosa. Morente & García. 2012. U. Politécnica de Catalunya. <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-fuentesDeLuz.php>

Al comparar la rentabilidad entre los distintos tipos de las lámparas observamos que las incandescentes son las que menos eficacia tienen ya que rondan los 20 lm/W, las fluorescentes oscilan los 95 lm/W, las de vapor de sodio a baja presión alcanzan los 130 lm/W (Martín, 2007). En el caso de las luminarias de LED el rendimiento está alrededor de los 100 lm/W, sin embargo la comparación con otras fuentes de luz es menos inmediata ya que el flujo luminoso del LED es direccional mientras que en las otras fuentes el flujo va en distintas direcciones (Philips, 2021).

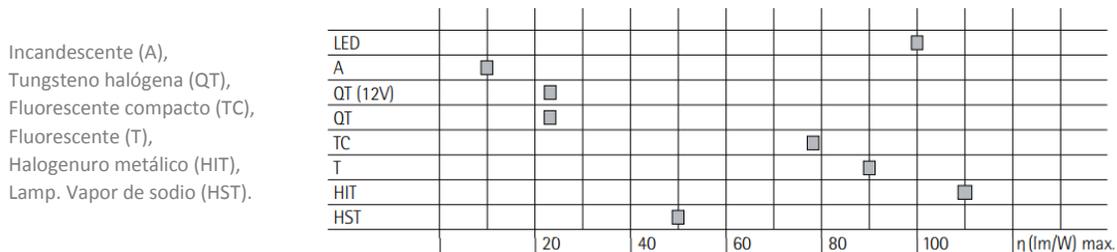


Figura 7. Eficacia luminosa por tipo de lámpara. Hofmann & Ganslandt. 1992. ERCO. <https://download.erco.com/en/media/handbook>

Curvas fotométricas.

Las curvas de distribución luminosa o curvas fotométricas consisten en un diagrama polar que representa el reparto del flujo luminoso para cada dirección de luz. La intensidad luminosa ha sido descrita anteriormente refiriéndose a una lámpara sin obstrucciones, sin embargo, el soporte o la cubierta propia de la lámpara e incluso la luminaria que contiene la lámpara puede modificar la manera en que se distribuye la luz. Por ello, en determinados proyectos es conveniente utilizar las lámparas unidas a las luminarias con las que el fabricante ha definido la curva fotométrica ya que usando luminarias diferentes el diagrama polar estaría alterado.

El goniofotómetro sirve para hacer las mediciones de intensidad luminosa de una fuente de luz ya que permite girar en las tres direcciones. La representación de los datos obtenidos puede estar reflejado de diferentes formas: tablas fotométricas, sistema de coordenadas, diagrama polar o curva fotométrica, curvas isolux, curvas de factor de utilización, conos de iluminancia y diagramas de deslumbramiento.

La curva fotométrica es un gráfico bidimensional que representa una sección de la distribución de luz que pasa por el eje vertical de la lámpara. Si se hace el ejercicio de unir las curvas fotométricas por cada dirección perpendicular al eje vertical de la lámpara podremos construir un sólido fotométrico. El volumen obtenido representa el valor del flujo luminoso emitido por la lámpara. En el caso de que la curva fotométrica es igual en todos los planos verticales se llama simétrica y se representa sólo por una curva. En el caso de que la distribución luminosa cambie entre los diferentes planos verticales, se llama asimétrica y se suele graficar dos curvas, en el plano longitudinal y transversal, salvo que la intensidad máxima no esté contenida en ninguno de ellos, entonces se añade una tercera curva del plano que la contiene (De las Casas, González, & Puente, 1991).

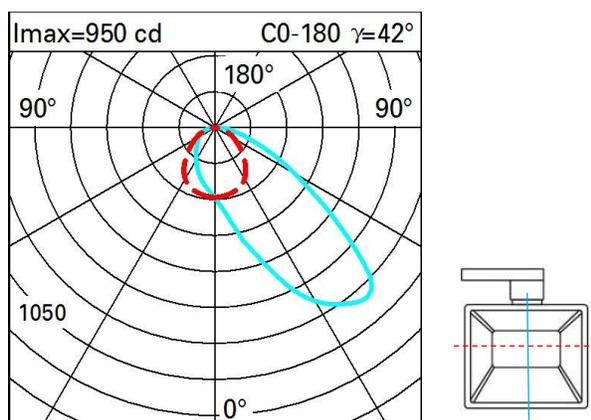


Figura 8. Curva fotométrica. IGUZZINI. 2021. <https://www.iguzzini.com/es/p646/>

Los valores que se aprecian en los diagramas polares son intensidades luminosas en candelas referidas a un flujo de 1000 lúmenes, es decir, los valores se dan en cd/klm. De esta manera los valores pueden ser comparados entre lámparas con distintas intensidades. Para poder saber la intensidad real en cada dirección debe de multiplicarse el flujo luminoso de la lámpara por el valor que indica el diagrama polar.

$$I_{\text{real}} = \phi \cdot I_{\text{grafico}} / 1000 \text{ lm}$$

Distribución espectral de la energía radiante.

El espectro electromagnético es el conjunto de frecuencias que contiene una radiación. La distribución espectral es la manera en la que está repartida la energía en el rango de frecuencias y esta puede ser discreta o continua.

La radiación de espectro continuo corresponde a la luz del día normal y las lámparas incandescentes.

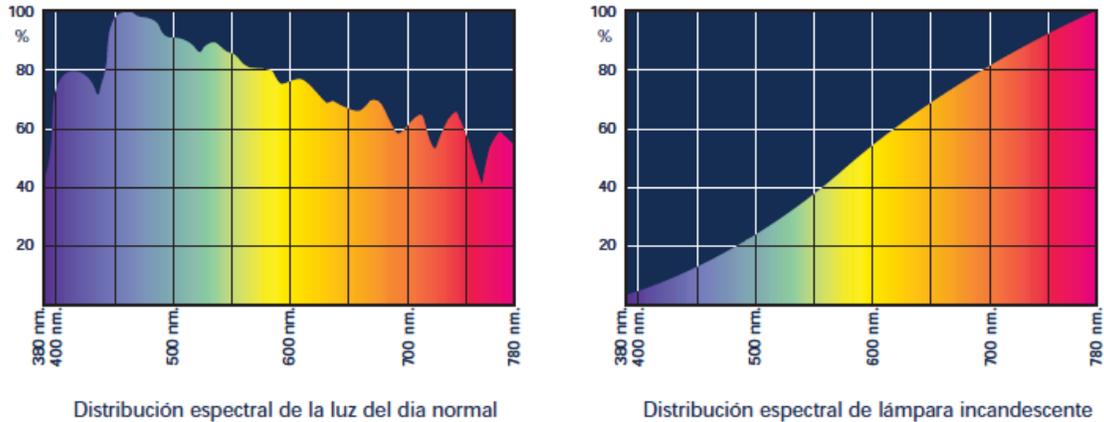


Figura 9. Radiación en el espectro continuo. Blasco, P. 2016. U. Politécnica de Valencia.

La radiación de espectro discreto corresponde a las lámparas de descarga gaseosa

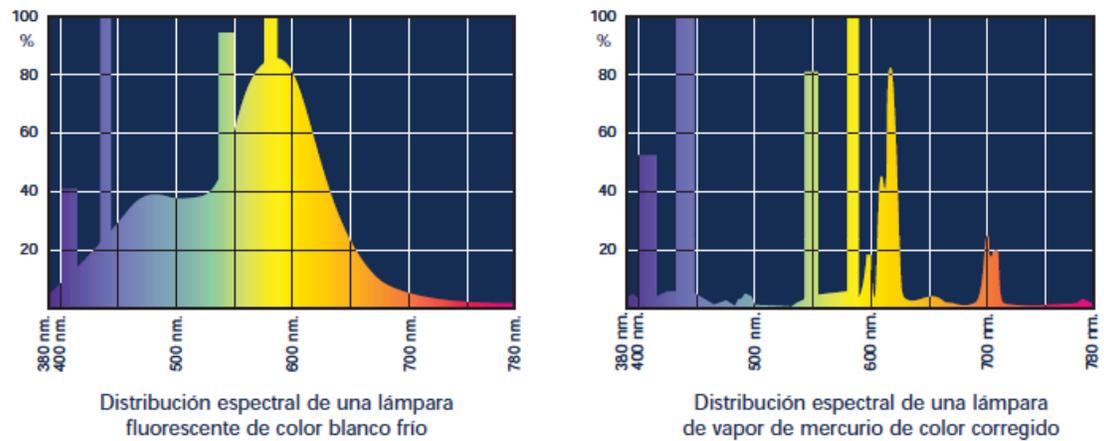


Figura 10. Radiación en el espectro discreto. Blasco, P. 2016. U. Politécnica de Valencia

Si todas las ondas que componen una luz tuvieran la misma frecuencia se llamaría luz monocromática, mientras que si las ondas cubren todo el espectro de la luz visible y ninguna frecuencia predomina por su intensidad entonces se llamaría luz de espectro equienergético, que sería de color blanco. La luz blanca, en términos generales, ocurre cuando la energía radiante comprendida aproximadamente entre los 380 nm y los 780 nm están actuando simultáneamente sobre todos nuestros fotorreceptores.

Existen tantas fuentes luminosas con diferente distribución espectral que la CIE ha desarrollado los iluminantes estándares para poder referenciar los diferentes tipos de reparto de la energía radiante. Los iluminantes estándar están normalizados con un valor de 0 a 1. Los más difundidos son:

El iluminante A representa la bombilla incandescente de filamento de tungsteno cuya distribución espectral es similar a la de un cuerpo negro a temperatura aproximada de 2856 K. La serie de iluminantes D corresponde a la luz del sol de medio día. El D50 tiene la temperatura de color de 5000 K, mientras que el D65 es de 6500 K ya que se simula un cielo parcialmente nublado. El iluminante E con radiación de espectro equienergético es teórico y útil en colorimetría. Los iluminantes de la serie F son útiles para estandarizar las lámparas fluorescentes.

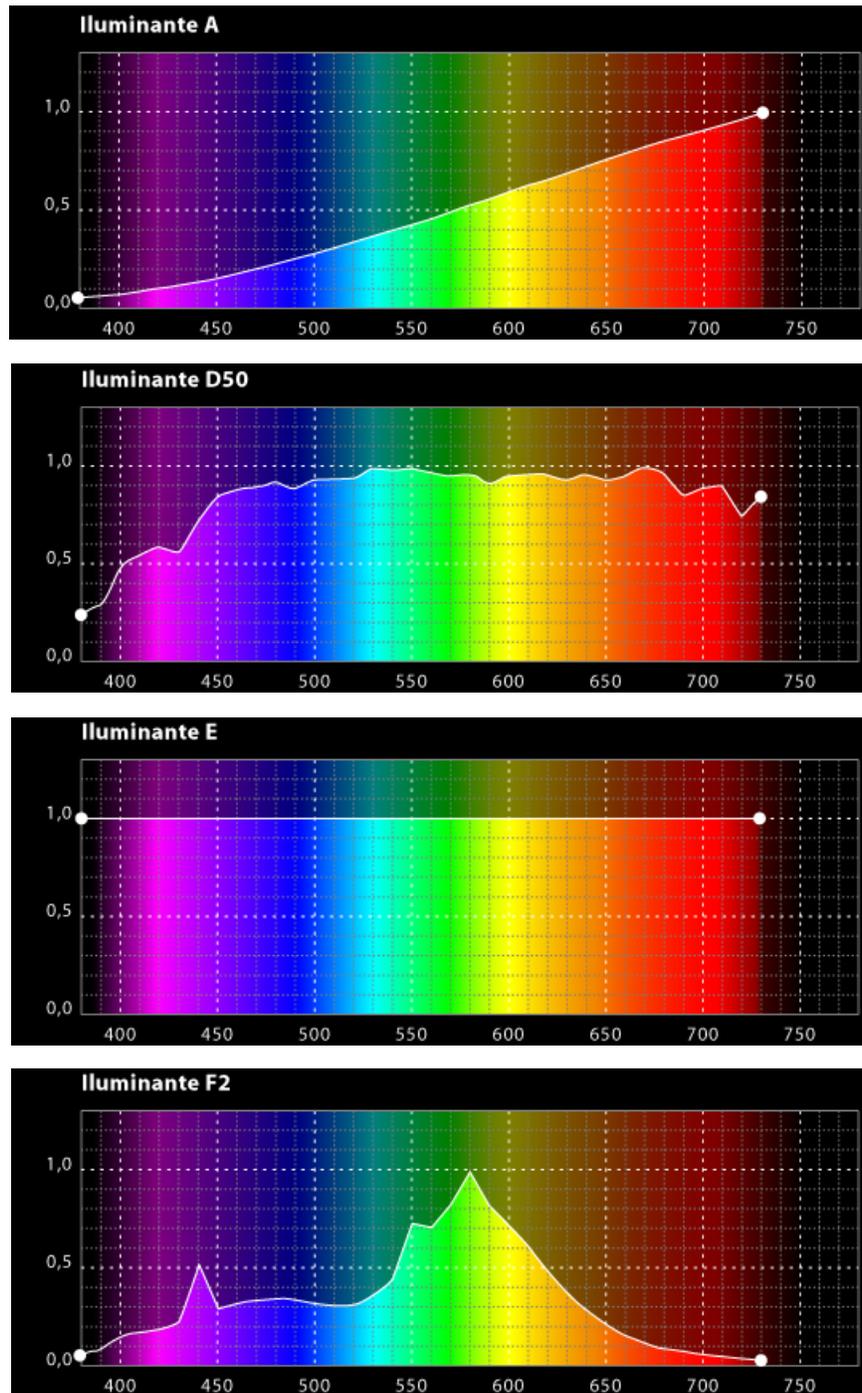


Figura 11. Distribución espectral de iluminantes estándar. ISO/CIE DIS 11664-2:2020(E).



Figura 12. Biblioteca de libros raros y manuscritos de YALE. Gordon Bunshaft. 1963.
https://hmong.es/wiki/Beinecke_Library

“Hace falta que la luz, al esparcirse sobre el conjunto de los cuerpos produzca los efectos más generales, los más sorprendentes, los más variados, los más manipulados. [...] Conformar, en fin, por medio de los materiales que absorban la luz, la imagen oscura de una arquitectura definida por el efecto de la sombra...”

Étienne-Louis Boullée, citado por Muñoz (2012)

2.2 Objetos iluminados.

La reflexión, la absorción y la refracción.

La única forma en la que la luz se manifiesta a los ojos del ser humano es cuando esta interactúa con la materia. La interacción que sucede en el momento en que la luz llega a una superficie es de tres tipos: la reflexión, la absorción y la refracción (Baker, Fanchiotti, & Steemers, 1993).

La reflexión de la luz sobre un cuerpo ocurre cuando este último la repele. El grado de reflexión de un material se mide en porcentaje y varía entre 0 y 100, sin llegar a los extremos del rango. Si el material es muy oscuro quiere decir que absorbe gran parte de la luz y refleja un pequeño porcentaje de ella; mientras que, si el material es claro el porcentaje será alto. Como veremos más adelante, según las irregularidades en el acabado del material la reflexión puede darse de tres maneras diferentes: regular, difusa o mixta. La reflexión regular también se conoce como especular ya que el rayo que incide en la superficie tiene el mismo ángulo y está en el mismo plano del rayo que es reflejado. Este tipo de reflexión se da por ejemplo cuando nos miramos en un espejo. La reflexión difusa ocurre cuando una superficie tiene rugosidades microscópicas que reflejan la luz en diferentes direcciones. Una superficie perfectamente difusa es aquella de apariencia mate, como una hoja en blanco. La reflexión mixta se da cuando la superficie tiene características de las dos anteriores y aunque distribuya la luz en forma difusa se puede apreciar una dirección preferente de la luz reflejada como en el caso de una pintura brillante (Serra & Coch, 1995).



Figura 13. Tipos de reflexión: regular (A), difusa (B) y mixta (C). Monedero, J. 2015. UPC

La absorción de la luz se refiere a la energía que llega a un cuerpo y queda atrapada en el propio material para luego dispersarse en forma de calor. Es un fenómeno que ocurre en todos los materiales y puede darse total o parcialmente. Un agujero negro sería un cuerpo completamente absorbente.

La refracción es el fenómeno que se da cuando la luz traspasa un cuerpo. El porcentaje de la energía que es refractado es conocido como transmitancia, si la radiación electromagnética está dentro del espectro visible se denomina transmitancia luminosa y se expresa como porcentaje. La radiación que llega a un cuerpo que tiene la propiedad de transmitir la luz puede continuar su paso de manera regular, difusa o mixta. La transmisión regular es aquella en donde el rayo incidente y el rayo transmitido están en el mismo plano y con el mismo ángulo, aunque con ángulo diferente cuando el rayo se encuentra dentro del cuerpo transparente. El caso que ejemplifica este fenómeno es cuando la luz atraviesa un vidrio. La transmisión difusa se da cuando la radiación que incide sobre un cuerpo es transmitida en todas las direcciones. El estado que ocurre cuando no toda la radiación transmitida se propaga en la misma dirección ni en todas las direcciones se llama transmisión mixta.

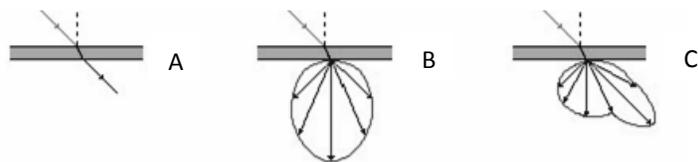


Figura 14. Tipos de transmisión: Regular (A), difusa (B) y mixta (C). Monedero, J. 2015. UPC

La textura, la rugosidad y la opacidad.

La luz tiene un comportamiento diferente según las características físicas de los cuerpos o superficies sobre las que incide. El grado de reflectancia o transmitancia de la luz está vinculado a la textura, la rugosidad, la opacidad y el color de la superficie. A continuación, se explica brevemente los tres primeros ya que el cuarto será desarrollado más adelante con mayor detalle.

La textura de un material normalmente está definida por su propia composición, aunque puede modificarse con procesos mecánicos, y da como resultado la apariencia externa y superficial. El término textura es prestado del mundo textil pero también sirve para designar las variaciones de color que puede darse por variaciones en la estructura o composición del material (Monedero, 2015). Una superficie plana puede tener texturas muy diferentes entre sí, ejemplo de ello en la arquitectura son la madera, la piedra, el metal, entre otros; que pueden tener un acabado especular, pulido o mate. La textura de las superficies son variables en el diseño que afectan directamente el resultado lumínico. En términos generales la textura sirve como un modulador ya que permite redistribuir la luz en todo el espacio y a medida que haya más superficies con diferentes texturas las posibilidades aumentan significativamente. En términos específicos de percepción, Gibson (1974) fue el primero en señalar la importancia de los gradientes de textura en nuestra percepción visual. David Marr, en su libro, sostiene que las texturas aportan información sobre la orientación de la superficie y que nuestro sistema visual interpreta estas líneas como señales generadoras de contorno que pueden ser incluso tridimensionales (Marr, 1982).

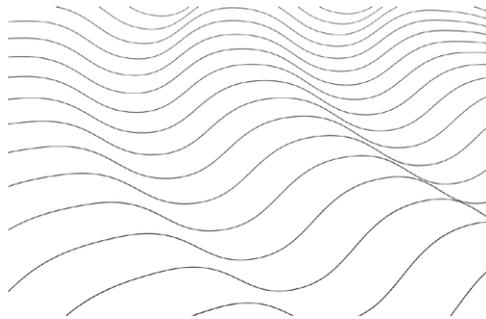


Figura 15. Ondulaciones regulares que se perciben como una superficie tridimensional. Marr. 1982. W.H. Freeman

La rugosidad se puede definir como el conjunto de irregularidades que posee una superficie. Estas irregularidades pueden consistir en errores de forma, pequeñas ondulaciones de la superficie, protuberancias, etc. La rugosidad de un material consiste en la medida de las desviaciones verticales con respecto a la superficie nominal determinada por el fabricante y se puede medir a nivel microscópico (Folguera & Muros, 2013). La unidad de medida de la rugosidad, según el sistema internacional, es la micra que equivale a la milésima parte de un milímetro. Sin embargo, la rugosidad de un material puede llegar a ser tan alta que incluso puede generar relieves lo cual importa en el diseño lumínico ya que generan sombras en la propia superficie.

La opacidad es una propiedad que se refiere al grado en que el material impide el paso de la luz. Si un material no deja pasar la luz en absoluto se dice que es opaco, en cambio un material es transparente si permite el paso del flujo luminoso; mientras que, cualquier punto intermedio en el que se encuentre la opacidad puede decirse que el material es translúcido. Muchos materiales pueden ser translucidos dependiendo de su grosor o composición, ejemplos de ello son una piedra de alabastro, una hoja de papel o un cuerpo de agua salada.

El color

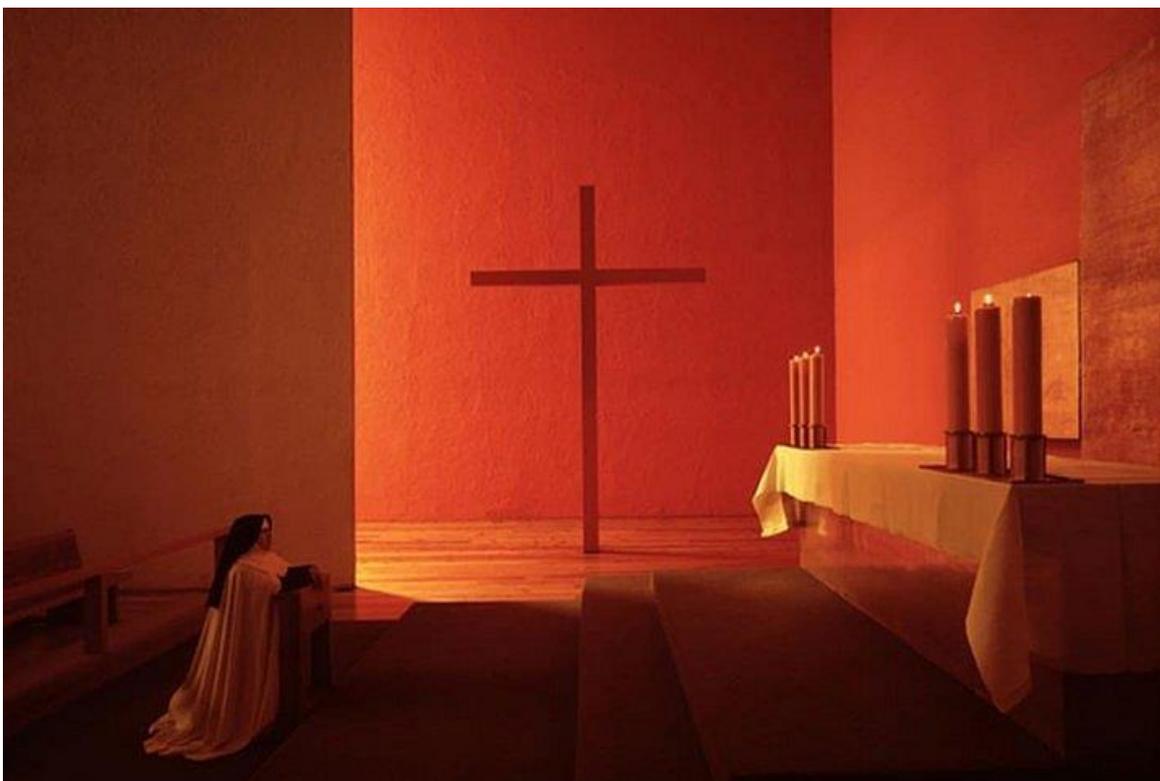


Figura 16. Capilla de las Capuchinas. Luis Barragán, 1953. <https://www.tlalpan.cdmx.gob.mx/capilla-de-las-capuchinas/>

“Dicen los filósofos que nada puede verse que no esté revestido de luz y color. Es que entre los colores y las luces hay un gran parentesco, que nos hace ver. Su importancia la comprendemos por el hecho de que, si la luz muere, igualmente mueren los colores, y cuando la luz retorna, los colores se restablecen a la vez que la fuerza de las luces” (Alberti, 1435).

“Ningún objeto emana un color siempre igual a sí mismo en el transcurso de un día. La oscuridad hace desaparecer los colores porque el color es luz. La luz da a cada objeto su color; por eso, el color constituye una herramienta para proyectar”. Mario Nani citado por Zabalbeascoa (2011).

“Las causas del color son muy diversas, pero todas ellas tienen un mismo origen: es la existencia de electrones en la materia con sus variadas respuestas a las diferentes longitudes de onda de luz, lo que hace que el mundo sea multicolor” (Nassau, 2002).

Definir el color en términos absolutos puede ser una tarea difícil ya que es el resultado de una serie de características físicas de los materiales y de la luz, que luego son interpretados por nuestro cerebro. Según Mankhe (1996) en el color percibido de un objeto intervienen factores como: las características de los objetos, las características del entorno, las características de la luz, la dirección del observador y la propia adaptación del observador. Sin embargo, es consensuado que el color propio se define como las longitudes de onda electromagnéticas reflejadas por una superficie cuando se ilumina con un material que calentado a una determinada temperatura empieza a emitir energía luminosa, llamado fuente de luz patrón.

Evolución histórica de la teoría de los colores.

Siglo XVIII.

Newton fue el primero en revelar los diferentes componentes espectrales de la luz. Aplicando sus conocimientos en física, geometría y mecánica, Newton ideó un experimento en el cual un rayo de luz incide en un prisma transparente y se refracta de manera que al traspasar se pueden observar todos los colores de la luz. El hallazgo fue detalladamente explicado y divulgado en su libro *Óptica*, aunque en el primer gráfico de distribución espectral indicaba que el factor de pureza variaba de 0.8 a 1 más tarde perfeccionaría sus experimentos concluyendo que este factor era igual a 1 en todos los colores (Newton, 1704). La teoría de Newton permitió empezar a estudiar el color desde una perspectiva cuantificable y abrió paso a la colorimetría. Entre sus esquemas más difundidos fue el paso de una disposición lineal de los colores a una circular, conocido como el círculo cromático.

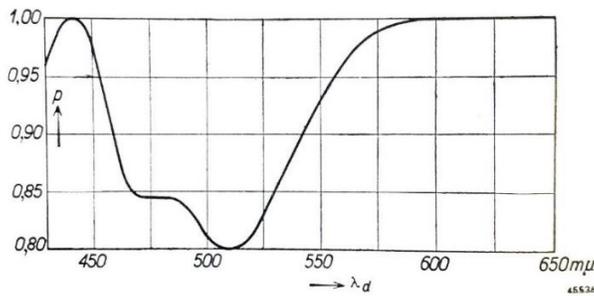


Figura 17. Primer espectro de Newton: El factor de pureza p a diversas longitudes de onda dominante. Bouma.1949.

Siglo XIX.

Un siglo después, el escritor y pintor, Goethe rebate los fundamentos de la teoría de color de Newton y sostiene que los colores no son los componentes de la luz, sino que son el resultado de la interacción entre lo claro de la luz y lo oscuro de la sombra. Los puntos de partida son completamente diferentes, mientras que para Newton los colores existen independientemente del observador, Goethe coloca la percepción del hombre en el centro de la problemática. El aporte fundamental de Goethe en su libro *Teoría de los colores* es el concepto de los colores marginales que aparecen como franjas de colores en el límite entre la luz y la sombra (Von Goethe, 1810).

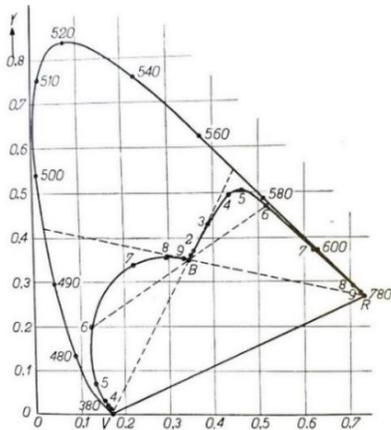


Figura 18. Colores marginales del 1 al 10 en curva VB. Bouma. 1949. NV Philips' Gloeilampenfabrieken.

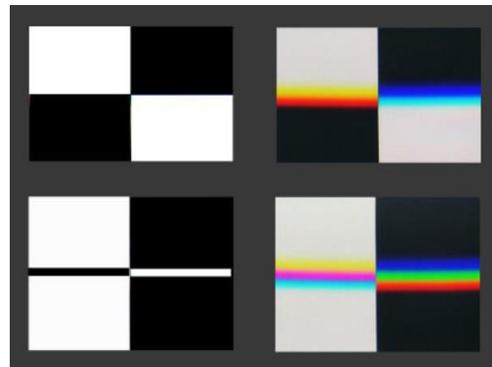


Figura 19. Superficies blancas y negras a través de un prisma de vidrio. Arriba se identifican los colores cálidos y fríos. Abajo el cian, magenta y amarillo, junto al rojo, verde y azul. Pehr Sällström. 2017. www.astrofriend.eu

En 1801 Thomas Young realiza el experimento de la doble rendija en donde comprobó patrones de interferencia en el comportamiento, corpuscular y ondulatorio, en la luz. Este es el experimento es más célebre del científico ya que abrió paso para explicar posteriormente la doble naturaleza de la luz. En paralelo desarrolló la teoría de la visión del color en donde postula que el ojo tiene tres órganos fotosensibles diferentes. Medio siglo más tarde la teoría sería retomada y desarrollada por Helmholtz, por tanto, conocida como la teoría de Young – Helmholtz. El estudio de Helmholtz y König sobre la discromasia le permitió a Helmholtz desarrollar la teoría tricromática para la visión normal, bajo el fundamento de la existencia de tres tipos de fibras en el nervio óptico postulado por Young. Luego, Helmholtz utilizó el estudio para investigar sobre la fatiga visual, la adaptación al color de la luz, etc. Sin embargo, se le atribuye a König el reconocimiento de cuantificar la sensibilidad de cada uno de los tipos de conos que permiten la visión de los colores.

Un siglo después del postulado de Newton, Grassmann va a consolidar el inicio de teoría del color ya que fue el primero en hacer una calibración del espectro, su trabajo consistió en cuantificar la cantidad de luz que le permitiera reproducir otros colores con diferentes longitudes de onda. Años más tarde, en 1860, Maxwell desarrollaría las teorías de Grassmann utilizando como colores básicos de la luz los de longitud de onda 631nm, 529nm y 457nm; es decir, rojo, azul y verde para la mezcla aditiva de colores. Los resultados de Maxwell junto a las leyes de Grassmann permitieron conocer las combinaciones de coeficientes tricromáticos necesarias para reproducir todos los colores. Sin embargo, la potencia representada para cada uno de los colores fue imprecisa y quedó más o menos olvidada en favor de las medidas mucho más completas y precisas de König (Bouma, 1949).

SIGLO XX.

La colorimetría, la disciplina que cuantifica los colores, empieza a desarrollarse a finales del siglo XIX con el aporte de Maxwell sobre la combinación de colores de luz. La mezcla tricromática define que cualquier color puede ser reproducido por una mezcla de no más de tres colores de luz. Estas mezclas pueden ser combinación de diferentes colores primarios que dan como resultado los colores secundarios. Las mezclas tricromáticas pueden ser aditiva o sustractiva.

La mezcla aditiva se llama así por el proceso de mezclar haces de luz monocromáticos para producir un nuevo color de luz. Los tres colores de luz primarios son rojo, verde y azul. Si se proyectan estos tres haces de luz sobre una superficie blanca se observa que en la zona donde los tres colores se mezclan dan como resultado el blanco; en cambio, en la superposición de dos colores primarios se produce el color secundario; y, en donde sólo hay un haz de luz monocromático queda el color primario. La mezcla de un color secundario con un primario se llama color terciario. Los colores secundarios tienen mayor luminancia que los primarios ya que se trata de la suma de dos radiaciones, de igual forma sucede con la suma de tres radiaciones. Las relaciones aditivas, en la mezcla de colores, están sujetas a las condiciones de visualización.

La mezcla sustractiva se refiere a un haz de luz blanco, como la luz solar, sometido a un filtro que sustrae longitudes de onda. El filtro, según el tipo de material, puede permitir la reflectancia o la transmitancia de la luz. En caso de ocurrir la reflectancia el material absorbe algunas longitudes de onda y refleja otras, dando como resultado el color sustractivo. En caso de ocurrir la transmitancia el material que se interpone al paso de la luz dejará pasar las longitudes de onda que corresponden con el mismo color del material. Si utilizamos filtros de color cian, magenta y amarillo observamos que en la zona en donde los tres filtros se superponen el paso de la luz queda completamente

bloqueado; en la zona en donde los filtros cian y magenta se superponen permiten el paso de la luz de color azul; la combinación de los filtros magenta y amarillo dan como resultado el color rojo; y, de la unión de los filtros cian y amarillo se produce el verde. Las luminancias de los colores obtenidos por sustracción tienen menor valor que los colores que los generaron.

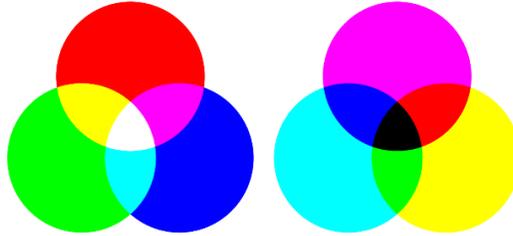


Figura 20. Mezcla aditiva (izquierda) y mezcla sustractiva (derecha). Lima, A. 2010. Editora Ciência Moderna.

El sistema RGB lleva las siglas en inglés de los tres colores primarios en la mezcla aditiva (red, green, blue). Es un sistema capaz de reproducir cualquier color mediante la graduación de intensidad de los tres colores. La intensidad de cada color se mide en la escala de 0 a 255 bits. En la mezcla para obtener cualquier color encontraremos un valor para cada color primario, por ejemplo, el rojo tiene un valor de 255, 0, 0. La deficiencia de este sistema es que los valores RGB pueden variar considerablemente dependiendo del dispositivo que se utilice ya que no se define que tono de rojo, verde o azul será el asignado como el 255.

En el siglo XX Wilhelm Ostwald estudió el color como fenómeno físico y químico lo que le permitió elaborar otra teoría del color. Ostwald postuló cuatro colores primarios: rojo, verde, azul y amarillo; además, de dos gamas de colores acromáticas intermedios. Aún hoy el modelo de organización y clasificación cromática de Ostwald es uno de los más usados. El modelo consiste en un doble cono con una base única. Sobre la circunferencia común a ambos conos están situados los 24 tonos que, desde el amarillo, pasando por el rojo, el violeta y el azul conducen al verde, volviendo otra vez al amarillo. En la repartición de los 24 tonos se aprecia una simetría que fue explicada, por primera vez, como la separación entre los colores en fríos y cálidos.

En 1915 Henry Munsell, pintor y profesor de arte, dio a conocer el sistema de color Munsell con la publicación de su libro. El sistema permite ordenar los colores en tres ejes: tono, saturación y valor. En el eje del tono se considera diez matices que a su vez se subdividen en otros diez matices, el eje de la saturación tiene un máximo de doce escalas y el eje del valor comprende valores del 0 al 10.

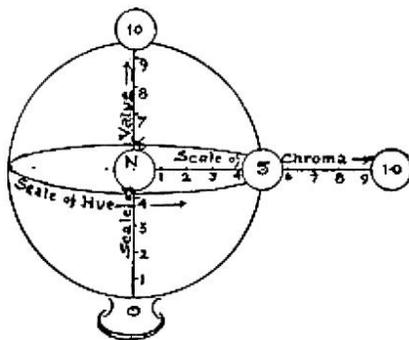


Figura 21. Esfera de color. Munsell.1915. Wadsworth, Howland & Co., Inc

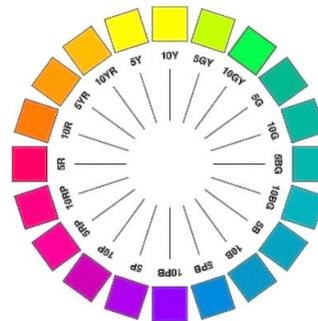


Figura 22. Sección de la esfera con 20 tonos. Munsell. 1915. Wadsworth, Howland & Co., Inc

El tono o matiz corresponde con las longitudes de onda que son reflejadas por una superficie. El tono permite distinguir o agrupar los colores; por ejemplo, el azul será fácil de diferenciar del naranja por ser de matices complementarios, mientras que el carmín y el rosa son próximos con respecto al tono.

La saturación o intensidad de un color depende de la mayor o menor cantidad de gris que contenga. La mayor saturación se da cuando el tono es más puro; por ejemplo, la sangre es de un color rojo saturado, mientras que los colores pasteles son menos intensos.

El valor o luminosidad se refiere a la capacidad de reflejar la luz. Un color cuyo tono contenga más blanco será más luminoso y, por el contrario, si contiene más negro tendrá un valor menor. La escala de valores empieza en cero con el color negro y termina en diez con el blanco, entre ellos hay nueve valores que corresponde con la cantidad de graduaciones de luminosidad que el ser humano es capaz de distinguir.

“A veces confundidos, otras veces contrapuestos, el color y la luz se estudian siempre juntos” (Roque, 2002).

Agrupación de los colores.

El círculo cromático es un diagrama que reúne y simplifica los colores del espectro visible. En este diagrama se suele identificar los grupos de colores primarios, secundarios y terciarios. Además, los colores se pueden agrupar ya sea por semejanza o contraste con diferentes criterios, como son: Análogos, aquellos que están próximos entre sí y conforman una gama. Complementarios, se refiere a la pareja de color primario con su color opuesto secundario. Adyacentes, es un dúo formado por los dos colores adyacentes a un complementario. Luminosos, son aquellos que reflejan más luz, siendo el amarillo el más luminoso. Oscuros, al contrario de los luminosos, la gama del violeta son los más oscuros. Cálidos, son todos los colores que están entre el amarillo y el morado. Fríos, son los que están en el lado opuesto a los cálidos, es decir, del verde al violeta.

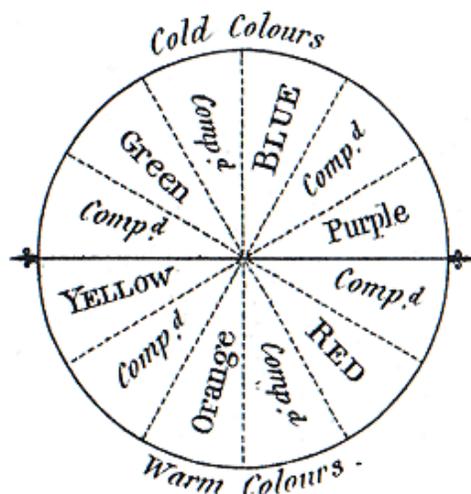


Figura 23. El primer diagrama de colores cálidos y fríos. Hayter, C. 1813. <http://www.handprint.com/HP/WCL/color12.html#colorlight>

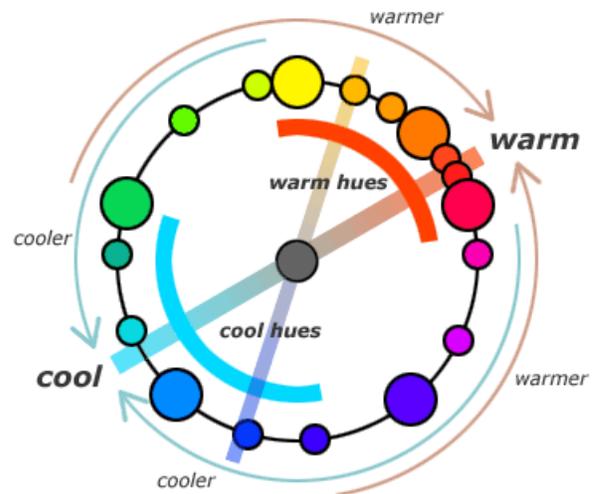


Figura 24. Colores cálidos y fríos en el círculo cromáticos. Bruce MacEvoy. 2021 <http://www.handprint.com/HP/WCL/color12.html#colorlight>

Diagrama cromático CIE.

En el sistema de la CIE los colores se clasifican según la composición espectral de la luz emitida por una fuente. Este sistema, basado en la mezcla tricromática, define cualquier color por medio de coordenadas de cromaticidad (x, y, z). Las tres coordenadas corresponden con gamas de color rojo, verde y azul. La construcción del sistema CIE se basa en la longitud de onda, la pureza de excitación y la intensidad luminosa. Cada una de estas variables se toman en cuenta para elegir convenientemente tres colores que permiten reproducir cualquier otro color según la mezcla aditiva. El espacio cromático parte de un sistema ortogonal que luego es acotado para ubicar los colores fundamentales con longitud de onda 700nm, 546.1nm y 435.8nm (rojo, verde, azul).

Los colores del espectro visible constituyen una superficie de cono que se encuentra contenido en un triángulo equilátero cuyo centro se sitúa en el color blanco. El triángulo definido por los tres ejes puede ser representado como tres tipos de triángulo rectángulo, sin embargo, por razones de practicidad el triángulo rectángulo, con ejes (x, y) ha sido el más difundido por la CIE.

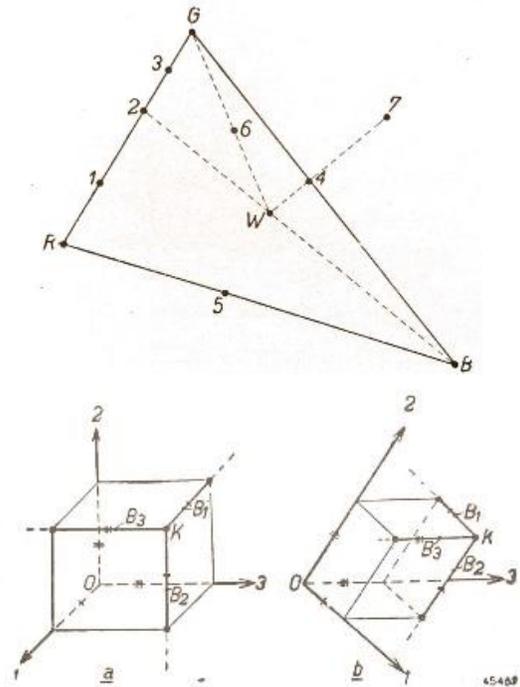


Fig. 10

Représentation d'une couleur par un point K de l'espace, se trouvant aux distances B_1 , B_2 et B_3 des plans des coordonnées. a) Système orthogonal. b) Système oblique (les axes O_1 , O_2 et O_3 forment entre eux des angles égaux).

Figura 25. El espacio cromático de la forma más simple (p.76). Bouma. 1949. NV Philips' Gloeilampenfabrieken.

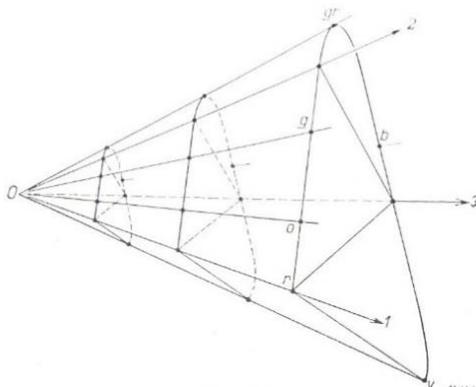


Fig. 12

Espace chromatique obtenu à l'aide des couleurs fondamentales spectrales avec $\lambda = 700, 546,1$ et $435,8 \text{ m}\mu$. Les couleurs spectrales constituent une surface de cône qui contient aussi les axes O_1 , O_2 et O_3 et qui coupe le plan de section à droite suivant la courbe r, o, g, gr, b, v. Le plan rOv contient les pourpres saturés (g = jaune, gr = vert).

Figura 26. El espacio cromático tridimensional (p.93). Bouma. 1949. NV Philips' Gloeilampenfabrieken.

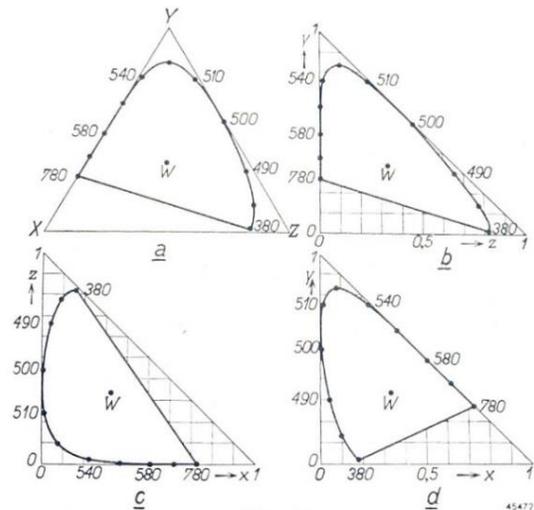


Fig. 22

Triangles des couleurs déduits du système XYZ. a) équilatéral; b à d) rectangles.

Figura 27. Triángulos cromáticos deducidos del sistema XYZ: equilátero y rectángulos (p.95). Bouma.1949. NV Philips' Gloeilampenfabrieken.

La representación bidimensional del diagrama de cromaticidad se hace dentro del triángulo tricromático. El perímetro de la figura corresponde con cada una de las radiaciones monocromáticas del espectro visible. Hacia el interior de la figura observamos que los colores van perdiendo saturación y aumentando luminosidad hasta llegar al color blanco, que representa la suma aditiva de los colores del espectro. Si se unen dos puntos de la curva perimetral que pasen por el punto blanco, se pueden determinar dos colores que sean complementarios. Sobre la zona de color blanco se distingue que pasa la llamada curva de Planck; sin embargo, la curva se extiende desde los tonos azulados hasta los rojizos. La curva representa los colores que emite un cuerpo negro calentado de 800 K hasta 24 000 K; y, por tanto, cada uno de los puntos de esta curva equivalen a un valor en la escala de temperaturas aparentes. Del mismo modo, cada punto dentro del diagrama de cromaticidad corresponde a un color determinado que bastará con dos coordenadas (x, y) para definirlo.

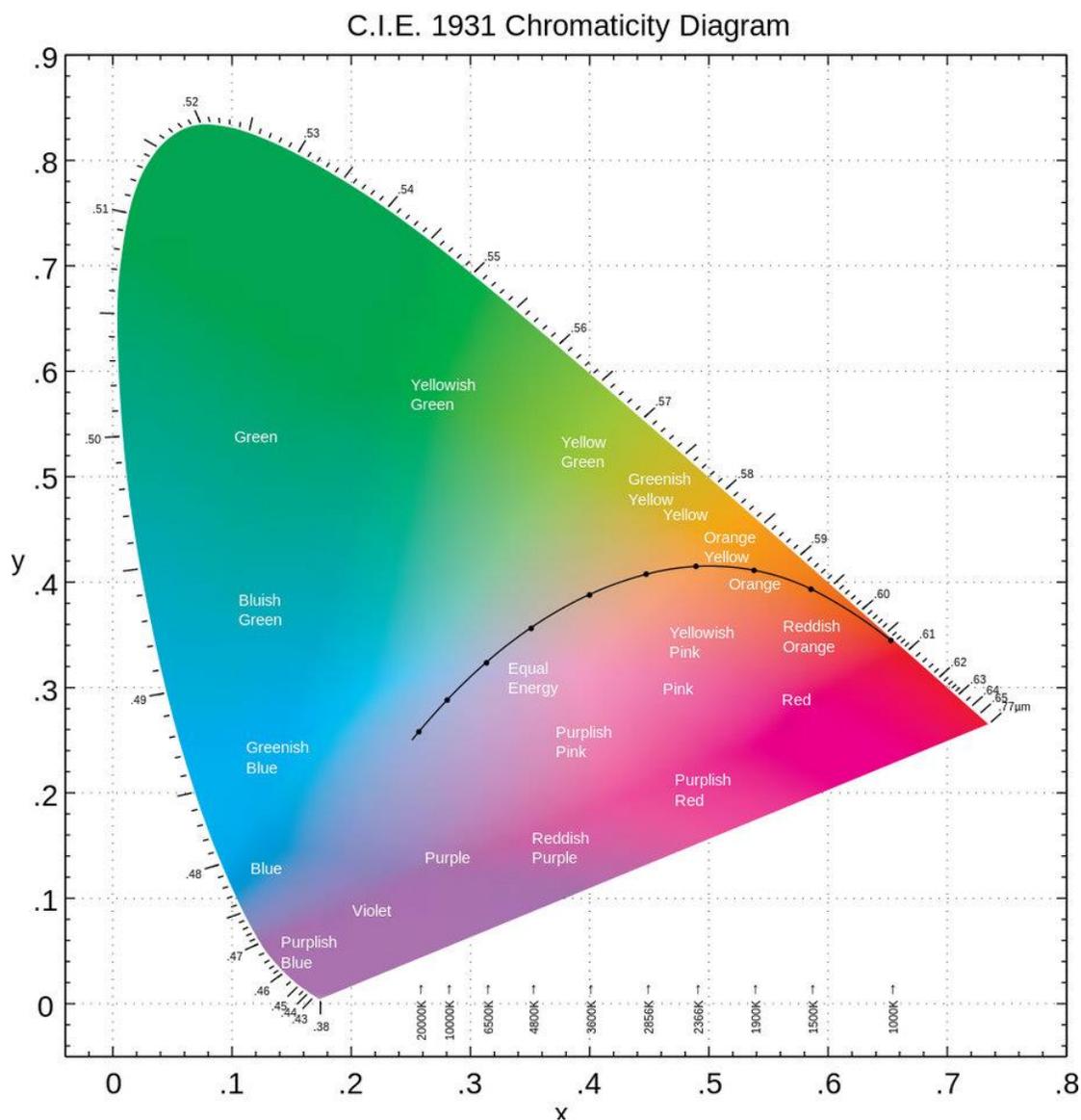


Figura 28. Diagrama cromático CIE con curva de colores equivalentes a diferentes temperaturas de color de luz. HiSoUR. 2021. <https://www.hisour.com/es/cie-1931-color-space-24840/>



Figura 29. *Songeuse devant la cheminée*. Marcel Rieder. 1932. https://en.wikipedia.org/wiki/Marcel_Rieder

“Hay una diferencia entre visión y visión [...]; los ojos del espíritu tienen que trabajar en constante y viva alianza con los ojos del cuerpo, porque de lo contrario se corre el riesgo de ver y sin embargo pasar por alto.”

J.W. von Goethe, citado por Bortoft, Naydler, & Fortea (2002).

2.3 Observador.

La visión.

Conocer las características fisiológicas del ojo en el ser humano, junto a las características de la luz y el objeto, es fundamental para entender el proceso visual. Partimos de que la luz ingresa al ojo a través de la pupila que cambia de diámetro, entre 2mm y 8mm, dependiendo del nivel de luz exterior. Una vez que la luz llega al interior del ojo se imprime una imagen invertida en la retina, tal y como sucede con las cámaras fotográficas. La retina es la capa interna que contiene más de cien millones de terminaciones nerviosas sensibles a la luz que llevan la información hasta el cerebro. Las células fotorreceptoras que se encuentran en la retina se excitan y envían la información visual, a través de las neuronas intermedias, a las células ganglionares las cuales derivan la información visual y no visual al cerebro. Las células fotorreceptoras llamadas conos, son las responsables de la visión fotópica; los bastones rigen la visión escotópica; y, por último, los ipRGCs permiten regular el ritmo circadiano, dilatar la pupila e influir en la función visual (Kawasaki & Kardon, 2007).

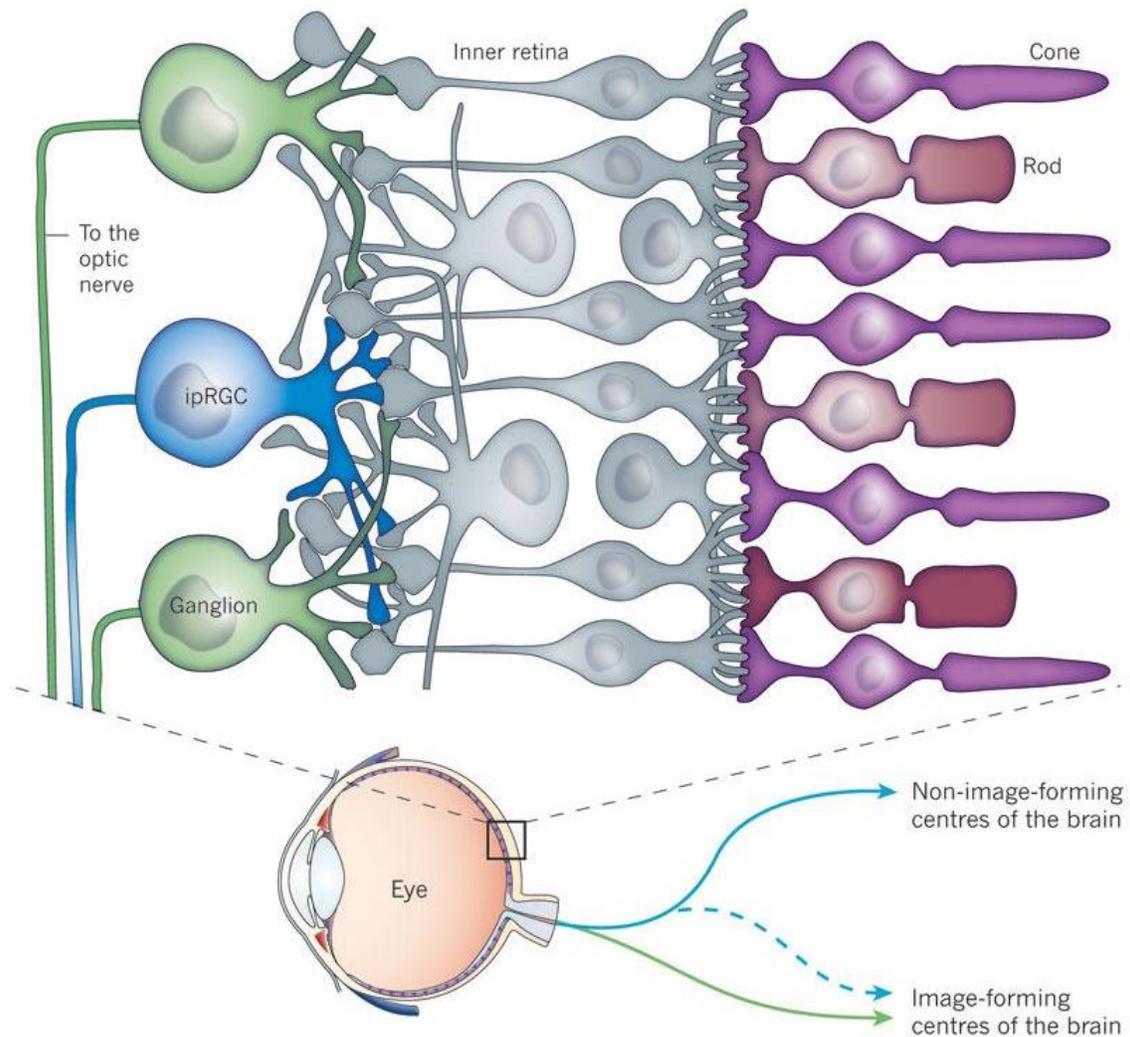


Figura 30. Seeing without seeing: *Light in layers* Vol. 469 (p.285). Corie Lok. 2011. *Nature*.

Si examinamos la distribución de conos y bastones dentro de la capa de la retina podemos observar que no es uniforme. En primer lugar, destaca que existe una pequeña zona llamada el punto ciego, la unión entre el nervio óptico y la retina, en donde no hay conos ni bastones. En segundo lugar, en la parte central encontramos la fovea en donde está el punto focal de la imagen proyectada sobre la retina. En la fovea se concentran la mayor cantidad de los conos cuya densidad se reduce significativamente en la periferia, contrario a lo que sucede en la repartición de los bastones. Existen alrededor de 7 millones conos y 130 millones de bastones repartidos como muestra el gráfico.

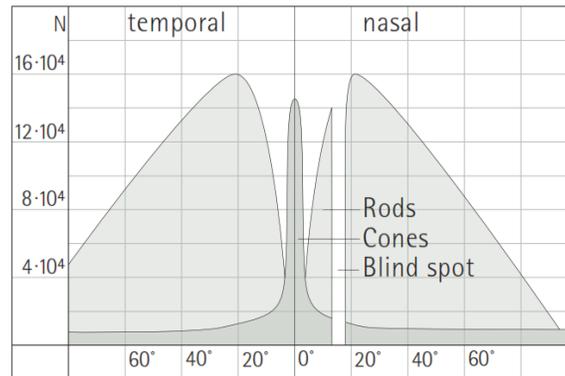


Figura 31. Número de bastones y conos en la retina en relación al ángulo de visión. Hofmann & Ganslandt. 1992. ERCO. <https://download.erco.com/en/media/handbook>

La visión fotópica ocurre por el estímulo de la luz de alta intensidad en los conos de la retina. Los conos, que se encuentran principalmente en la fovea, son los fotorreceptores con mayor agudeza visual y, por tanto, son los encargados de ver el color, las texturas y los detalles. Según Weigel (1973), los conos de la retina, se empiezan a activar cuando el promedio de luminancias en el campo visual está por encima de 0.003 cd/m^2 ; mientras que diferentes autores prefieren indicar que la visión fotópica tiene el punto de partida en 0.1 cd/m^2 y está guiada sólo por los conos cuando es superior a 10 cd/m^2 (Hofmann & Ganslandt, 1992). En cuanto a los valores máximos de luminancias que depende de estado de adaptación de la vista, Weigel afirma que el límite siempre es el deslumbramiento y, por ejemplo, ocurre al ver un papel blanco a $31\,830 \text{ cd/m}^2$ en condiciones de cielo despejado a medio día de verano en latitudes tropicales; otros autores se limitan a indicar que el valor absoluto de deslumbramiento es $100\,000 \text{ cd/m}^2$. En cuanto al color, Coch explica que la mayor sensibilidad de los conos se da con el color amarillo verdoso, específicamente a los 555 nm (Serra & Coch, 1995). Esto puede ser debido a un instinto de supervivencia del ser humano ya que corresponde con el color de los primeros frutos.

La visión escotópica guiada por los bastones de la retina se activa cuando el nivel de luz es bajo. Los autores antes mencionados no difieren mucho entre sí al afirmar que la visión escotópica comienza aproximadamente cuando las luminancias están por encima de 10^{-6} cd/m^2 ; y, están activos hasta que las luminancias alcanzan entre 3 y 10 cd/m^2 . Los bastones no discriminan los colores, dejando la visibilidad en tonos de grises, pero son rápidos y sensitivos para identificar los contrastes de luminancias. Además, los objetos son vistos fácilmente en la periferia del campo visual ya que los bastones se hallan mayormente en la periferia de la retina. La mayor sensibilidad de los bastones se encuentra a 507 nm ; es decir, corresponde al color verde azulado del espectro visible.

La visión mesópica, un estadio intermedio entre los dos tipos de visión anteriores, se considera cuando las luminancias están entre 0.1 cd/m² y 10 cd/m² según Hofmann & Ganslandt, o incluso con un rango más amplio de 0.003 cd/m² a 3 cd/m², según Weigel. Este tipo de visión, con ambos fotorreceptores activados, permite que tanto la visión central como la visión periférica tengan la misma jerarquía, es decir, disminuye la agudeza visual pero aumenta la percepción del entorno. De igual modo se reduce el contraste por color y aumenta la sensibilidad de luminancias, aunque el contraste de luminancias debe ser más alto para ser percibido. Además, se empiezan a apreciar algunos colores más que otros debido al cambio en la luminosidad relativa del color. El cambio de sensibilidad entre la visión escotópica y fotópica se da en la visión mesópica, este efecto fue definido por Purkinje quien desarrolló el gráfico de curvas de sensibilidad a la luz, como se observa en la figura 34.

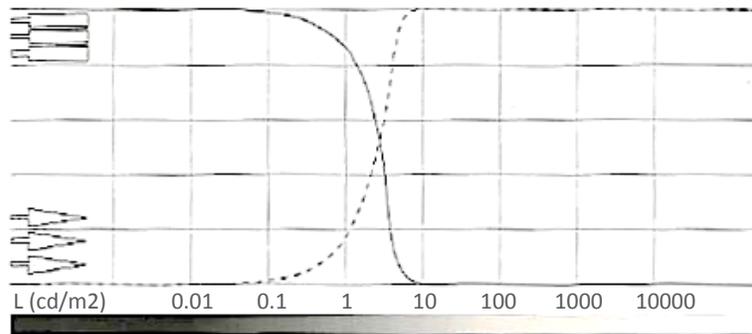
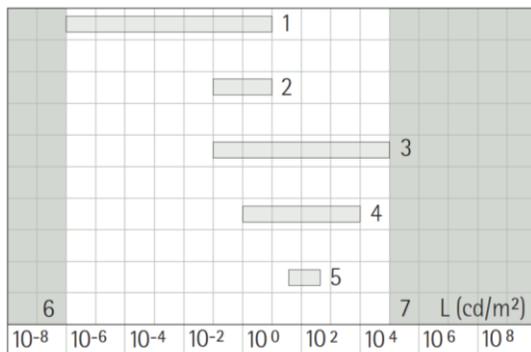


Figura 32. Respuesta a la luz por tipo de receptor. Brandt, U. 2006. Birkhäuser.



- (1) Visión escotópica.
- (2) Visión mesópica.
- (3) Visión fotópica.
- (4) L predominante en interiores.
- (5) L promedio en interiores.
- (6) Umbral de visión.
- (7) Umbral de deslumbramiento absoluto.

Figura 33. Rangos de luminancias. Hofmann & Ganslandt. 1992. ERCO.
<https://download.erco.com/en/media/handbook>

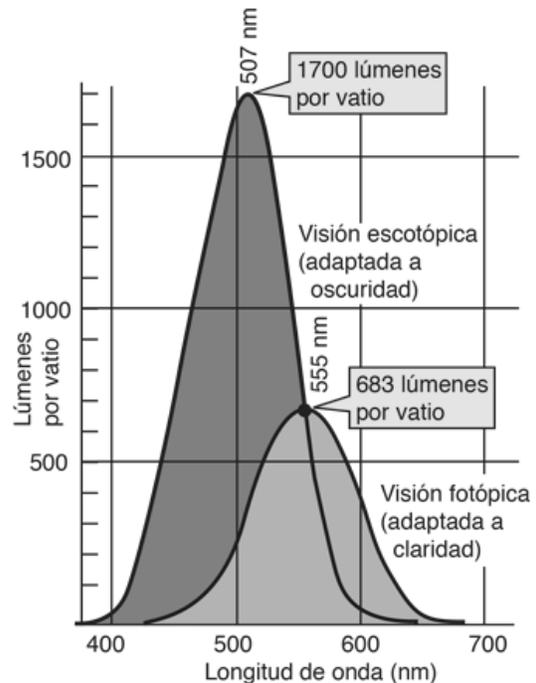


Figura 34. Curva de eficacia luminosa espectral de la visión escotópica y fotópica. Beaulieu, Olmo y Nave. 2010. Hyperphysics. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/vision/bright.html>

El campo visual.

La fisonomía del cuerpo humano define el campo visual. El ojo por sí solo proyecta un cono de 180°, sin embargo, es modificado por la anatomía de nuestra nariz y las cejas reduciéndose a 150° en sentido vertical. Además, con el efecto de superposición del campo visual monocular de cada ojo, tenemos como resultado el campo binocular, usado en el diseño arquitectónico, cuya amplitud es mayor a 180° en horizontal y de alrededor de 60° en vertical. Como lo indica Lou Michael, el campo visual es útil para analizar o resolver situaciones en donde la escena es estática, sin embargo, en la realidad todas las escenas se deben de ensamblar para conformar lo que él llama “visual world”.

El campo visual se divide en dos zonas según las características visuales: la visión central y periférica. La primera se refiere al ángulo de visión en el que enfocamos las cosas. Esta zona abarca 30° por lado desde el eje de visión y se divide en visión foveal y visión perifoveal. El campo de la visión foveal es extremadamente estrecho, la agudeza visual cae en un 50% a tan sólo a 1° fuera del centro del eje y a partir de 8°, en la visión perifoveal, queda el 15% de precisión con respecto al punto central. La segunda, la visión periférica, corresponde a todo el campo visual descrito anteriormente exceptuando la zona de la visión central (Moreland & Cruz, 1959).

La visión central enfoca lo que desea ver con detenimiento, sin embargo, un cambio significativo en el campo de nuestra visión periférica es causante de la distracción visual. Cuando el foco de atención de nuestra visión central es interrumpido por algo que se advierte en nuestra visión periférica, instintivamente, cambiamos nuestro enfoque para escanear lo que ha ocurrido y evaluar si es relevante para que nuestras necesidades biológicas se mantengan satisfechas. Si lo que perturba nuestro primer enfoque no representa una amenaza a nuestras necesidades biológicas, entonces lo más probable es que volvamos a enfocarnos en lo que el cerebro estaba procesando. Las distracciones pueden estar causadas por una mancha solar, una luminancia muy fuerte que aparece repentinamente en el campo visual o por un patrón de diseño dominante, el cual demanda nuestra atención.

La visión periférica es la de un observador involucrado en el mundo en el que se mueve ya que relaciona lo que está a nuestro alrededor, lo visible y lo invisible, y lo hace en movimiento (Gibson, 1974). Al respecto Pallasmaa dice: “La visión enfocada nos enfrenta con el mundo mientras que la periférica nos envuelve en la carne del mundo” y añade: “Liberado del deseo implícito de control y de poder del ojo, quizá sea precisamente en la visión desenfocada de nuestro tiempo cuando el ojo será capaz de nuevo de abrir nuevos campos de visión y de pensamiento. La pérdida de foco ocasionada por la corriente de imágenes puede emancipar al ojo de su dominio patriarcal y dar lugar a una mirada participativa y empática”.

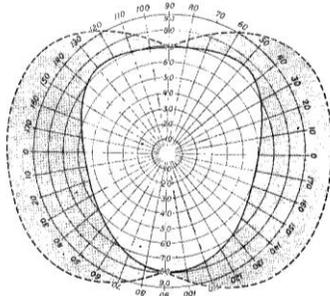


Figura 35. Los campos visuales de cada ojo. Gibson, J. 1974. Ediciones Infinito.

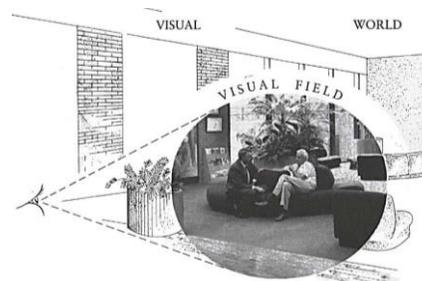


Figura 36. Visual field in the visual world. Michel, L. 1995. John Wiley.

La acomodación y la adaptación del ojo.

El ojo presenta mecanismos de acomodación tanto para la distancia como para el nivel de luz. La acomodación a la distancia es una modificación de la distancia focal o el enfoque. Esta acción permite dar nitidez a la imagen formada en la retina de objetos a diferente distancia del ojo. La acomodación se da gracias al efecto del músculo ciliar que aumenta o disminuye la convexidad del cristalino. Cuando las superficies que deseamos enfocar se encuentran a lo lejos, la cara anterior del cristalino se aplana; mientras que, para situaciones en que el objeto está más cerca ocurre lo contrario, aumenta la curvatura interior del cristalino.

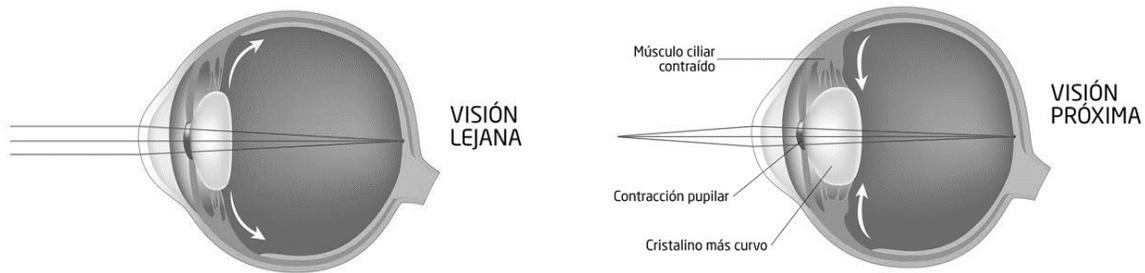


Figura 37. Funciones del cristalino. Rahal. 2022 <https://www.rahhal.com/cristalino-anatomia-funciones-afecciones/>

La acomodación a la luz se conoce como el proceso de adaptación. En primer lugar, la adaptación empieza cuando el iris cumple la función de modificar la apertura del diafragma que permite controlar el ingreso de luz, es decir, el aumento o disminución del diámetro de la pupila para que las células fotosensibles toleren la luz. En segundo lugar, el proceso de adaptación ocurre a nivel celular, los conos y/o los bastones se activan según el nivel de la luz. El cambio de fotorreceptores genera, como ya hemos visto, la visión fotópica, mesópica y escotópica. El tiempo necesario para adaptarse dentro de un entorno muy oscuro a uno muy iluminado tarda pocos segundos y puede extenderse hasta diez minutos para poder estar en pleno uso de la visión fotópica; sin embargo, el proceso de acomodación inverso toma un tiempo mucho mayor. En la adaptación a la oscuridad, durante los primeros minutos, la pupila puede llegar a un aumento relativo del diámetro de 2mm a 9mm en condiciones extremas. Los conos también son capaces de adaptarse hasta un cierto nivel de luz durante los primeros diez minutos, pero son los bastones los que realmente cumplen la función de ver en la oscuridad y pueden tardar hasta cuarenta y cinco minutos en alcanzar la máxima sensibilidad (Wolfe & Ali, 2015). El paso de la luz a la oscuridad lo abordaremos en el siguiente capítulo ya que es de interés en los parámetros a considerar en la práctica arquitectónica.

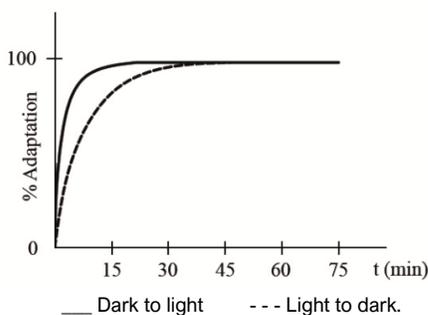


Figura 38. Tiempo de adaptación a la luz. Boix. 2022. https://recursos.citcea.upc.edu/llum/luz_vision/p_visu_al.html

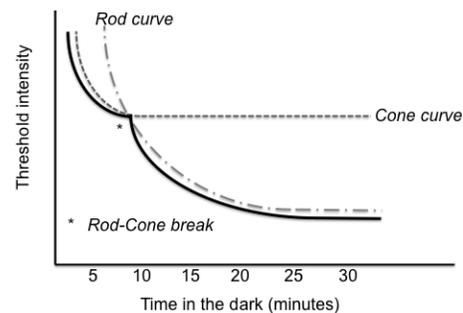


Figura 39. Standard dark adaptation curve. Wolfe & Ali. 2015. <http://www.funjournal.org/wp-content/uploads/2015/09/june-13-59.pdf>

La percepción visual.

La percepción, en ocasiones, es confundida con la sensación y por ello es necesario empezar diferenciándolas. Las imágenes que nuestra vista es capaz de registrar son sensaciones de superficies con diferentes grados de luminosidad que se encuentran en el campo visual (Fotios & Atli, 2012). En cambio, la percepción es el significado que nuestro cerebro va a darle a esas imágenes, es por ello, que las personas son capaces de percibir el mismo entorno de manera distinta. Las imágenes de manera objetiva pueden ser descritas cuantitativamente, sin embargo, integramos esta información con nuestro conocimiento subjetivo de la realidad, el cual nos hace cualificar el medio que nos rodea (Rasmussen, 2012).

El proceso perceptivo está dividido en tres etapas. La primera, la etapa física, es el estímulo exterior que reciben nuestros sentidos. La segunda, la etapa fisiológica, consiste en el envío de señales eléctricas captada por nuestros órganos sensitivos a través de nuestro sistema nervioso hacia el cerebro. La tercera, la etapa psicológica, traduce la información recibida en nuestro cerebro, en este caso las imágenes, para ser ordenadas, clasificadas e interpretadas según las experiencias pasadas (Serra & Coch, 1995). Los mismos autores, clasifican los objetos de tres maneras: neutros, dominados y dominantes, según el grado de influencia en la persona. Los primeros son los que no ejercen ninguna influencia en el hombre, los segundos son aquellos que conocemos y no significan ningún peligro; mientras que, los terceros representan una amenaza ya que no los podemos controlar. Los espacios neutros son ideales para actividades de concentración ya que la atención se va hacia los objetos que estamos observando. Los espacios dominados son inocuos a la percepción ya que en ellos se encuentran los objetos que ya hemos analizado en el pasado. Los espacios dominantes colocan al hombre en un estado de alarma ya que debe de aprender a reconocer los objetos rápidamente para descartar una situación de peligro.

Como vemos, la percepción visual es un sofisticado proceso que constantemente está en marcha contrastando si la información visual que recibe el cerebro forma parte de la memoria inconsciente, es decir, se le puede asignar una interpretación previa o pertenece a un nuevo grupo que debe ser analizado con mayor detalle (Lam, 1986). El cerebro no actúa de forma pasiva al recibir la información, debe seleccionar entre los innumerables estímulos que llegan por los sentidos y decidir cuáles son de utilidad para realizar la actividad que se requiere (Custers, de Kort, IJsselsteijn, & de Kruiff, 2010). Por esta razón, distinguir cuales son los estímulos repetitivos es necesario para agruparlos y atribuirles un significado. Según Serra y Coch (1995) la agrupación de elementos es propia de la percepción visual y puede ser dividida entre factores constantes o variables. Por un lado, los factores constantes se identifican por características de proximidad, semejanza o dirección. Por otro lado, los factores variables son los que se agrupan considerando las interacciones dinámicas del entorno, tales como cambio, constancia y fluctuación.

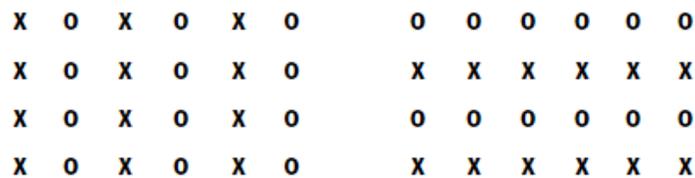


Figura 40. Ley de proximidad, semejanza y dirección. Hothersall. 1997.
<https://viviendolasalud.com/psicologia/psicologia-gestalt-leyes>

La ley de Prägnanz explica la tendencia a simplificar y calificar la información visual que recibimos por medio de la memoria, incluso si existen ambigüedades. La Gestalt postula que la mente organiza la información que recibimos en el cerebro con tendencia a formar buenas formas o contornos, es decir, ordena los elementos siguiendo patrones de simetría, equilibrio y simplicidad. La forma de los objetos, según la Gestalt, se describe como el conjunto de contornos y características relevantes que admite la mejor representación del objeto.



Figura 41. Perro. Hothersall. 1997. Mc Grau Hill.
<https://viviendolasalud.com/psicologia/psicologia-gestalt-leyes>



Figura 42. Suegra/Esposa. Matlin & Foley. 1996.
<https://viviendolasalud.com/psicologia/psicologia-gestalt-leyes>

Desde este punto de vista, el ejercicio mental de ordenar los objetos por sus características físicas como la forma, los contornos, el color, la textura e incluso por la manera en la que se agrupan es parte del proceso racional de atribuir un significado a las cosas. En otras palabras, darle forma a un objeto equivale a darle sentido, por tanto, al entenderlo podemos identificarlo en diferentes contextos y al mismo tiempo diferenciarlo dentro del mismo entorno (Gilberto Leonardo, 2004). En palabras del mismo autor:

“La Gestalt es una teoría encargada de plantear la tendencia de la conciencia a la racionalidad. El fin último y principal labor de la conciencia, es el de traducir las experiencias cotidianas a entidades conceptuales con base en las cuales se pueda seguir adelantando un proceso de abstracción.”

Gibson (1974) por su parte, en su obra sobre la percepción, hace hincapié en la diferenciación entre el campo visual y el mundo visual, vinculando al primero con la sensación y al segundo con la percepción. Gibson hace un estudio profundo de la óptica y la psicología, concluyendo que la orientación del ser humano, en el mundo visual, es la suma ordenada de diversos campos visuales y que la luz, junto a la sombra, es el factor común que ayuda a entender la relación entre la sensación y la percepción:

“La correspondencia entre el campo visual y la imagen retiniana total constituye una correspondencia anatómica punto por punto que no es difícil de entender. La correspondencia entre el mundo visual y la imagen retiniana total constituye una correspondencia ordinal que resulta más difícil de analizar y estudiar. Pero esta última correspondencia no es menos literal y exacta, según cabe pensar, que la anterior y está claro que el modo de determinarla consiste en encontrar las oscuras variaciones de la imagen proyectada que dan variaciones coordinadas en la percepción.”

El confort visual.

El confort desde el punto de vista lumínico precisa cubrir diferentes aspectos físicos, fisiológicos y psicológicos en el ser humano. Para abordar este complejo tema es necesario hacer un repaso de la historia y de la arquitectura para referirnos a los conceptos de sensación y percepción vistos en el apartado anterior (Ruggiero, Serra, & Dimundo, 2009). La sensación de ver es posible gracias a la interacción entre la luz, la vista y las superficies, mientras que la forma en que percibimos las cosas y el atributo que le damos está subordinado a las experiencias vividas desde que nacemos (Tregenza & Wilson, 2011). Por ello, el confort visual debe tomar en cuenta tanto los factores cuantitativos (la intensidad de la luz, el color de la luz, el índice de reproducción de color, el deslumbramiento y la adaptación del ojo a las condiciones de luz) como los factores cualitativos, que tienen que ver con un análisis perceptual para lograr satisfacer las necesidades biológicas y los deseos o expectativas de la persona (Cuttle, 2010).

En cuanto a los factores cuantitativos es inevitable empezar por mencionar el gráfico de Kruithof, por ser el primero en relacionar la intensidad y el color de la luz. El físico construyó un gráfico que indica el nivel de luz necesario para ingresar en la zona de confort dependiendo del valor de la temperatura de color (Kruithof, 1941).

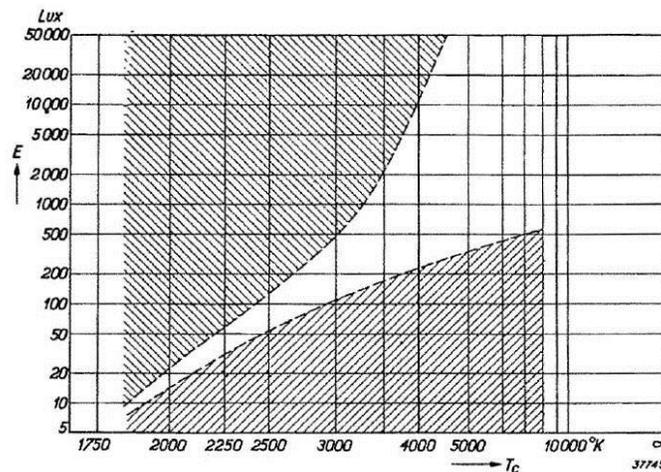


Figura 43. Comfort zone delimited by The Kruithof Curve. Kruithof. 1941. Philips Technical Review.

Las conclusiones del conocido gráfico fueron posteriormente rebatidos por Boyce (1977) argumentando que el índice de rendimiento de color no fue considerado en aquel momento ya que se introdujo por CIE 13.2-1974. Un nuevo estudio utilizando lámparas con diferente temperatura de color, pero con un mismo grado alto de reproducción del color demostró que la valoración objetiva del color mejoró con el aumento de la intensidad de la luz y la valoración subjetiva de satisfacción no se vio alterada por la diferencias en temperatura de color (P. R. Boyce & Cuttle, 1990).

Con respecto a la temperatura de color, Lam (1986) señala que la mente responde negativamente al uso inconsistente de diferentes fuentes de luz sin justificación aparente, sin embargo, existe una respuesta positiva si ayuda a diferenciar elementos en el campo visual ya que sirve de orientación y añade información útil en él. Si se utilizan fuentes de luz con diferente temperatura de color el efecto no será perturbador si son utilizados para iluminar diferentes superficies, a menos que en la misma superficie u objeto se discriminen áreas con información visual distinta.

Otro factor que se puede cuantificar para encontrar ciertos límites que nos mantienen en el confort visual es la relación entre contrastes de luminancias y el tiempo de adaptación a las condiciones de luz. Según la relación entre contrastes de luminancias dentro del campo visual se pueden dar dos casos extremos: falta de contraste o excesivo contraste. Si bien el contraste de luminancias nulo no representa un malestar visual si puede representar una deficiencia para distinguir superficies e incluso un peligro sobre todo en los cambios de nivel en el suelo (Quevedo, Aznar-Casanova, Merindano, & Solé, 2010). En la figura 38 observamos que a menor luminancia el contraste de luminancias debe ser mayor para ser visible. Por el contrario, el contraste excesivo de luminancias puede generar malestar por deslumbramiento e incluso imposibilitar la visión. Para mantenernos en un rango de confort visual se sugiere limitar el contraste a 10:1, entre el promedio de luminancias de la visión central y la visión periférica; sin embargo, si la tarea visual y el fondo están dentro de la visión central la relación máxima debe de ser de 3:1 (AADL, 2006). Con respecto al tiempo de adaptación a la oscuridad, mencionado anteriormente, es preciso conocer que la situación en la que perdemos la visión temporalmente se da cuando pasamos de un ambiente con alto nivel de luz a uno más bajo. El tiempo necesario para adaptarnos ronda entre los 15 y 45 minutos dependiendo del nivel de luz en el que estamos adaptados, es decir, en qué punto nos encontramos dentro de los márgenes de la visión fotópica (Miles, 1953).

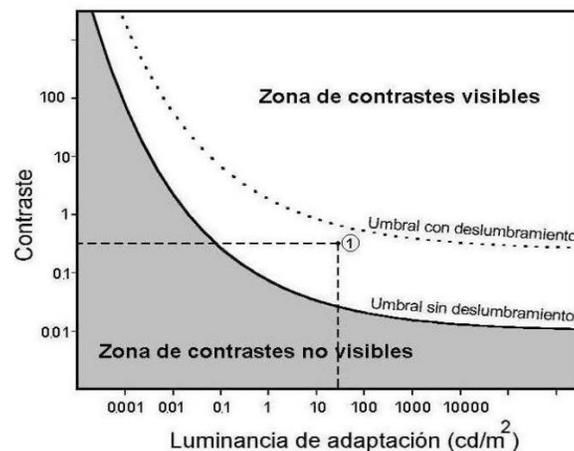


Figura 44. Relación entre luminancia de adaptación y contraste. UDELAR. 2012.

http://www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-luminico/files/2012/02/TEO-12_S1-C02B_VISION_PERCEPCION.pdf

Para abordar los factores cualitativos, recurrimos al exhaustivo análisis de Lam sobre el impacto que tiene el contraste de luminancias en la percepción del hombre. Para ello, el autor clasificó la información visual en dos categorías: necesidades biológicas y deseos de observación. La primera está vinculada a la orientación en el espacio, el bienestar físico y mental, la regulación del ritmo circadiano, el contacto con la naturaleza y la personalización del territorio. La segunda se da cuando la anterior está satisfecha y la voluntad de ver algo en detalle toma prioridad en nuestra visión.

Lam (1977) concluye en que el confort visual se alcanza cuando observamos lo que deseamos y nos sentimos bien mientras lo hacemos ya que nuestras necesidades biológicas se encuentran cubiertas:

“We are comfortable when we are free to focus our attention on what we want or need to see, when the information we seek is clearly visible and confirms our desires and our expectations, and when the background does not compete for our attention in a distracting way”.



Figura 45. Mezquita - Catedral de Córdoba. Cabildo Catedral de Córdoba. 2022. <https://mezquita-catedraldecordoba.es/descubre-el-monumento/el-edificio/mezquita-fundacional-de-abderraman-i/>

“En definitiva, cuando los occidentales hablan de los misterios de Oriente, es muy posible que con ello se refieran a esa calma algo inquietante que genera la sombra cuando posee esta cualidad.”

Junichiro Tanizaki (1994)

2.4 Parámetros del diseño lumínico.

Niveles de luz.

La normativa limita los valores mínimos y máximos de iluminancia según el uso del espacio. Los valores mínimos para la vivienda están entre 50lx y 300lx, mientras que para oficinas, escuelas y espacios comerciales, se elevan hasta 300lx (Martín, 2007). En otro tipo de espacios se establecen límites máximos de nivel de luz como en los museos, donde los objetos expuestos exigen condiciones de conservación que deben estar controlados (Ulas & Bretherton, 2015). La exposición a las radiaciones electromagnéticas en el espectro visible es uno de los factores que se regula para evitar el deterioro de los objetos por la sensibilidad del material, la distribución espectral de la energía radiante y el tiempo de exposición. Por un lado, los rayos ultravioletas son los principales causantes de degradar el color de los objetos debido a los efectos fotoquímicos en el material. Por otro lado, los rayos infrarrojos descomponen los materiales ya que sube la temperatura y reduce la humedad (Miller & Miller, 1994). Si bien la radiación visible no genera un daño tan rápido, como los mencionados anteriormente, esta debe estar limitada en intensidad y en tiempo. Con el objetivo de minimizar el daño producido por la radiación luminosa sobre los objetos que se desean conservar en los museos, se ha publicado la recomendación CIE 157:2004 (Bazán, Ajmat, & Sandoval, 2018). En el documento se clasifican los objetos según la composición del material y su sensibilidad a la luz (ver Tabla 1). Insensibles, son aquellos que no son dañados por la luz, entre ellos el metal, la piedra, el vidrio, etc. Los de baja sensibilidad reúne a aquellos con mejor resistencia la radiación del espectro visible: óleos, témperas, temples, frescos, cuero, madera natural, pieles sin teñir, huesos, marfil, lacas, etc. Los objetos de media sensibilidad se refiere a los que precisan un mayor cuidado de exposición a la luz como son: acuarelas, pasteles, textiles, impresos, pieles teñidas, pelo, plumas, insectos, material vegetal, etc. Los objetos de alta sensibilidad son los que requieren un cuidado extremo, tales como: colorante con anilina, manuscritos con tintas anteriores al siglo XX, etc.

VALORES DE ILUMINANCIA-EXPOSICIÓN (recomendación CIE)		
Categoría	Iluminancia máx. (lux)	Exposición máx.(lux-hora/año)
Insensible	Sin límite	Sin límite
Baja sensibilidad	200	600000
Media sensibilidad	50	150000
Alta sensibilidad	50	15000

Tabla 1. Límites de iluminancia y tiempo de exposición por sensibilidad de objetos. CIE 157:2004.

Hoy en día, para estimar estos valores en la etapa de diseño, se utilizan programas de cálculo que simulan el nivel de iluminación en diferentes puntos sobre un plano de trabajo o en cualquier plano dentro del espacio, además de los valores de deslumbramiento, los consumos eléctricos, etc. Sin embargo, estos programas utilizan los mismos métodos de cálculo manual entre los que destacan:

El método del flujo luminoso o método del lumen se utiliza para prever la iluminancia media en el plano de trabajo de un espacio de geometría regular y distribución uniforme de luminarias. El cálculo permite determinar el nivel de iluminación general de la zona que interesa iluminar.

El método punto por punto sirve para calcular la iluminancia en cada punto de interés del plano de trabajo en donde la luz no se distribuye de forma uniforme. Con este método se puede hallar el valor de la iluminancia directa e indirecta ya que considera las reflexiones de la luz en forma difusa.

Contrastes de luminancias.

La comparación entre los valores de luminancias de dos superficies se llama contraste de luminancias. Si bien es una medida objetiva de relación de luminancias entre dos superficies, cuyo exceso se conoce como deslumbramiento, en la percepción del contraste juega también un componente subjetivo que depende del entorno, las expectativas y el significado que le atribuimos a las superficies (Jay, 2002). La relación se suele indicar entre el objeto de interés y el fondo. Los valores altos de contrastes pueden corresponder con propósitos en el diseño como en el caso de los vitrales de una iglesia (Arnau Amo, 2014). El mismo valor de luminancia puede ser percibido como más o menos brillante según la luminancia de fondo (Hopkinson, Stevens, & Waldram, 1941).



Figura 46. Luminance by contrast. Lam. 1977. McGraw-Hill Book

El contraste de luminancias se analiza objetivamente mejor en situaciones aisladas, como el caso de la figura anterior; sin embargo, en la realidad los valores de luminancia corresponden a objetos que tienen un significado y se encuentran en un entorno. Según la teoría de la Gestalt no se puede comprender todo viendo solo las partes, pero sí, las partes gracias al todo (Lima, 2010). El cerebro tiende a sintetizar formas complejas para decodificarlas y asimilar rápidamente una imagen. Es por eso que tenemos la tendencia a separar la información de lo que observamos en diferentes conjuntos y cuando esto no sucede puede llegar presentarse una ambigüedad perceptual. La falta de contraste entre claro y oscuro o los patrones de diseño complejo pueden generar confusión o desorientación, para ejemplificar ello Lam propone observar estas dos imágenes:

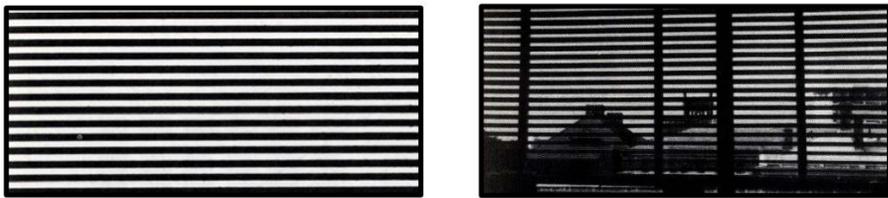


Figura 47. Background ambiguity. Lam. 1977. McGraw-Hill Book

En la imagen de la izquierda es ambiguo determinar si lo que interesa es lo que tiene mayor o menor luminancia. De igual forma, en la imagen de la derecha, diferenciar entre el objetivo y el fondo puede ser confuso. La constante búsqueda de nuestro cerebro por mantener un orden visual permite diferenciar entre la persiana y el paisaje, a pesar de tener bajo contraste de luminancia entre ambos. Es importante mantener un equilibrado reparto de luminancias a la hora de diseñar un espacio ya que no solo cambia nuestra percepción de una superficie, sino que también nos puede dar información sobre la percepción de profundidad. De igual forma, los cambios graduales de luminancia, nos sugieren cambios en la forma del objeto y del espacio.

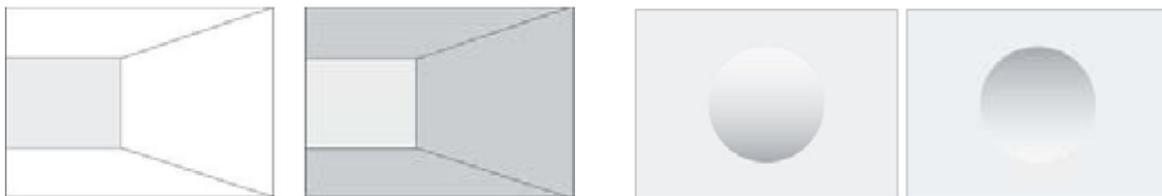


Figura 48. Brightness, shadows and gradient. IESNYC. 2022. <http://www.rsltg.com>

Deslumbramiento.

En el apartado anterior vimos que un bajo contraste de luminancia es un factor que puede ser perjudicial en la percepción espacial, sin embargo, el alto contraste de luminancias también es un problema que debemos considerar a la hora de diseñar con luz. El deslumbramiento se ocasiona cuando existe un contraste de luminancias demasiado alto dentro del campo visual (Serra, 1999). El efecto de contracción de la pupila, ocasionado por deslumbramiento, puede imposibilitar la visión o producir malestar al reducir la visibilidad. Con el fin de recomendar valores de contrastes de luminancias para evitar el deslumbramiento, diversas instituciones han elaborado tablas con valores similares entre las que se ha escogido la propuesta en Tabla 2 de IRAM- AADL J-20-06 ya que expresa la relación límite recomendable entre luminancias en diferentes situaciones (Bazán et al., 2018).

Zonas del campo visual	Relación de luminancias (tarea visual / fondo)
Campo visual central (cono de 30° de apertura)	3/1
Campo visual periférico (cono de 90° de apertura)	10/1
Entre la fuente de luz y el fondo sobre el cual se destaca	20/1
Entre dos puntos cualesquiera del campo visual	40/1

Tabla 2. Relación de luminancias con tarea visual según norma IRAM- AADL J-20-06. Bazán. 2018. Anales AFA.

Existen varios softwares que permiten conocer los valores de luminancias en una escena fotografiada, por tanto, las relaciones entre luminancias mostradas en la tabla son útiles al momento de hacer un análisis en donde analizamos el campo visual binocular completo. No obstante, se recomienda aplicar el método Unified Glare Rating (UGR) si se desea hacer un análisis minucioso, tanto en la etapa de diseño como de una situación real. El método UGR fue desarrollado por la CIE en los años 70, incorporando los métodos IES y Söllner, hasta que en 1995 se publicó la recomendación CIE (Folguera & Muros, 2013). La ventaja del nuevo método es que se aplica a todo tipo de distribución de luminarias, considera tanto la luz directa como la luz reflejada de las paredes, techos y suelos. El aporte fue una fórmula para calcular el valor de deslumbramiento cuyo resultado oscila entre 10 y 31, como vemos en la Tabla 3.

$$\text{UGR: } 8 \log \left[\frac{0.25}{L_b} + \sum L^2 \cdot \omega / \rho^2 \right]$$

Donde: L_b es la luminancia de fondo, L es la luminancia de las lámparas, ω el ángulo sólido entre el observador y las lámparas, y p es la posición de la lámpara en relación al observador.

Calificación	Valor UGR
Inapreciable	10
Casi apreciable	13
Apreciable	16
Casi aceptable	19
Inaceptable	22
Casi inconfortable	25
Inconfortable	28
Intolerable	31

Tabla 3. Valores UGR. Folguera & Muros. 2013. Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC.

Contrastes de color.

El color se percibe gracias a que el observador tiene células fotorreceptoras, llamadas conos, capaces de distinguir los tres colores primarios de la luz, RGB (Red, Blue and Green). En el caso de los humanos la visión tricromática permite ver todas las combinaciones del rojo, verde y azul en diferentes proporciones. La existencia de tres tipos de conos en la retina ha significado una ventaja en los primates ya que representa una mejor percepción del contraste de color. El ojo humano cuenta con un 94% de los conos del tipo R y G, y un 6% del tipo B. La interacción de estos tres tipos de conos manda señales al cerebro que se decodifican en valor de luminancia y color de la superficie.

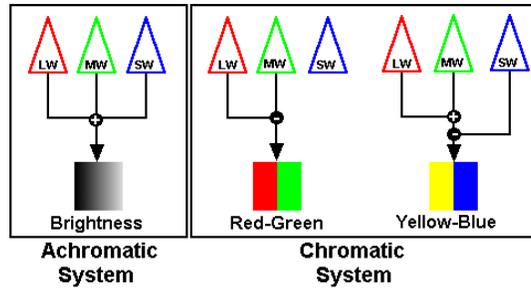


Figura 49. Opponent Process Theory (Canales de decodificación de las señales nerviosas). Visualexpert. 2004 <https://www.ukessays.com/essays/sciences/theories-colour-vision-5946.php>

El funcionamiento incorrecto de alguno de estos fotorreceptores repercute en una deficiencia para distinguir el contraste de color. Aunque la mayoría de personas percibimos los colores de la misma manera es importante saber que el 8% de los hombres y el 0.5% de mujeres padecen de daltonismo (Michel, 1995). Además de este problema fisiológico existe un fenómeno, llamado contraste simultáneo, en el que el color parece modificarse en tono cuando es colocado junto a otro color (Jacobs, 2004). Cuando el color gris es yuxtapuesto a cualquier otro, el primero tiende a parecer con un tono de color complementario al segundo. El fenómeno explica el motivo por que los conos de la retina que se activan para ver un color, tienden a inhibir los otros conos adyacentes (Lima, 2010).

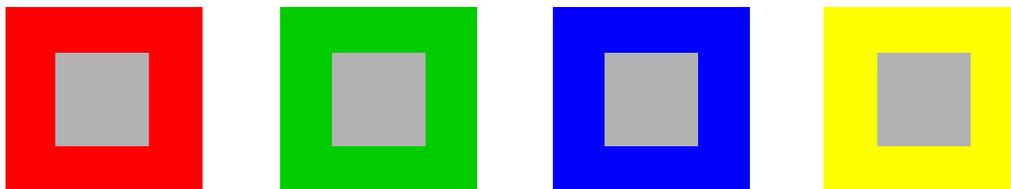


Figura 50. Contraste simultáneo de colores (El gris cambia de tonalidad según el fondo en el que se encuentra)

El contraste simultáneo de colores también afecta a los colores complementarios que están juntos, haciendo que ambos se vean con mayor intensidad en comparación a colores que no lo son. Del mismo modo un color cálido junto a uno frío se realzan mutuamente (Kalff, 1971).



Figura 51. Composition of colours, brightness and lines in eye task. (El par de la izquierda muestra el color blanco con diferente luminosidad dependiendo del entorno. El par de la derecha destaca la cruz por contraste de color). Kalff. 1971.

Temperatura de color y color de la luz.

El término temperatura de color se utiliza para referirnos a las diferentes tonalidades de la luz blanca. En cambio, el color de la luz se aplica a todos los tonos de color que se aprecian en el espectro visible de la luz. La temperatura de color empezó a utilizarse en luminotecnia en el siglo XX con la aparición de las lámparas de descarga. La diferencia más notable con respecto a las lámparas incandescentes, inventadas en el siglo XIX, era que el color de la luz emitida era blanco con tonalidad azul verdoso y desde entonces es útil establecer una categorización para diferenciar el color de la luz blanca (Rodríguez, 2021).

La temperatura de color se define como: “la temperatura absoluta en grados Kelvin (K) a la que el cuerpo negro emite una radiación luminosa, que impresiona al ojo con un color igual o similar al de la fuente analizada” (Martín, 2007). En la realidad los cuerpos, cuya temperatura a la que emiten luz corresponde a la temperatura de color, son los radiadores térmicos como el sol, el fuego, la lámpara incandescente, etc. Existen otras fuentes de luz, que no siguen el comportamiento descrito al inicio, como la lámpara de descarga (fluorescente, vapor de sodio, vapor de mercurio, etc.) o la lámpara LED. La primera puede ser descrita en términos de temperatura de color similar ya que se trata de luz blanca con tonalidades cálidas o frías. La segunda, el LED, conviene ser descrita como el color de la luz ya que es un término para referirse a cualquier color dentro del espectro visible. Ambas descripciones de color pueden ser referenciadas usando las coordenadas (x, y) del diagrama cromático de la CIE el cual contiene la curva de Planck; sin embargo, si se trata de luz blanca es más sencillo utilizar el término de temperatura de color.

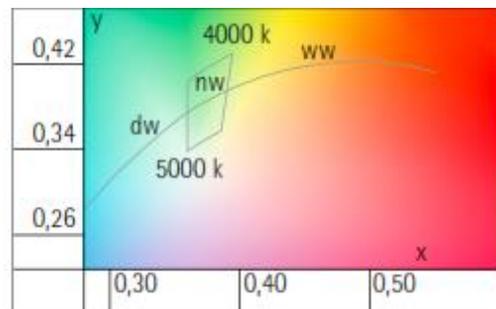
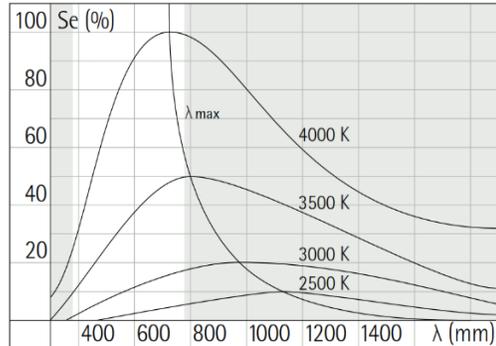


Figura 52. Arriba: Distribución espectral de un radiador térmico a diferentes temperaturas. Abajo: Curva de Planck en diagrama CIE, dividida en tres grupos: blanco cálido (ww), blanco neutro (nw) y blanco de luz diurna (dw). Hofmann & Ganslandt. 1992. ERCO.

Determinar un valor de temperatura de color similar al de un cuerpo negro sirve para que la fuente de luz pueda ser categorizada según la tonalidad del color blanco que emitan. Encontramos así, lámparas de luz cálida y luz fría cuya distinción va a depender de la comparación entre ellas.

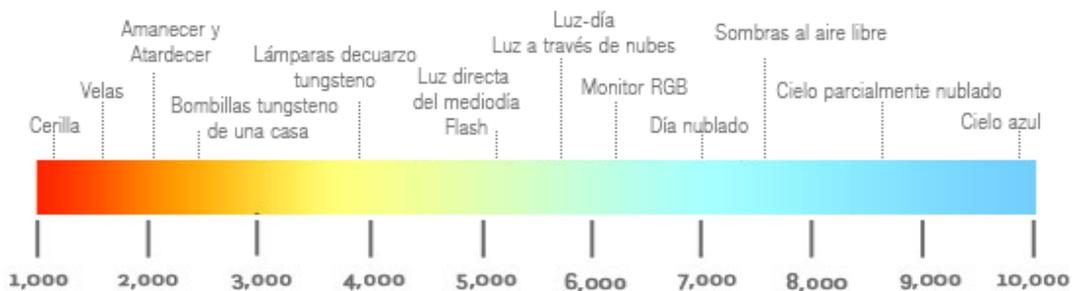


Figura 53. Temperatura de color en grados Kelvin de diferentes fuentes luminosas. Beldeus. 2015. <http://www.beldeus.com/blog/temperatura-de-color-de-la-luz-que-son-los-grados-kelvin/>

Índice de rendimiento de color.

Como hemos visto la temperatura de color solo hace referencia al color de la luz mas no a su composición espectral. Si la distribución espectral de la energía radiante tiene un reparto uniforme, la reproducción del color será de mejor calidad. La calidad de la luz desde el punto de vista cromático se da cuando el color de una superficie bajo una fuente de luz artificial se asemeja al color de la misma superficie bajo una fuente de luz natural con temperatura de color equivalente. Es por ello, que la CIE desarrolló el índice de rendimiento de color cuyas abreviaturas puede ser IRC o R_a . Este índice compara cualquier fuente de luz con la fuente de luz patrón y se mide en porcentaje, obteniendo el valor más alto, el número 100, cuando la diferencia en la reproducción cromática, entre las dos fuentes de luz, es nula. La luz patrón, para temperaturas de color menor a 5000 K, es un modelo basado en un cuerpo negro a una temperatura determinada cuyo color sea lo más parecido a la fuente de luz a evaluar. En el caso de temperaturas de color mayores a 5000 K, el modelo será la luz de día cuya distribución espectral se encuentra homologado en uno de los iluminantes estándar definidos por la CIE. El procedimiento para obtener el IRC está normalizado por la CIE y está descrito en CIE 13.3 1995 (CIE, 1995). En ella se detalla que se compara la reproducción de color de dos fuentes de luz (fuente test y fuente de referencia) sobre un grupo de ocho muestras que pertenecen al atlas Munsell. Como ambas fuentes de luz deben tener la misma temperatura de color es necesario hacer un proceso iterativo de ajuste al modelo de la fuente de referencia. Por tanto, cabe resaltar que el IRC de una lámpara sólo puede ser comparado con el IRC de otra lámpara si tienen una temperatura de color similar (Cordero, 2016).

El valor de IRC mínimo que debe de cumplir una lámpara varía en función de la actividad que se realiza y se encuentra normado siguiendo las recomendaciones de la CIE. En el caso de España la norma de alumbrado interior UNE 12464.1 tiene los valores mínimos de IRC por tipo de espacio. Se suele categorizar el IRC de la siguiente manera:

IRC mayor a 90	Excelentes propiedades de reproducción cromática.
IRC entre 80 – 90	Buenas propiedades de reproducción cromática.
IRC entre 50 - 80	Las propiedades de reproducción cromática son moderadas.
IRC menor a 50	Las propiedades de reproducción cromática son deficientes.

En la tabla 4 vemos los valores de IRC y temperaturas de color (Martín, 2007) y (Rodríguez, 2021):

TIPO DE LAMPARA	TEMPERATURA DE COLOR (K)	IRC (%)
Incandescente de tungsteno	2400 - 2900	100
Halógena	3100 - 3200	100
Fluorescentes de diversos tipos	2700 - 7200	52-95
Vapor de mercurio de alta presión	4000 - 5000	40-60
Vapor de mercurio (halogenuro metálico)	4000 - 6000	70-90
Vapor de sodio de baja presión	1800	1
Vapor de sodio de alta presión	1900 - 2200	25-70
De Xenon	7500	---
LED*	2700 - 6500	81 – 90

Tabla 4. Tabla de IRC y temperatura de color de diversos tipos de lámparas. Martín. 2007. *IRC y TC LED. Rodríguez. 2021.

Tiempo de adaptación a la oscuridad.

El fenómeno de adaptación visual fue primero desarrollado por Purkinje en 1825. Este estudio demostró que el ser humano presenta dos tipos de fotorreceptores en la retina, conos y bastones, que conllevan a un cambio en las características de la visión. El cambio de visión requiere de un tiempo de adaptación que puede ser muy corto si pasamos de la oscuridad a la luz, o muy largo si es en sentido contrario; por ello, diversos estudiosos se ocuparon en la tarea de determinar el tiempo de adaptación a la oscuridad. Schultze en 1866 analizó el fenómeno de adaptación de los diferentes mecanismos de la visión al nivel de luz, este estudio lo continuaron Parinaud en 1881 y Kries en 1895. El estudio concluyó en que los conos tardan aproximadamente 10 minutos en adaptarse por completo a la oscuridad, mientras que, la adaptación de los bastones puede llegar hasta 45 minutos. Sin embargo, como el estudio fue realizado utilizando luz blanca, Hecht en 1945 publicó un artículo en donde demuestra que el tiempo de adaptación a la oscuridad es más corto bajo la luz roja en comparación al tiempo transcurrido si la luz es blanca. Además, Hecht explica que, si bien los bastones reaccionan antes a la luz en longitudes de onda cercanas a 507nm, se puede apreciar que incluso son más sensibles que los conos hasta los 650nm (Hecht & Hsia, 1945). Este fenómeno explica porque el tiempo de adaptación es diferente a diferentes longitudes de onda (Bartlett, 1965).

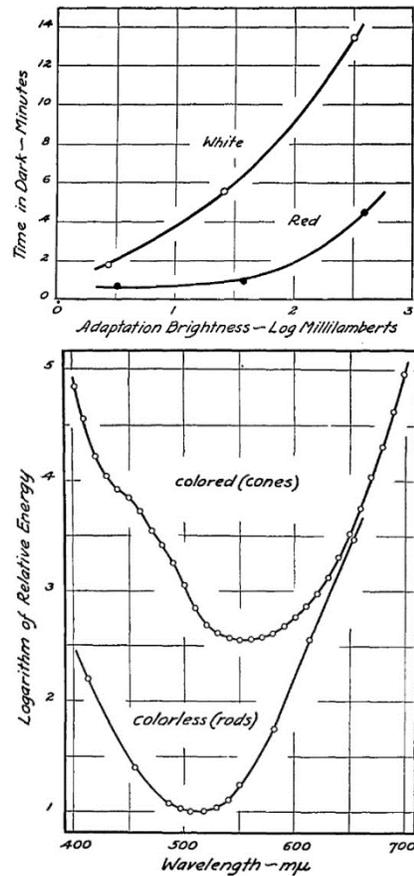


Figura 54. Arriba: Time in dark adaptation. Abajo: Cones & rods sensibility. Hecht. 1945

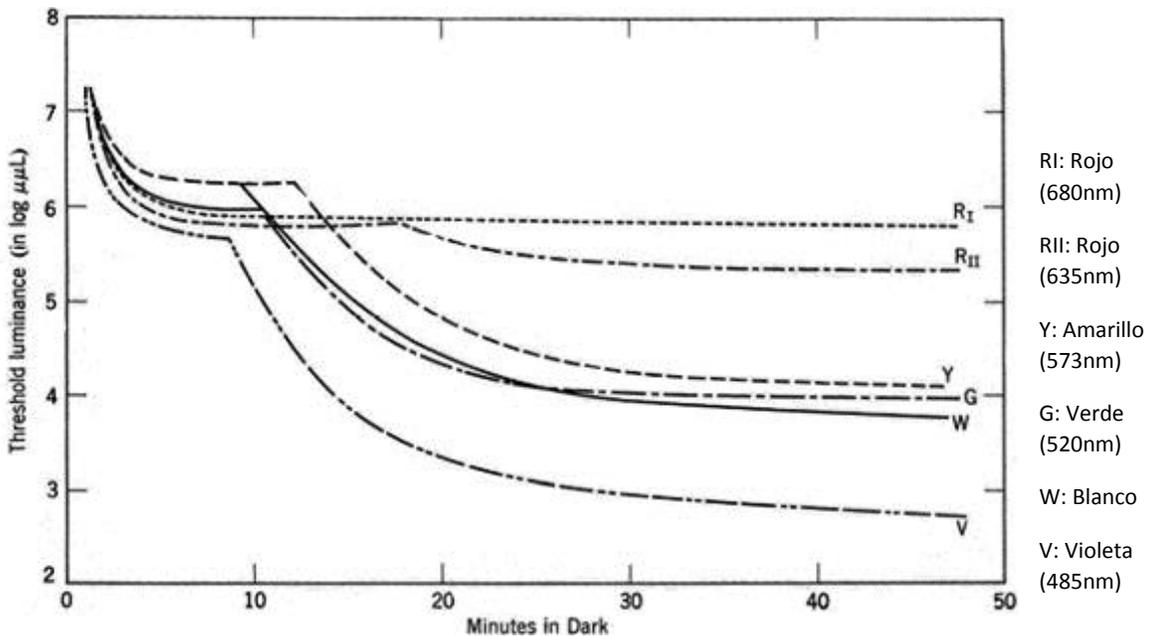


Figura 55. Tiempo de adaptación a la oscuridad en función del estímulo a diferente longitud de onda. Bartlett. 1965.

Direccionalidad.



Figura 56. Panteón de Roma. https://arteenparte.es/wp-content/uploads/2021/01/Arquitectura-romana_compressed.pdf

La dirección de la luz es otro de los parámetros del diseño lumínico que es importante considerar para iluminar con intención. Para conseguir este objetivo es necesario tener en cuenta 3 factores: la elección de la luminaria, las características espaciales y el efecto lumínico que se desea lograr.

Las luminarias tienen características que se deben conocer antes de su elección, tales como el tipo de lámpara, el reflector o la cubierta, el vidrio frontal a la lámpara, el consumo, el tamaño y el peso. Las tres primeras son fundamentales para determinar la curva fotométrica de la lámpara. El resultado va a ser una distribución luminosa simétrica o asimétrica lo que va a definir los ángulos de apertura del haz luminoso. Según la National Electrical Manufacturers Association - Illuminating Engineering Society (NEMA-IES) que clasifica las luminarias en función del ángulo de apertura del haz; se considera ángulo estrecho cuando es menor a 20°, ángulo ancho a mayores de 40° y ángulo medio entre estas dos medidas. Los ángulos son importantes para evitar el deslumbramiento por reflexión (Lichttechnische Deutsche Gesellschaft (LiTG), 2000).

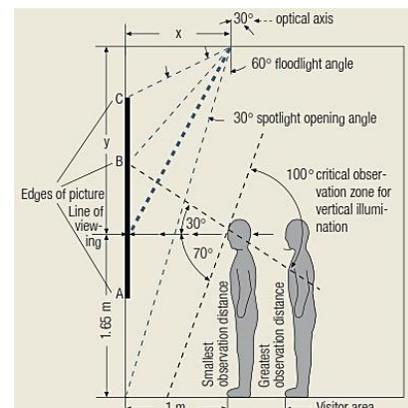


Figura 57. Calculation of the positioning of a luminaire for pictures on a wall. Lichttechnische Deutsche Gesellschaft (LiTG). 2000.

En cuanto al espacio es importante reconocer sus características arquitectónicas, tanto en interiores como en exteriores, tales como las dimensiones, las formas y los relieves; el emplazamiento, los alrededores y el fondo; y, también, los ángulos, las distancias y los obstáculos de observación. Con respecto al efecto lumínico debe planearse en función de las actividades que se realizan en el espacio. En primer lugar, definir el nivel lumínico a conseguir; luego, el reparto de luminancias que puede ser uniforme o contrastado; y, por último, los efectos de color que están condicionados a la temperatura del color de la luz y a los colores de las superficies (Sylvania, 2015). Además, la direccionalidad de la luz debe considerar también si se trata de iluminar un espacio interior o uno exterior. Esta diferenciación va a dar lugar a distintos tipos de iluminación:

Entre los tipos de iluminación interior encontramos que puede ser general, por tareas y/o de acento. La primera se refiere a aquella que sirve para determinar si el nivel de iluminación de un lugar es bajo, medio o alto y puede ser uniforme o contrastada. La segunda está orientada a satisfacer las necesidades de visión para realizar una determinada tarea y puede ser orientada a la superficie de trabajo o a un espacio de trabajo. La tercera, la iluminación de acento, va a permitir dirigir la luz hacia ciertos detalles que se desea resaltar dentro del espacio ya sea por la importancia de su significado en el contexto o por tratarse de un aspecto decorativo (F. K. Smith & Bertolone, 1986).

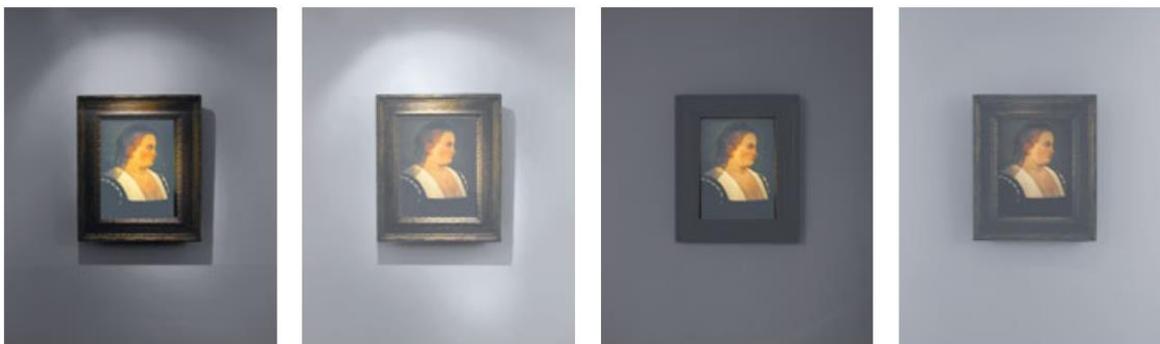


Figura 58. Tiempo de adaptación a la oscuridad en función del estímulo a diferente longitud de onda. LiTG. 2000.

En el diseño de iluminación exterior encontramos básicamente tres opciones: el edificio en conjunto como fuente de luz, el edificio como suma de detalles arquitectónicos y una mezcla de ambas. Es así que la primera forma de iluminar será por proyección, es decir, cuando se baña con luz uniforme todo el edificio. La segunda, en contraposición a la primera, procura la luz dirigida sobre los detalles de manera que las formas del edificio quedan resaltadas por el contraste entre la luz y la sombra. La tercera, una mezcla de las dos anteriores, se denomina mixta y suele presentarse por sectores, es decir, cuando se desea diferenciar distintos tipos de fachadas, alturas, materiales, entre otros.



Figura 59. Proyecto (izquierda) y ejecución (centro y derecha) del Museo Thyssen-Bornemisza. Rodríguez. 2014.

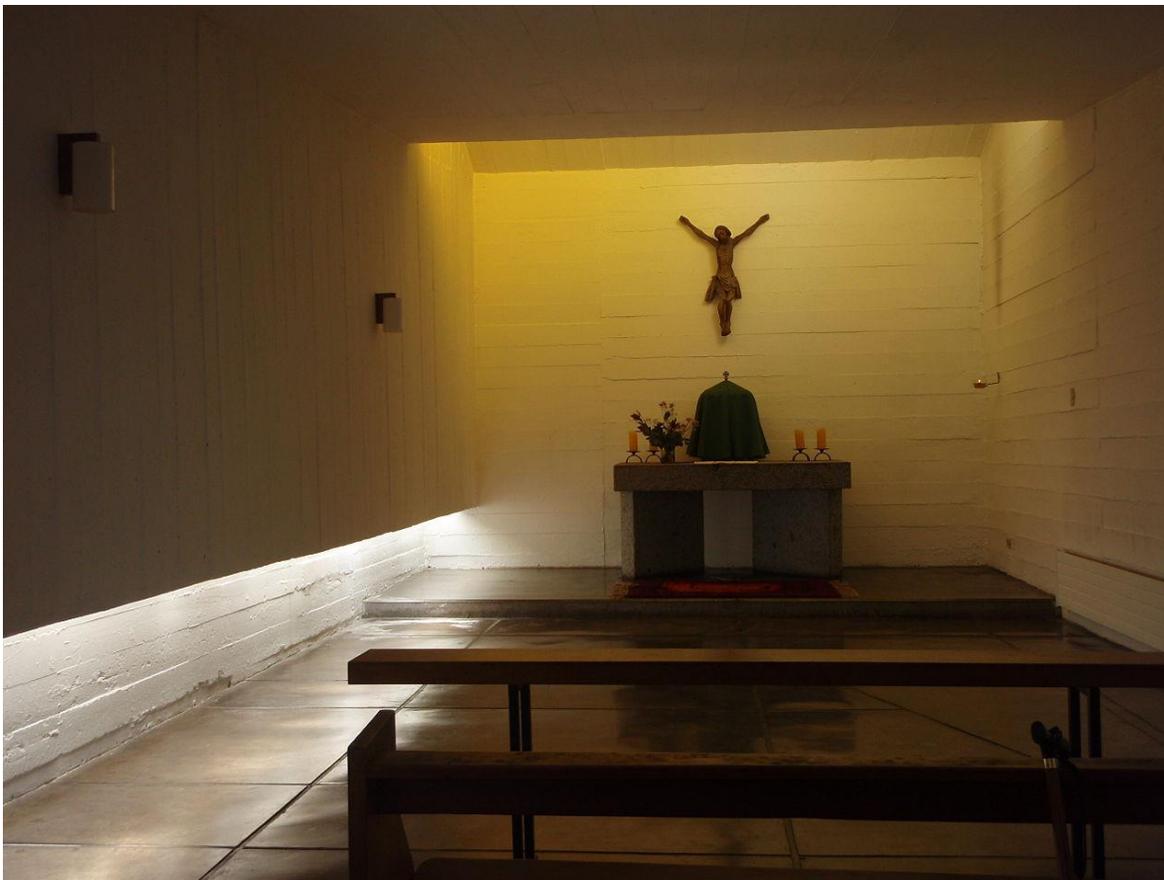


Figura 60. La luz como elemento capital: La capilla del Monasterio Benedictino de la Santísima Trinidad de Las Condes, diseñado y construido por los arquitectos Martín Correa Prieto y Gabriel Guarda en 1964. Pérez-Barros. 2016. Revista Digital ED. <https://www.ed.cl/estilo-de-vida/articulos/la-luz-como-elemento-principal/>

“Se crea una luz sobre el contorno de una mágica tiniebla que absorbe materia, hombres y cosas, y las paredes desaparecen, y toda la iglesia se transforma en espacio-luz”

Luigi Moretti (2013)

2.5 Estrategias del diseño lumínico.

Espacios de alta intensidad lumínica.

Los espacios de alta intensidad lumínica son aquellos en los que el nivel de luz nos permite realizar actividades que requieren de mayor agudeza visual. Este tipo de espacios requiere cuidar de un conjunto combinado de parámetros con diferentes jerarquías como lo propone Rombauts (2001).

Como hemos visto anteriormente, por un lado, la iluminancia varía en función de la intensidad y la distancia; por el otro, la luminancia está condicionada a la iluminancia que recibe la superficie y al coeficiente de reflexión del material. Si se desea calcular el nivel de luz sobre un plano de trabajo cuyo valor de luminancia mínimo debe ser 10 cd/m^2 , para estar en completas condiciones de visión fotópica (Hofmann & Ganslandt, 1992), podemos aplicar la siguiente fórmula (Isalgué, 1993):

$$L = (E \cdot r) / \pi$$

En caso de que el coeficiente de reflexión sea tan bajo como 0.1 entonces el nivel de luz mínimo para estar en condiciones de visión fotópica será de 314 lx; mientras que, si el coeficiente de reflexión es tan alto como 0.9 entonces el nivel de luz necesario para estar guiado por los conos de la retina será de 35 lx. Es así que en las recomendaciones de la CIE se observa que los valores de iluminancia, considerados para diversas actividades en la Tabla 5, empiezan a partir de 30 lx; es decir, cuando la visión está guiada por los conos.

Nivel de iluminación	Aplicación	Ejemplo típico
30 lux (General)	Zonas públicas con alrededores oscuros	Paseos de jardines, etc.
75 lux (General)	Para simple orientación en periodos cortos	Circulaciones, pasillos, etc.
150 lux (General)	Lugares no destinados al trabajo continuo	Almacenamiento, etc.
300 lux (General)	Tareas con necesidades visuales limitadas	Salas de conferencias, etc.
750 lux (General)	Tareas con necesidades visuales normales	Oficinas, locales, etc.
1500 lux (General)	Tareas con necesidades visuales especiales	Laboratorios, etc.
3000 lux (General)	Tareas prolongadas de precisión visual	Electrónica, relojería, etc.
7500 lux (Localizada)	Tareas visuales excepcionalmente exactas	Montaje microscópico, etc.
15000 lux (Localizada)	Tareas visuales muy especiales	Sala de operaciones, etc.

Tabla 5. Tabla de niveles de iluminación (recomendados por la CE), para diversas actividades. Martín. 2007.

A pesar de que la iluminancia es el parámetro más utilizado y probablemente el más importante en las normativas de iluminación, la luminancia es la magnitud que en realidad nos da la intensidad luminosa por superficie aparente que reciben nuestros ojos. Desde el punto de vista de la arquitectura, el contraste de luminancias es el valor más significativo en el diseño lumínico ya que permite comparar luminancias dentro de un amplio rango que empieza en el umbral de visión y acaba en el umbral de deslumbramiento absoluto (Rockcastle & Andersen, 2014). En espacios de alta intensidad lumínica, cuando la agudeza visual está asegurada, la relación de luminancias entre la tarea visual y el fondo puede servir tanto para destacar la tarea visual como el fondo, según la intención de diseño lumínico. Para ejemplificar este caso, en el transcurso de la elaboración de esta tesis, se ha desarrollado un estudio comparativo de dos bibliotecas en Barcelona que tienen dos funciones diferentes. La primera, la biblioteca Depósito de Aguas de la UPF, es de uso exclusivo de

estudiantes universitarios, en ella se puede identificar la intención lumínica enfocada en la actividad de lectura y de circulación. La segunda, la biblioteca pública Agustí Centelles en Barcelona, es parte de un programa más amplio que agrupa en un solo edificio diversos usos (un centro cívico, un auditorio, una guardería y una biblioteca) y usuarios (personas de todas las edades); por tanto, con un diseño lumínico centrado en la integración y participación. La intención lumínica de la biblioteca comunitaria es permitir el mayor ingreso de luz desde el exterior en las salas junto a las fachadas. En el análisis comparativo se reveló que hay intenciones lumínicas distintas. En el primer caso, la biblioteca universitaria, se observó que las luminancias en el plano de trabajo son mayores que las luminancias del entorno, con una relación de 10:1. En el segundo caso, la biblioteca comunitaria, se aprecia que las luminancias en el plano de trabajo son menores que las luminancias del entorno, con una relación de 1:10. Con lo cual, se constata que, el contraste de luminancias en estas dos bibliotecas responde al tipo de uso del espacio (Espinoza, Coch, & Crespo, 2021) (ver anexo 1).

A pesar de que hemos mencionado que el contraste de luminancias es un aspecto prioritario a considerar, otro parámetro de diseño importante en espacios de alta intensidad lumínica es el contraste de color. Gracias al contraste cromático es que podemos diferenciar entre superficies con valores de luminancias que son muy parecidas entre sí. Por esta razón podemos diferenciar entre dos superficies, con valores de luminancias idénticos, tan solo porque una de las superficies remite la luz en una longitud de onda diferente. En este orden de ideas, el índice de rendimiento de color es fundamental cuando se interviene con luz artificial ya que nos indica la similitud del color con respecto a la apariencia del mismo bajo una fuente de luz natural. Si una fuente de luz artificial no reproduce bien todos los colores del espectro visible, entonces será más difícil distinguir por contraste cromático.

Continuando con la jerarquización de los parámetros de diseño lumínico, nos quedan tres por mencionar. El parámetro de deslumbramiento, aunque ya ha sido mencionado, debe tener en cuenta no sólo la relación de 40:1 como diferencia máxima de luminancias entre dos puntos cualesquiera del campo visual (Bazán et al., 2018), sino también procurar mantener el valor UGR dentro de los márgenes propuestos por la CIE (Folguera & Muros, 2013). La ventaja de utilizar el método UGR es que tiene categorías desde inapreciable hasta intolerable, por tanto, cuando el valor UGR es muy bajo podemos considerar utilizar el color de la superficie o el color de la luz como herramienta en el diseño para distinguir entre superficies con luminancias parecidas.

La temperatura de color aporta matices a los colores de las superficies y si se utiliza diferentes colores de luz el resultado será más notorio. Utilizar dos temperaturas de color puede ser utilizado a favor y en contra del diseño lumínico. Si una superficie del mismo color es iluminada con dos lámparas que tienen diferente temperatura de color se va a percibir como una instalación lumínica deficiente ya que veremos una alteración de color en la misma superficie. En cambio, si la temperatura de color sirve para iluminar áreas con información diferente en la superficie o en el mismo espacio, puede tener una connotación favorable. En este caso, la dirección de la luz es el parámetro que nos ayudará a generar subespacios, además de evidenciar la forma, el volumen y la posición de los elementos que conforman el espacio. Por último, el tiempo de adaptación a la oscuridad es un parámetro que en este caso no tiene mayor relevancia; mientras que sí preocupa el tiempo de adaptación a la claridad. En el segundo caso, la adaptación a la luz, el intervalo de tiempo es bastante más rápido que en el primero ya que tardamos segundos en tener visibilidad suficiente o hasta diez minutos si se busca el máximo nivel de adaptación.

Espacios de baja intensidad lumínica.

Si bien no existe literatura que defina cuándo un espacio es de baja intensidad lumínica, por comparación con otros espacios podemos identificar cuando el nivel de luz es bajo. La percepción está filtrada por las experiencias previas, pero siempre empiezan por un estímulo físico. En el caso de la percepción visual el estímulo es la luz que entra por los ojos. Si la cantidad de luz que ingresa no es suficiente para activar nuestros fotorreceptores entonces no veremos nada. En cambio, si el nivel de luz empieza a elevarse, los bastones de la retina son los primeros en ser estimulados y obtenemos la visión escotópica; luego se activan los conos, entrando a una etapa de transición llamada visión mesópica, hasta que los conos son los únicos receptores activos de la luz.

En el apartado de visión, encontramos que existen opiniones encontradas con respecto al valor de luminancias necesario para que la visión quede únicamente guiada por los bastones. Algunos autores determinan el umbral de la visión fotópica en 0.003 cd/m^2 y otros en 0.1 cd/m^2 ; y, además, fijan el límite de la visión escotópica entre 3 cd/m^2 y 10 cd/m^2 . Entre esos dos rangos se sitúa la visión mesópica, guiada por bastones y conos en simultáneo.

Si utilizamos la fórmula que relaciona luminancias e iluminancias para encontrar el nivel de luz máximo, en donde sólo actúan los bastones de la retina, hallaremos que ronda entre 0.1 lx y 3 lx para un plano de trabajo con coeficiente de reflexión mínimo. Son pocos los espacios públicos que tienen un nivel de iluminación tan bajo; sin embargo, sí podemos encontrar algunos espacios con niveles de luz, debajo de 35 lx , suficiente como para que los bastones de la retina sigan trabajando en visión mesópica. Son todos estos tipos de espacios en los que centraremos la atención del estudio ya que son los menos normados en cuanto a parámetros de iluminación.

Parámetros luminotécnicos	Valores máximos			
	Observatorios astronómicos y parques naturales E1	Zonas periurbanas y áreas rurales E2	Zonas urbanas residenciales E3	Centros urbanos comerciales E4
Iluminancia vertical (E_v)	2 lux	5 lux	10 lux	25 lux
Intensidad luminosa emitida por las luminarias (I)	2.500 cd	7.500 cd	10.000 cd	25.000 cd
Luminancia media de las fachadas (L_m)	5 cd/m^2	5 cd/m^2	10 cd/m^2	25 cd/m^2
Luminancia máxima de las fachadas (L_{max})	10 cd/m^2	10 cd/m^2	60 cd/m^2	150 cd/m^2
Luminancia máxima de señales y anuncios luminosos ($L_{máx}$)	50 cd/m^2	400 cd/m^2	800 cd/m^2	1.000 cd/m^2
	Clase de Alumbrado			
	Sin iluminación	ME 5	ME3 / ME4	ME1 / ME2
Incremento de umbral de contraste (TI)	TI = 15% para adaptación a $L = 0,1 \text{ cd/m}^2$	TI = 15% para adaptación a $L = 1 \text{ cd/m}^2$	TI = 15% para adaptación a $L = 2 \text{ cd/m}^2$	TI = 15% para adaptación a $L = 5 \text{ cd/m}^2$

Tabla 6. Limitaciones de la luz molesta procedente de instalaciones de alumbrado exterior. Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior. Instrucción técnica EA-03. BOE-A-2008-18634. MINCOTUR, 2008.

La Tabla 6 muestra que según la normativa española los valores máximos de iluminación en espacios de baja intensidad lumínica, tales como observatorios astronómicos y parques naturales, no debe de exceder de 2 lx en iluminancia tomada en vertical y de 10 cd/m^2 en luminancia de fachadas dentro del entorno. La luminancia máxima del entorno debe de ser menor a 50 cd/m^2 (MINCOTUR, 2008).

Si bien numerosos autores coinciden en que el contraste de luminancias es el parámetro más importante en el diseño lumínico (Coch, Serra, & Isalgué, 1998), en espacios de baja intensidad lumínica, el contraste de luminancias es menos evidente por tratarse de valores de luminancias más cercanos entre sí. En estas situaciones la temperatura de color podría ser un parámetro de la luz primordial para distinguir entre superficies cuya información cromática ha sido disminuida por encontrarnos en los márgenes de la visión escotópica. Para demostrar esta hipótesis, foco de esta tesis, se han analizado diferentes casos de estudio de los cuales uno de ellos ha sido materia de discusión en un artículo para un congreso (Espinoza Cateriano, Lopez-Besora, Alonso-Montolio, Coch Roura, & Crespo Cabillo, 2022) (ver anexo 2).

El tiempo de adaptación a la oscuridad es otro aspecto fundamental en el diseño lumínico de baja intensidad. El cambio drástico de nivel de luz entre un espacio con mucha luz y otro con poca luz puede llevar a cegarnos por un momento y a sufrir accidentes en el peor de los casos. Según el nivel de luz de los espacios entre los que transitamos, podemos llegar tardar hasta 45 minutos para adecuarnos a la visión escotópica, o alrededor de 10 minutos para llegar a la visión mesópica.

En sentido contrario, el parámetro del deslumbramiento es una situación que debemos evitar en espacios con poca luz. Este parámetro se debe tener en cuenta a la hora de prever la ubicación de las fuentes de luz para impedir el malestar generado al ver directamente las altas luminancias de las lámparas. Del mismo modo se debe evadir la intrusión de escenas lumínicas externas, con valores promedio de luminancias que superen más de cuarenta veces la media de luminancias en el interior. Este aspecto es de especial interés cuando la persona tiene la visión escotópica activa ya que no hace falta una superficie con valor de luminancia muy alto para que pueda deslumbrarnos.

En este sentido la direccionalidad es otro de los parámetros a considerar con especial cuidado en este tipo de espacios, ya que permite enfocar la luz en la mínima cantidad de superficies para que el usuario pueda realizar sus actividades (Brandt, 2012).

Por último, el contraste por colores de superficies y el índice de reproducción cromática es de menor importancia en estos casos ya que el bajo nivel de luz no permite que percibamos los colores con la misma fidelidad que en espacios de alta intensidad lumínica.

Capítulo 3: INVESTIGACIÓN

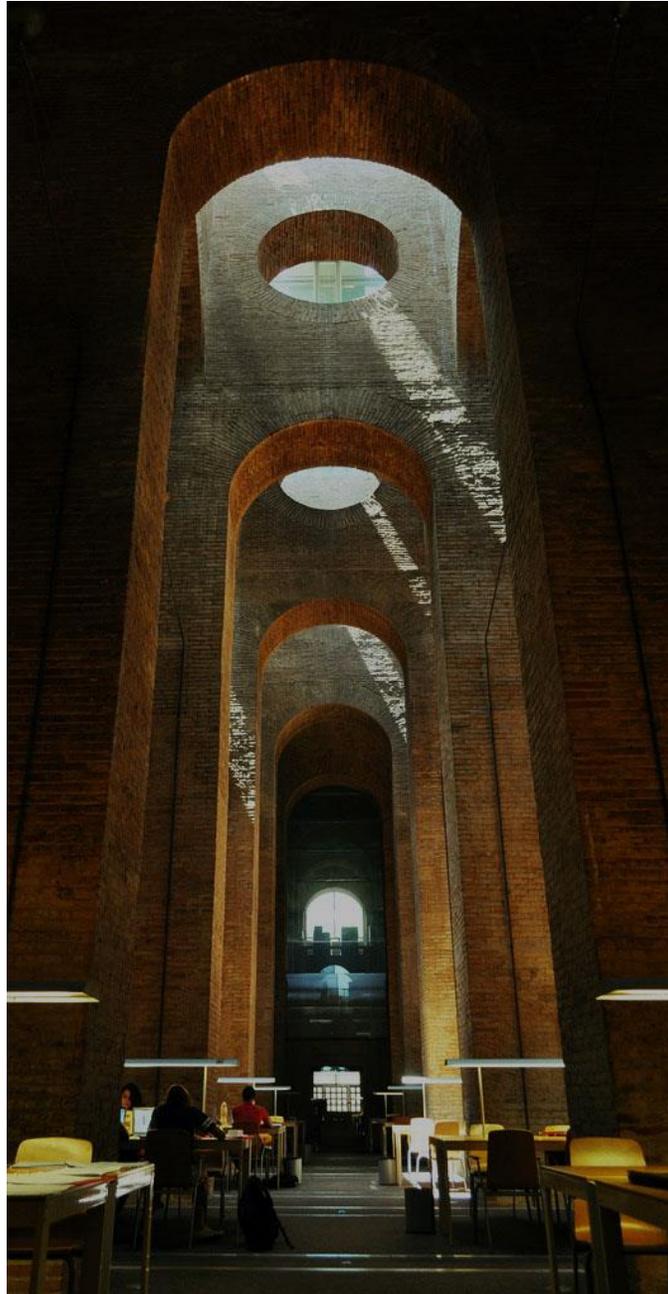


Figura 61. Una biblioteca bajo el agua. Martí M. and Sarrà J. 1999. El País semanal, 1191 p: 49-54. Online: https://repositori.upf.edu/bitstream/handle/10230/20539/marti_biblioteca.pdf?sequence=1&isAllowed=y

“La luz cambia la escala de las cosas, y la arquitectura es una cuestión de escalas”.

Jacques Herzog citado por Fernández-Galiano (2003).

3.1 Metodología.

La metodología aplicada en esta tesis se divide en cuatro etapas:

Recopilación de la información.

La primera etapa consiste en la investigación previa a la elección de los casos de estudio. En esta etapa se determinan los criterios que deben de cumplir los espacios a estudiar y se evalúan las diferentes alternativas de software para obtener mediciones de luminancias mediante el procesamiento de imágenes.

En cuanto a los criterios de elección de casos de estudio se definieron tres requisitos fundamentales: la configuración del espacio, el nivel de luz y las características de la luz.

El primero es que sean espacios públicos con un recorrido definido, es decir, con elementos en el diseño espacial y/o lumínico que indique cuales son las zonas de circulación. Además, el recorrido total del espacio debe de tener una duración mínima de 10 minutos para asegurar que una persona pueda pasar de visión fotópica a visión mesópica, es decir, la correcta transición entre los niveles lumínicos del exterior, durante el día, y el interior.

El segundo requisito es que mantengan un nivel bajo de intensidad lumínica. Si bien muchos espacios interiores en comparación con los espacios exteriores tienen un nivel más bajo de intensidad lumínica, la idea es enfocarnos en aquellos espacios en los que empezamos a ver con los bastones de la retina. Como hemos visto, la visión escotópica está en el rango de 10^{-6} cd/m² hasta los 10 cd/m², por tanto, las luminancias preponderantes deben de estar debajo del valor máximo. Si se desea conocer el valor de iluminancia máxima debemos de conocer el coeficiente de reflexión de la superficie que deseamos analizar, sin embargo, en términos generales podemos decir que las superficies iluminadas con coeficiente de reflexión alto no deben de sobrepasar los 35 lx.

El tercer requisito es que por lo menos utilicen dos fuentes de luz con diferente temperatura de color, notable a la vista, ya que el color de la luz es la variable que se desea evaluar en el presente estudio. La documentación previa permite conocer las características del espacio, la intención en el diseño lumínico y el uso que se le ha dado a la luz en el espacio.

Con respecto a la evaluación de diferentes programas de procesamiento fotográfico, se realizó un análisis comparativo de tres softwares para elegir el más adecuado a las condiciones con poca luz de los casos de estudio (Espinoza, Lopez-Besora, Isalgue, Coch, & Crespo, 2020).

En primer lugar, se decidió evaluar la eficacia de los procesadores de imágenes en tres situaciones lumínicas diferentes. Los espacios seleccionados fueron aquellos con intensidad de luz baja, media y alta. En cada espacio se analizan cinco superficies con diferente coeficiente de reflexión.

En segundo lugar, se identificaron todas las herramientas, materiales y software necesarios para realizar las mediciones en los casos de estudio. Se utilizaron las siguientes herramientas: Konica Minolta LS - 110 Luminance Meter, Kaise MS6610 Digital Lux Meter, Nikon D70 Digital Camera, Sigma 4.5mm F2.8 EX DC Circular Fisheye HSM Lens, teléfono celular iPhone SE con sistema operativo iOS y una cámara trípode. En cuanto a los materiales, se determinó el coeficiente de reflexión (r) de cinco superficies: hoja de papel negro (r: 4%), hoja de papel gris oscuro (r: 25%), hoja de papel gris medio (r: 35%), hoja de papel gris claro (r: 45%) y hoja de papel blanco (r: 80%).

En cuanto al software, se eligieron tres procesadores de imagen:

Aftab Alpha fue elegido porque nos proporciona una imagen HDR. La imagen HDR es el resultado de la superposición de cinco archivos de imagen RAW con diferente tiempo de exposición. Además, el software genera una imagen en falso color que cuantifica el nivel de luminancia de cada una de las superficies y las agrupa cromáticamente (Miri, 2015).

Fusion Optix de la compañía de ingeniería BrightMinds® (Yeo, 2019), es un software de descarga gratuita para teléfonos inteligentes. Este software ha sido seleccionado por su disponibilidad y uso fácil por parte de los interesados en el diseño de iluminación de espacios.

Lumin, un programa propietario en C, que lee el contenido de la fotografía de píxel a píxel en componentes RGB. Ayuda a determinar cuál es el valor de luminancia en cada punto de una imagen y el valor de luminancia promedio en la escena.

En tercer lugar se realizaron dos sesiones de fotos para cada uno de las situaciones lumínicas elegidas anteriormente. La primera sesión fotográfica se realizó con la cámara Réflex Digital Nikon. La cámara se utilizó con un lente ojo de pez porque permite acercarse al campo visual humano. Las cinco superficies por analizar se encuentran en un plano paralelo a la lente de la cámara. La segunda sesión de fotos se hizo con la cámara de un teléfono móvil. Luego, se tomó la medida de luminancia de las cinco superficies analizadas con un luminancímetro. Además, se midió la iluminancia con un luxómetro colocado sobre la superficie analizada.

Por último, se examinaron las imágenes digitales con los tres programas elegidos. Se empleó Excel para crear gráficos comparativos entre los datos obtenidos de las fotos y las medidas de luminancia reales. Los gráficos obtenidos sirvieron para observar la línea de tendencia en un eje de coordenadas y el valor de R2 (RSQ) (Microsoft, 2021). El RSQ tiene un rango de 0 a 1, en donde 1 significa que no hay desviación de la línea de tendencia. El resultado se resume en la siguiente tabla:

SOFTWARE	Ventajas	Desventajas
Aftab Alpha	Es fiable en diferentes intensidades de luz Entrega la luminancia promedio de la escena o en un punto dentro de ella Puede ser calibrado con un luminancímetro Entrega archivo de imagen en falso color	Sólo es compatible con archivos de imagen de formato RAW.
Fusion Optix	Es fácil de operar en dispositivos móviles Es útil en diferentes intensidades de luz Entrega archivo de imagen en falso color	No puede ser calibrado con luminancímetro No entrega el promedio de luminancias o en un punto dentro de la escena
Lumin	Es fiable en diferentes intensidades de luz Entrega la luminancia promedio de la escena o en un punto dentro de ella Puede ser calibrado con un luminancímetro	No entrega imágenes en falso color, pero si en escala de grises

Tabla 7. Tabla comparativa del análisis de los tres softwares de luminancias.

Aftab Alpha y Lumin son los programas con resultados más fiables ya que pueden ser calibrados con un punto de referencia medido con un luminancímetro. Aftab Alpha software fue elegido para hacer las mediciones en los casos de estudio ya que entrega una imagen en falso color que indica los valores de luminancia de las superficies, aunque sólo procesa fotos en formato RAW (ver anexo 3).

Observación.

La segunda etapa sirve para identificar que los espacios escogidos como casos de estudio cumplan con los criterios de selección señalados anteriormente. La observación permite reconocer si el nivel de luz es alto o bajo, distinguir los colores de luz que se pueden apreciar a simple vista, identificar los recorridos dentro del espacio y definir los puntos de medición en el recorrido. Además, se observan las funciones de los usuarios del espacio para registrar las tareas visuales que realizan.

En primer lugar, se debe de hacer un plan de visita previamente que consiste en:

- Obtener los planos del lugar.
- Disponer de un teléfono móvil inteligente que permita hacer fotos, medir el tiempo, etc.
- Descargar dos App en el teléfono móvil para hacer mediciones de iluminancia y luminancia.
- Agendar una visita con autorización para hacer fotografías.
- Anotar el día y la hora en que se empieza el recorrido.

En segundo lugar, se hace un recorrido por el espacio de manera intuitiva, es decir, sin hacer fotografías ni mediciones de luz con el teléfono, tan sólo midiendo el tiempo que tomará hacer el recorrido completo del espacio. Mediante la observación se puede responder a las interrogantes: ¿Cómo es el espacio?, ¿Cómo es su recorrido?, ¿Cuáles son las actividades relacionadas a la visión que existen ahí?, ¿Cómo es el diseño lumínico?, ¿Cuál es el nivel de luz?, ¿Cuáles son las características más notables de la luz?, ¿Qué relación hay entre el uso de la luz y el uso del espacio?, ¿Cuáles serían los posibles puntos de medición de luz? etc. Todas estas preguntas serán resueltas siempre que el observador tenga una experiencia inmersiva y una mirada crítica del espacio.

Por último, se hace otro recorrido del espacio, pero esta vez con la debida atención para intentar dar respuesta a las preguntas que se generaron en el primer recorrido. Se considera como ingreso el acceso desde la calle. Iniciamos nuevamente el recorrido identificando la circulación principal y marcando en el plano la ruta a seguir. La manera en la que recorremos y observamos el espacio nos dará pautas de la información visual que recibimos. Se debe de identificar cuáles son las actividades relacionadas a la visión. Algunas de estas actividades son comunes a todos los espacios, tales como orientarse en el espacio y caminar. Otro tipo de tareas visuales son más específicas como por ejemplo leer, ver con detalle un objeto, etc. También se anotarán los materiales y colores de los que están hechas las superficies que son parte de esas tareas identificadas. A lo largo del recorrido notaremos que cada una de esas actividades visuales están acompañadas por un cambio, a veces sutil y otras evidente, en la manera de iluminar las superficies que dan información visual al usuario. Cada uno de esos cambios lumínicos deben ser señalados en el plano con el fin de definir los puntos de medición para la siguiente etapa. Como primer acercamiento a la luz es importante observar si es un espacio iluminado con luz natural, artificial o mixta. Si existen fuentes de luz artificiales intentaremos distinguir si emplean diferentes temperaturas de color. Es importante calificar si nos encontramos en un espacio de baja intensidad lumínica o no. Para ello, nos guiaremos principalmente por la comparación con nuestras experiencias pasadas; pero, además, tomaremos una medida de iluminancia y luminancia como referencia hecha con una aplicación de teléfono. La ubicación del teléfono, para la medición de la iluminancia, será en un lugar transitable de la sala y a 90 cm del suelo; mientras que, para medir la luminancia se tomará una fotografía a nivel de la vista y enfocando la escena con mayor luminosidad que encontremos.

Medición.

Si en la etapa anterior se constata que el espacio cumple con los tres requisitos para ser considerado como caso de estudio, entonces se realizará la campaña de mediciones de luz. La tercera etapa consiste en cuantificar con precisión tres magnitudes de la luz: la iluminancia, la luminancia y la temperatura de color.

La iluminancia que proviene de las diferentes lámparas dentro de un espacio se mide con un luxómetro. La medida se toma en cada uno de los puntos de medición identificados anteriormente. El luxómetro se coloca a una altura de 90 cm del suelo transitable. Como nos encontramos en espacios en donde los valores de iluminancia serán muy bajos, es recomendable que la persona que toma las medidas vista de colores oscuros para no alterar el resultado de la medición. Si el nivel de la luz en todos los puntos de medición es menor a 35 lux entonces tenemos un primer parámetro indicador de que es un espacio de baja intensidad lumínica, sin embargo, es necesario corroborarlo con el análisis que se obtiene con la siguiente medición.

La luminancia de una superficie se mide con un luminancímetro. Encontrar el valor de luminancias de cada una de las superficies en el campo visual es una tarea difícil de lograr si no es porque se utiliza también una cámara fotográfica réflex, un trípode y un software de procesamiento de imágenes. Primero se ubica la parte superior del trípode, donde se apoya la cámara, a una altura de 1.50m. La cámara fotográfica, se ajusta en el trípode, con el lente orientado hacia la escena que se desea fotografiar y en un plano perpendicular al suelo. El lente que se utiliza es un ojo de pez ya que permite la visión en 180° de la escena, que se asemeja más al ángulo que alcanza la visión periférica en el ser humano. Delante y en paralelo al lente de la cámara se fija una hoja gris, con coeficiente de reflexión de 0.25, a una distancia entre 1m y 3m y a una altura de 1m. El luminancímetro sirve para medir un punto referencial sobre la cartulina gris en cada uno de los puntos de medición. Además, se toma otra medida en un punto sobre la superficie más iluminada en el campo visual. Se realiza una sesión fotográfica en cada punto de medición que consiste en la toma de tres fotografías con diferente tiempo de exposición. Se programa la cámara para que capture de forma automática tres imágenes de la escena a estudiar con una diferencia de dos pasos de tiempo entre cada una de las exposiciones. La cámara también debe estar programada para que las imágenes que capture sean en formato RAW y en JPG o, en su defecto, sólo en formato RAW. Cada sesión fotográfica se somete posteriormente a un software para obtener una foto en High Dynamic Range (HDR) y en falso color. El software escogido, en la primera etapa, para hacer el análisis es el Aftab Alpha. El software va a requerir conexión a internet y la licencia de uso activada. Una vez instalado se deben subir las tres imágenes en formato RAW de cada una de las sesiones fotográficas y crear una imagen en HDR. Luego se abre la imagen en HDR en el mismo software y dentro de la imagen se selecciona un pixel en el área de la hoja gris para asignarle el valor de la primera luminancia que hemos tomado durante la campaña de mediciones. La segunda luminancia tomada, en la sesión de fotos, nos permite determinar el valor máximo de la escala de luminancias. Nos aseguraremos de usar la misma escala en todas las sesiones de fotos para poder hacer un estudio comparativo. Además, se elige la escala logarítmica porque nos muestra con mayor detalle el valor de las luminancias más bajas. Finalmente se puede procesar la imagen HDR para obtener la imagen en falso color.

La temperatura de color se puede obtener con la información técnica de cada una de las fuentes de luz o con la información proporcionada por un espectrómetro bajo cada una de las fuentes de luz.

Resultados y análisis.

La cuarta etapa consiste en reunir toda la información obtenida en las etapas anteriores para analizar y determinar de qué manera se emplea la luz para facilitar la visión en espacios de baja intensidad lumínica. Los resultados y el análisis de ellos se detallan en los siguientes pasos.

En primer lugar, se agrupan las superficies dentro del campo visual en conjuntos que signifiquen diferente información visual para el usuario. Cada uno de estos conjuntos reúne superficies que sirven para realizar actividades en donde la visión juega un papel fundamental. Por ejemplo, en todos los espacios encontraremos superficies que nos orientan o que nos permiten caminar; sin embargo, hay otro tipo de funciones que dependerán del tipo de espacio, tales como leer, comer, trabajar, etc. Todos los conjuntos de superficies deben ser descritos por su materialidad, es decir, el tipo de reflexión o transmisión de la superficie, el color, la textura, la rugosidad y la opacidad. En el caso de que los conjuntos de superficies estén directamente iluminados se debe identificar las fuentes de luz y sus características de color.

En segundo lugar, se debe de relacionar el valor de las luminancias con los conjuntos de superficies definidos en el paso anterior. En algunos casos veremos un claro contraste de luminancias entre conjuntos de superficies, pero en otros casos la diferenciación puede ser menos evidente ya que los conjuntos de superficies pueden abarcar un rango amplio de luminancias.

En tercer lugar, se identifica si cada uno de los conjuntos de superficies tiene algún tipo de iluminación específica o si se encuentran iluminados como consecuencia de las múltiples reflexiones de luz dentro del espacio. Cuando se observen superficies que están iluminadas intencionalmente por una fuente de luz, se debe de asociar el conjunto al que pertenece con el nivel de temperatura de color que tiene asignado.

En cuarto lugar, se elabora un gráfico que sintetice la información obtenida de todas las sesiones de fotos. El gráfico debe mostrar los valores de luminancia mínimo, medio y máximo. Los valores mínimos se indican en color gris claro y los valores máximos en color gris oscuro, mientras que, los valores medios se resaltan en color rojo por ser los valores predominantes en la escena. La información gráfica sirve para determinar si el observador se encuentra dentro de los márgenes de la visión escotópica, por ende, si el espacio corresponde a un diseño de baja intensidad lumínica.

En quinto lugar, se relacionan gráficamente los valores de luminancias y la temperatura de color correspondiente a cada uno de los conjuntos de superficie identificados. La simbología a utilizar para diferenciar cada uno de los grupos va a ser por formas geométricas básicas: cuadrado, círculo y rombo. En el eje de las abscisas se encontrarán las luminancias y en el eje de las ordenadas pondremos los valores de temperatura de color.

En sexto lugar, se hace una interpretación de los resultados obtenidos para cada caso de estudio. Identificamos los parámetros de la luz considerados en el diseño lumínico y observamos que relación tienen entre ellos. La finalidad es señalar como influyen estos parámetros en la visibilidad de la escena cuando nos encontramos en espacios de baja intensidad lumínica.

Por último, se busca integrar todos los resultados en un gráfico. Para diferenciar entre casos de estudio se utilizará diferentes colores en la simbología. Este gráfico comparativo permitirá sacar conclusiones transversales a todos los casos de estudio.



Figura 62. Museo de Badalona. Joan Mayné - ILM BCN. 2010. <https://web.ilmbcn.com/exposicions-permanents>

“La museografía que ensayamos fue cambiar la iluminación de esto e intentar borrar el edificio moderno, y centrar la atención sobre los restos arqueológicos, sólo, y plantearlo como una especie de inmersión en una atmosfera del pasado, de otro tiempo...”

Joan Mayné (2020)

3.2 Casos de estudio.

Museo de Badalona: La Ciudad de Baetulo



Figura 63. Museu de Badalona. Camil Pallàs i Arisa. 2010. Online: <https://ajuntament.badalona.cat/noticies/el-museu-de-badalona-ajorna-la-16a-edicio-del-festival-roma-magna-celebratio/>

El caso de estudio se encuentra en la ciudad de Badalona, cerca de Barcelona. El Museo de Badalona cubre 3400 m² de restos arqueológicos de la antigua ciudad romana. Los vestigios del Baetulo, nombre de la ciudad durante el periodo del imperio romano, fueron descubiertos en 1954 por el arqueólogo e historiador José María Cuyàs. Al año siguiente se creó la institución del museo por parte del Ayuntamiento de Badalona. Sobre los yacimientos arqueológicos se proyectó un nuevo edificio que albergaría tanto el recorrido museográfico, ubicado en el sótano del edificio, como las oficinas y el área de restauración e investigación, en las plantas superiores. El nuevo edificio, proyectado por el arquitecto Camil Pallàs i Arisa, responsable del Servicio de Conservación de Monumentos de la Diputación de Barcelona, fue inaugurado el 30 de enero de 1966. A mediados de los años setenta se inició un proceso de remodelación y ampliación para la realización de actividades más estrictamente de exposición. En 2010 se realizó una segunda remodelación donde se añadió al recorrido el yacimiento del Decumanus, con restos del cardo maximus y del decumanus maximus. Además, se planteó un nuevo proyecto de diseño de iluminación que se concibió como una inmersión en el interior de la antigua ciudad romana. El diseño de iluminación estuvo a cargo del arquitecto Jordi Moya y del museógrafo Joan Mayné, director del museo del 2004 al 2014 y principal impulsor y director de la reforma. En el año 2020, con motivo del décimo aniversario de la reforma museística, se realizó el mantenimiento y la renovación en la exposición permanente, lo que demuestra el continuo interés por mejorar la experiencia del usuario.

El diseño de iluminación.

La entrada al museo tiene acceso desde el vestíbulo del nuevo edificio. En el sótano se encuentra el centro arqueológico iluminado únicamente con luz artificial (ver figura 64). Al descender las escaleras hasta el piso del sótano, el nivel de luz desciende drásticamente. Toda la estructura de la nueva edificación se encuentra pintada de negro para absorber la luz reflejada por otras superficies; y, de esta manera, poder camuflar la disposición las columnas, los muros perimetrales y el techo del edificio nuevo. La circulación de la visita transcurre a través de un puente metálico cuya superficie está iluminada con una luz blanca fría que guía al visitante a través y sobre el sitio arqueológico, la fuente de iluminación está oculta en la estructura inferior del pasamanos. El puente de la pasarela está iluminado por Fortimo LEDFlex 2500lm/m 965 C5 G1 colocado debajo de la barandilla, que también sirve para conducir los cables de luz a cada panel de información. La intención de la iluminación en el puente metálico es permitir un recorrido seguro y al mismo tiempo enfatizar que el visitante del museo se desplaza por encima de las ruinas, sin pisarlas. Debajo del puente metálico se encuentran los restos de la antigua ciudad romana: muros, pavimentos y cimientos de edificaciones de la antigua Baetulo formados principalmente por ladrillos de color ocre, iluminados por una fuente de luz blanca cálida. El modelo de lámpara que se utilizó para iluminar la ciudad romana fue 5W (50W) GU10 Dimmable Spot blanco cálido, LED Philips, colocada a unos 50 cm de altura sobre el suelo. Finalmente, los paneles de información están hechos de un tablero de metacrilato transparente sobre la barandilla e iluminado por una luz blanca, de temperatura de color intermedia entre las dos fuentes de luz anteriores. El panel está iluminado por Fortimo LEDFlex 5m2000lm/m 840C10G1 oculto en un perfil metálico que sirve para sujetar el tablero de metacrilato.

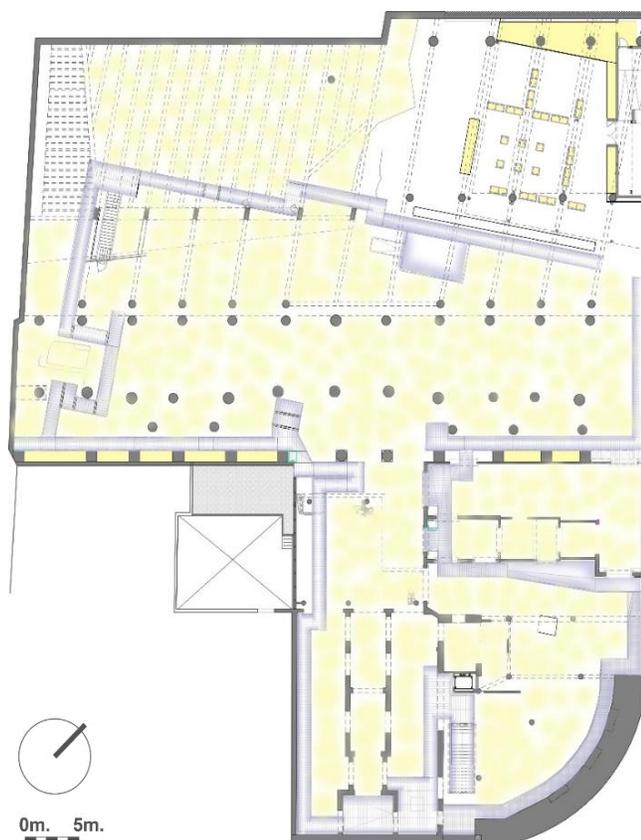


Figura 64. Planta sótano del Museo de Badalona

A continuación, se detallan los tres pasos de la metodología:

Paso 1: Observación.

Se han identificado tres recorridos consecutivos que corresponden al diseño del museo. Se han definido cien puntos de medición a lo largo de las tres rutas. Se definen treinta y un puntos de medición en la ruta A, veintinueve puntos en la ruta B y cuarenta puntos en la ruta C. (Figura 65). En la primera y la tercera ruta se observa la intención de mantener bajos niveles de luz. De esta forma, las vitrinas y la exposición en el segundo recorrido fueron descartados del estudio por tener un diseño de mayor intensidad lumínica.

En el caso de estudio se han observado cuatro conjuntos de superficies iluminadas de forma diferente: los pasillos del recorrido del visitante, los objetos expuestos (restos de edificios, mosaicos, pasarelas, vitrinas, expositores diversos, etc.), los textos explicativos escritos en paneles informativos; y, por último, el edificio contenedor del museo. En muchas situaciones, el visitante ve una escena en la que se superponen elementos pertenecientes a más de uno de estos conjuntos de superficies con valores de luminancia muy similares, incluso coincidentes. Este efecto dificulta la interpretación de la exposición ya que puede llevar a confundir la escena. Sin embargo, el diseño de iluminación asigna una fuente de luz con una temperatura de color diferente para cada actividad. El diseño lumínico utiliza tres tipos de lámparas debido a las diferentes intenciones de iluminación.

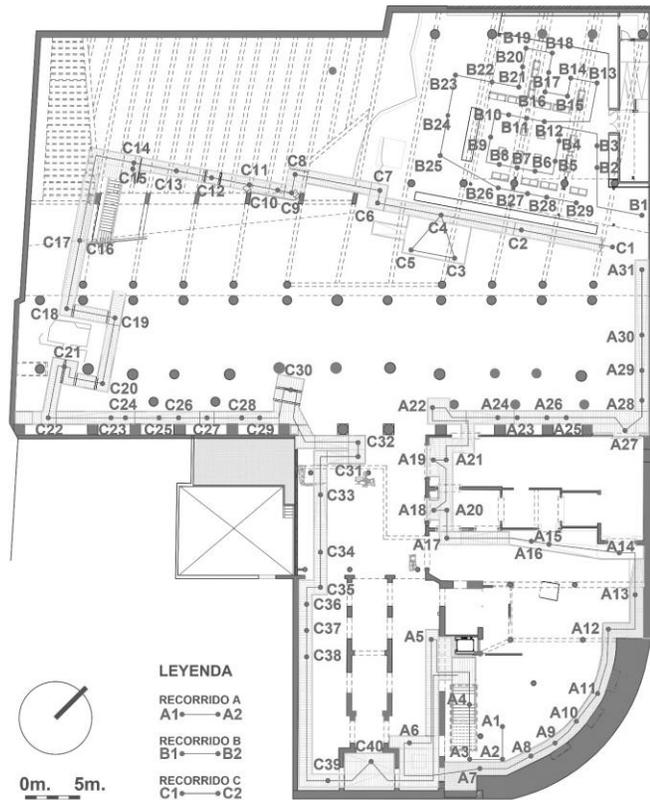


Figura 65. Recorridos en la planta del sótano

Paso 2: Medición.

Las medidas fueron tomadas en tres días consecutivos, del 19 al 21 de noviembre de 2020, comenzando en la apertura, a las 10h, y terminando a las 14 horas. Debido a que las ventanas se encuentran cubiertas para evitar el ingreso de luz natural, la campaña de mediciones de luz en todas las escenas estudiadas contempla únicamente las fuentes de luz artificial.

Las medidas de iluminancias son útiles para saber el valor de la intensidad de luz en el plano en el que se desplazan las personas. El luxómetro se colocó a dos alturas diferentes, primero, en el centro de la pasarela y sobre la superficie metálica, a la altura de los pies del usuario, y luego sobre la barandilla del puente metálico, una altura de 0.9 m por encima de la ubicación anterior. Se anotaron las medidas de iluminancia en cada uno de los puntos señalados en el plano anterior. Los valores en el nivel inferior se mantienen en un nivel de 5 lx, mientras que en el nivel superior oscilan entre 0 lx y 5 lx. Los valores de iluminancia sirvieron para comprobar que el caso de estudio corresponde a un espacio de baja intensidad lumínica. Además, se verificó que el nivel de luz sobre las ruinas y las piezas encontradas en los restos de la ciudad romana están suficientemente iluminadas, para evitar daños por radiación, con un valor máximo de 50 lx en la superficie más cercana a la fuente de luz. De acuerdo con las recomendaciones de la CIE de límites de exposición para diferentes materiales, la limitación de iluminancia para materiales de baja capacidad de respuesta (poco sensibles a la luz) son 200 lx o 600 000 lx.h/año, mientras que para materiales muy sensibles a la luz se limita en 50 lx.

Considerando la temperatura de color, se obtuvo la información de cada una de las diferentes fuentes de luz y se encontró lo siguiente:

- Lámparas GU10, utilizadas para iluminar el recinto de la ciudad romana, cuenta con temperatura de color de 2700 K.
- Lámpara Fortimo LEDFlex 840 C10 G1, usada para iluminar los paneles informativos, tiene temperatura de color de 4000 K.
- Lámpara Fortimo LEDFlex 965 C5 G1, empleada para iluminar la pasarela, cuenta con temperatura de color de 6500 K.

Al respecto de las luminancias se ha tomado la medida sobre una hoja gris que fue colocada, en la mayoría de los casos, en la barandilla del puente metálico y orientada frente a la cámara fotográfica. La cámara estuvo sobre un trípode a una altura de 1.50m y a una distancia de 1m de la barandilla y, por ende, también de la hoja gris. En seguida se tomaron una serie de fotografías en cada uno de los puntos de medición. Se programó la cámara para que realice tres fotografías de la misma escena con una diferencia de dos pasos entre cada uno de los tiempos de exposición. Por tanto, se obtuvieron las fotos de la escena subexpuesta, central y sobreexpuesta. Se procesaron las fotos con el software Aftab Alpha para obtener imágenes en HDR y falso color. El análisis nos permite ver que la escala de valores de luminancia de las superficies que reflejan la luz está entre 0 cd/m² y 11 cd/m². Sin embargo, hay algunos valores de luminancia superiores a 11 cd/m² que corresponden a reflejos puntuales o a la fuente de luz directa. Además, es importante notar que la luminancia promedio está entre 0.3 cd/m² y 0.8 cd/m². Para este trabajo, se seleccionaron cuatro imágenes para ser analizadas debido a los patrones repetidos de luminancia encontrados en el museo. Estas imágenes permiten enfocar los cuatro conjuntos de superficies iluminadas (el puente de la pasarela, los objetos expuestos, los paneles informativos y el contenedor del museo) al mismo tiempo.

A continuación, la selección de fotografías:

Ruta A, punto 7

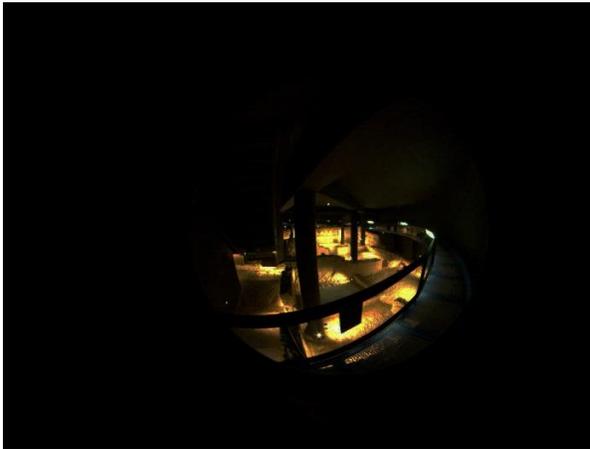


Imagen subexpuesta



Imagen central



Imagen sobreexpuesta

Ruta C, punto 1



Imagen subexpuesta



Imagen central



Imagen sobreexpuesta

Ruta C, punto 21



Imagen subexpuesta



Imagen central

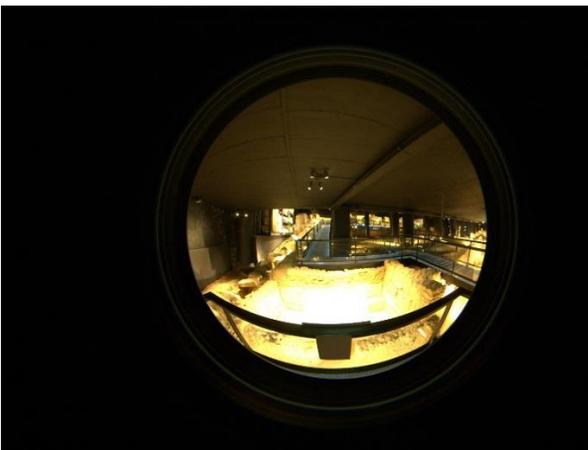


Imagen sobrepuesta

Ruta C, punto 33



Imagen subexpuesta



Imagen central



Imagen sobrepuesta

Paso 3: Resultados.

Se midieron cien puntos dentro del recorrido del museo. La serie completa de fotografías puede verse en el anexo 4 del presente trabajo. Se eligieron cuatro puntos de medición para mostrar en este apartado. Cada fotografía fue tomada con un lente ojo de pez que muestra todas las superficies que se pueden percibir en el campo visual. La primera sesión fotográfica nos muestra uno de los lugares donde la ruta se ensancha e invita a detenerse y contemplar una de las zonas más iluminadas dentro de la ciudad romana. La segunda sesión fotográfica nos muestra cómo el camino pasa sobre las ruinas, claramente diferenciado por el color de la luz a pesar de tener una menor intensidad lumínica. La tercera sesión fotográfica muestra las cartelas de información con luz más fría que las ruinas romanas. Las cartelas son de metacrilato transparente ubicadas sobre la baranda y delante de las ruinas romanas. Finalmente, la cuarta sesión fotográfica ilustra todo el circuito, la antigua arquitectura romana está iluminada con luz cálida y el moderno edificio que soporta los niveles superiores del museo está oculto por efecto de la oscuridad.

Las Figuras 66, 68, 70 y 72 corresponden a las imágenes en HDR seleccionadas para presentar este estudio de baja intensidad lumínica. Cada imagen en HDR también muestra el color de las superficies iluminadas con diferente temperatura de color. En las figuras 67, 69, 71 y 73; se muestran los valores de luminancia en escala de color de 0 cd/m² a 11 cd/m². Además, se muestra el valor de luminancia medio, el valor de luminancia mínimo y el valor de luminancia máximo.

En la fase de observación se han identificado cuatro conjuntos de superficies iluminados de forma diferente. Cada uno de estos grupos de superficies corresponde con una actividad distinta. El primer conjunto de superficies, compuesto por el contenedor del museo que se percibe gracias a la luz reflejada por las otras superficies iluminadas, permite vislumbrar los límites dentro del recinto. El segundo conjunto de superficies, formado por la pasarela metálica, proporciona al usuario una superficie segura por la cual caminar sobre los restos arqueológicos. El tercer grupo, las ruinas romanas, significan para el usuario las superficies de mayor interés para observar y comprender el discurso museográfico. El último conjunto de superficies, los paneles de información transparente, facilitan la lectura de la información escrita y gráfica.

En este análisis podemos observar que cada uno de los grupos de superficies se intenta diferenciar con un rango de luminancia distinto. Como en ocasiones los valores de luminancias de los diferentes grupos de superficies se superponen entre sí, se resuelve utilizando lámparas con diferentes temperaturas de color:

- El primer grupo de superficies, el contenedor del museo, está entre 0 cd/m² y 0,3 cd/m². El valor medio de luminancia es 0.1 cd/m². No se ilumina directamente.
- El segundo conjunto, la pasarela, tiene valores de luminancia entre 0,3 cd/m² y 0,9 cd/m². El valor medio de luminancia es 0.6 cd/m². Iluminado con T.C. de 6500 K
- El tercer grupo, las ruinas romanas, tienen valores de luminancia entre 0,9 cd/m² y 11 cd/m². El valor medio de luminancia es 7 cd/m². Iluminado con T.C. de 2700 K.
- La cuarta familia de superficies, los paneles informativos, presentan luminancia entre 8,7 cd/m² y 11 cd/m². El valor medio de luminancia es 9 cd/m². Iluminado con T.C. de 4000 K.



Figura 66. HDR en punto de medición A-7

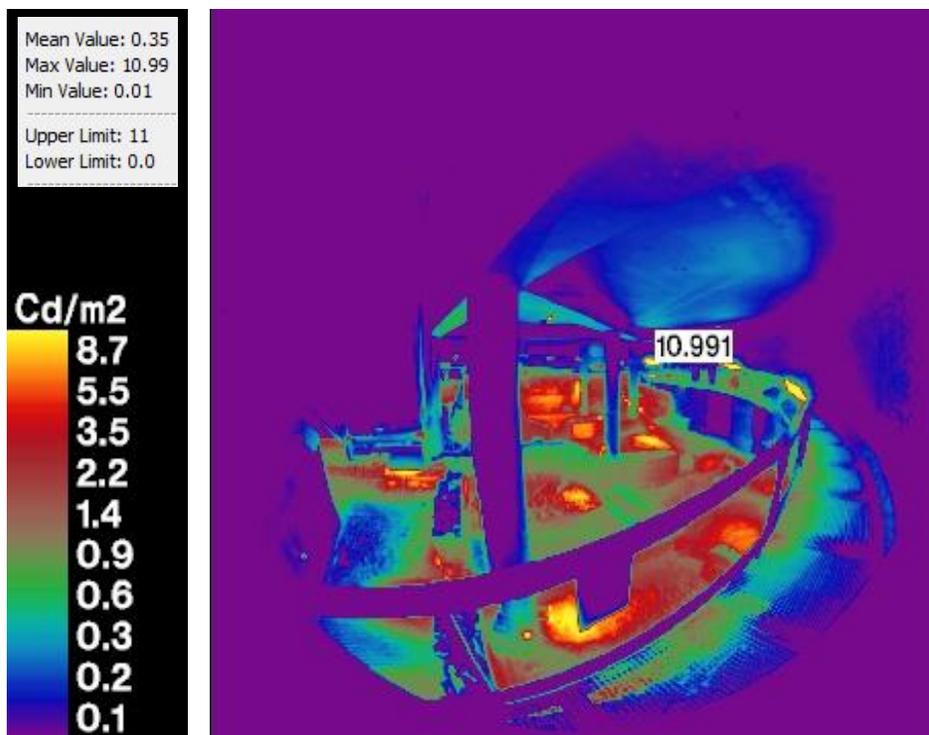


Figura 67. Imagen Falso color en punto de medición A-7



Figura 68. HDR en punto de medición C-1

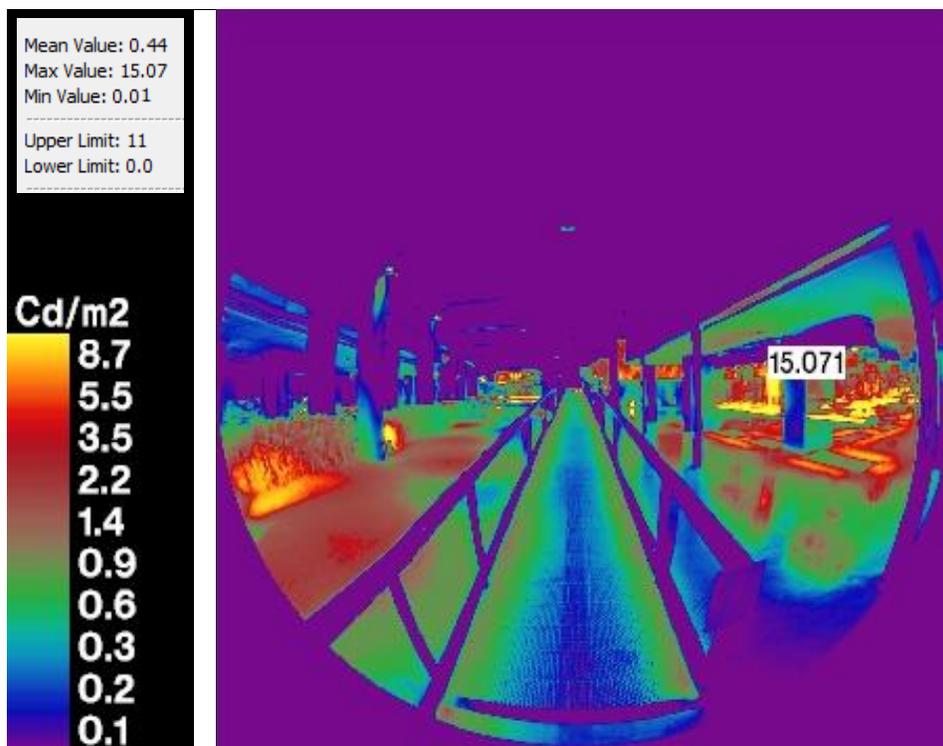


Figura 69. Imagen Falso color en punto de medición C-1



Figura 70. HDR en punto de medición C-21

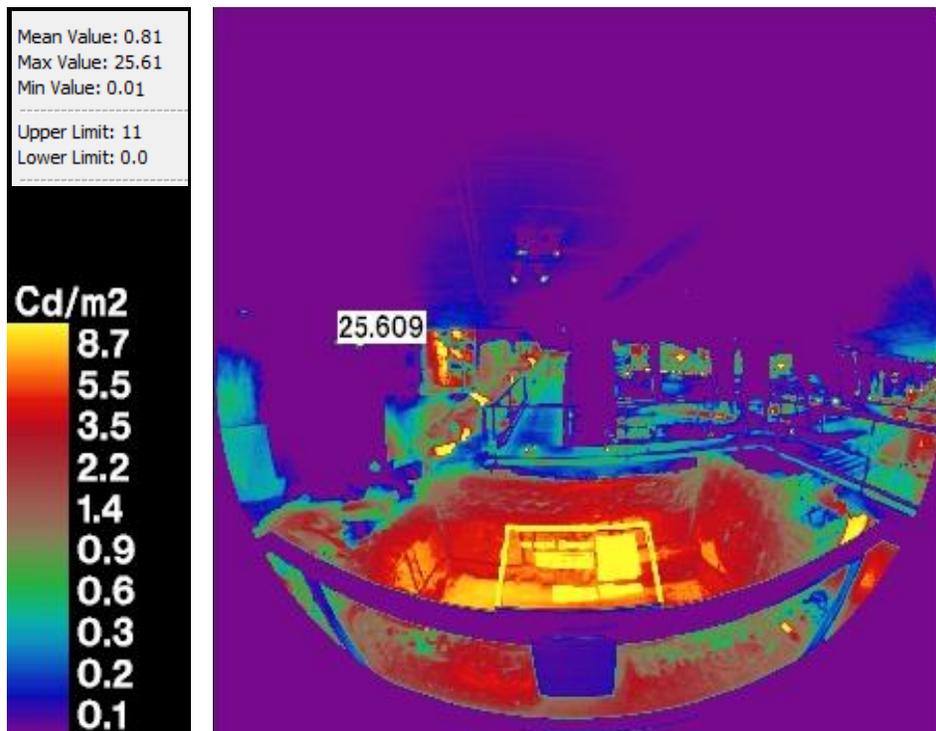


Figura 71. Imagen Falso color en punto de medición C-21



Figura 72. HDR en punto de medición C-33

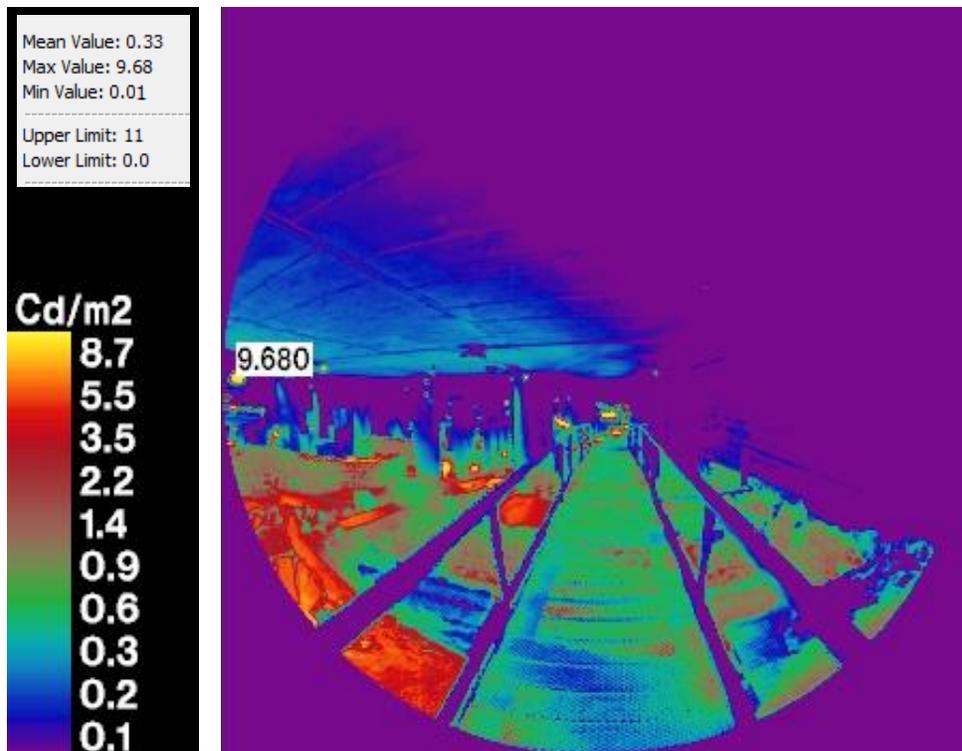


Figura 73. Imagen Falso color en punto de medición C-33

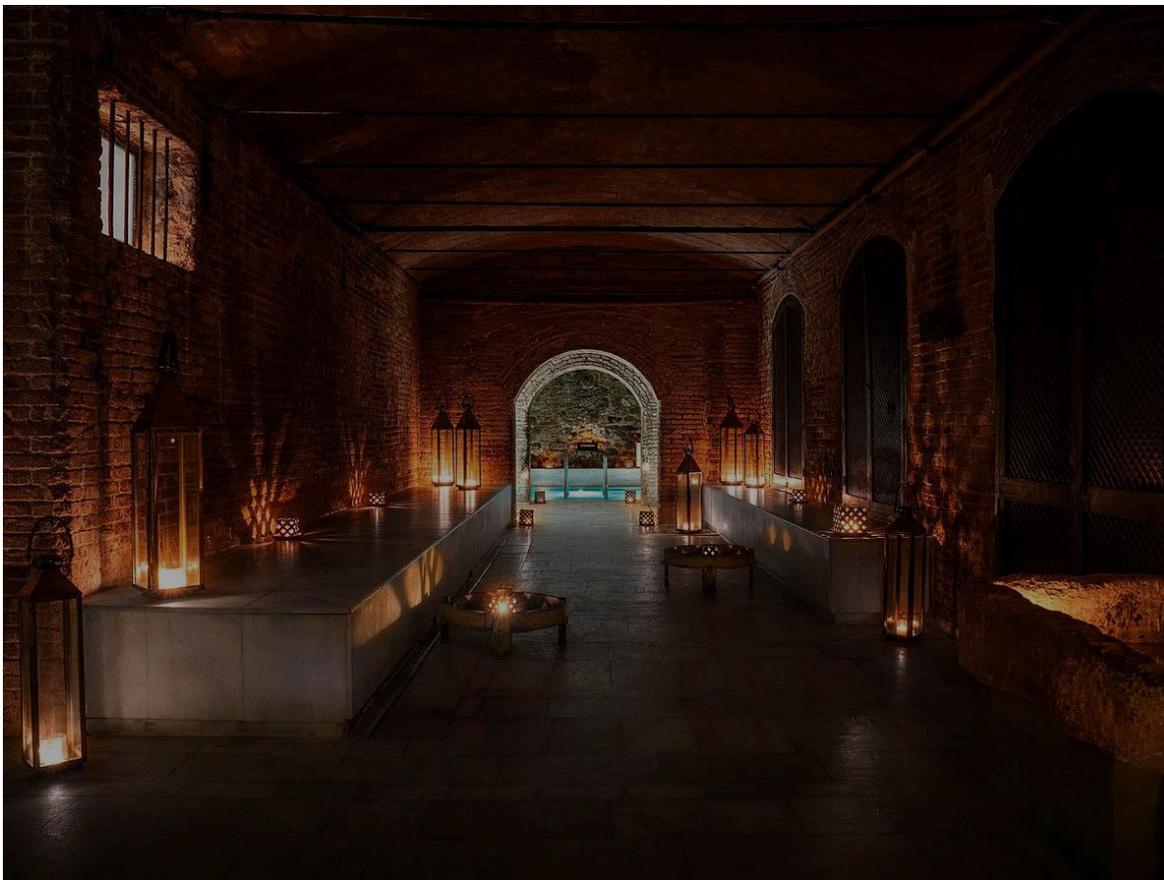


Figura 74. Aire Ancient Bath. Pegenaute, P. 2008. <https://beaire.com/es/aire-ancient-baths-barcelona>.

“Hemos querido que el agua sea como joyas brillando y que esta luminosidad se transmita de forma indirecta a todo el espacio circundante.”

Sergi Balaguer, citado por Pablo Andulce (2015)

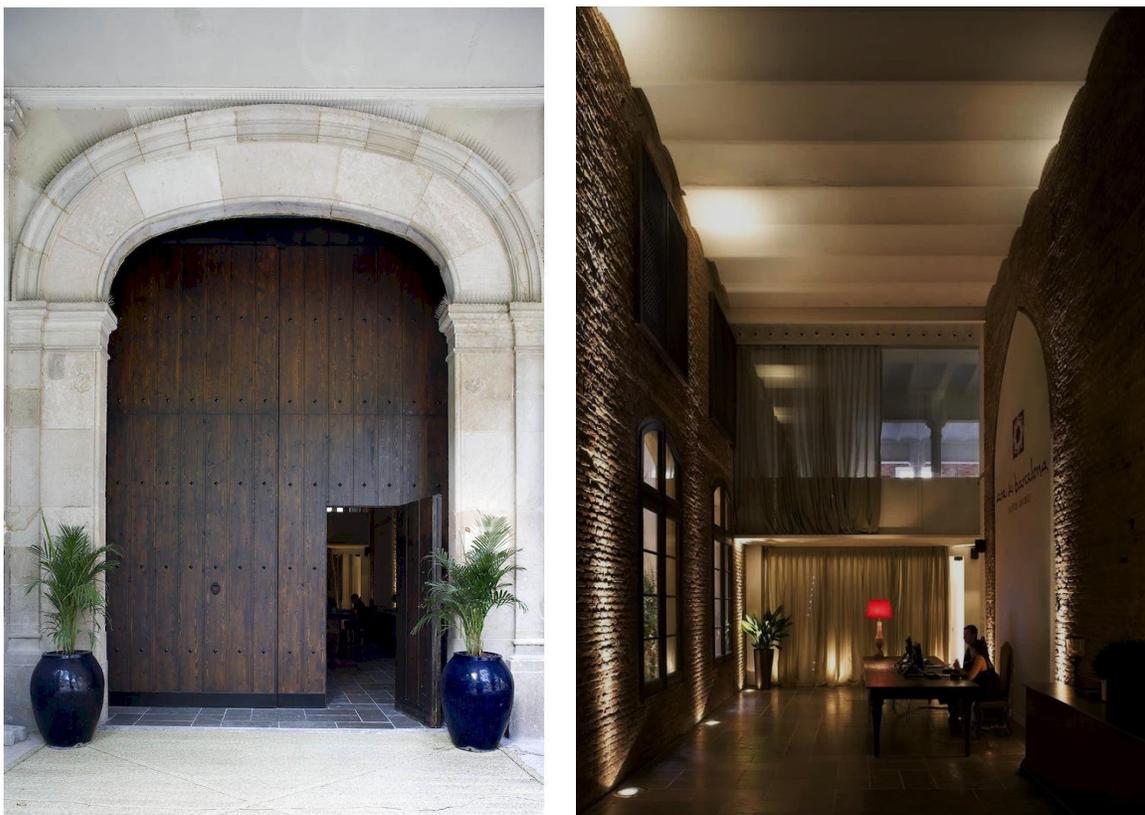
Aire: Ancient Bath

Figura 75 Izquierda: el portón de ingreso. Derecha: la recepción. Pegenaute, P. 2008. <https://www.pedropegenaute.es/>

El balneario urbano, llamado Aire, se encuentra ubicado en un antiguo almacén de principio del siglo XIX, entre el Mercado de El Born y el Parque de la Ciudadela en el antiguo barrio de la Ribera, en la ciudad de Barcelona. El proyecto estuvo a cargo del estudio de arquitectos Alonso y Balaguer en el año 2008. La propuesta consiste en la rehabilitación arquitectónica de un edificio histórico en desuso y la construcción de unos baños termales inspirado en las antiguas civilizaciones. El principal objetivo fue crear un espacio que sirva como refugio, dentro de la ciudad, para relajar el cuerpo y la mente. Con el fin de lograr este objetivo se pone énfasis en el estímulo de los sentidos; para ello, se utilizaron distintas temperaturas para el tacto; sombras y luces para la vista; sonidos de agua y música para los oídos; aromas para el olfato e infusiones servidas en teteras para el gusto. Los arquitectos idearon un proyecto en el que el agua debía ser el protagonista del espacio, por tanto, decidieron que la iluminación con velas y el uso de la penumbra en el recorrido del recinto ayudaría a resaltar los vasos de las piscinas de agua que estarían iluminados para brillar “como joyas”.

El proyecto se desarrolla en tres plantas con una circulación clara que permite, de forma paulatina, descubrir todos los espacios que Aire ofrece, agrupando los baños termales, el cuarto de vapor y las zonas de relax en el sótano (figura 76); el vestíbulo, vestuarios y aseos en la planta baja (figura 77); y la zona de masajes en el entresuelo (figura 78). Tanto la iluminación como el recorrido son dos factores importantes en el diseño del proyecto puesto que se proponen conducir al visitante hacia un estado de calma.



Figura 76. Planta sótano. Alonso y Balaguer. 2008. <https://abaa-arq.com/proyectos/aire-ancient-baths>



Figura 77. Planta baja Alonso y Balaguer. 2008. <https://abaa-arq.com/proyectos/aire-ancient-baths>



Figura 78. Planta entresuelo. Alonso y Balaguer. 2008. <https://abaa-arq.com/proyectos/aire-ancient-baths>

Diseño de iluminación.

El diseño lumínico se estructura con un recorrido que empieza en la entrada al local en planta baja. La entrada se produce a través del pórtico que soporta el edificio y sirve también de transición lumínica entre el exterior y el interior. El vestíbulo, de doble altura, está iluminado en parte mediante el paso de luz natural por el ingreso del portón de madera, pero sobre todo por fuentes de luz empotradas en el pavimento, destacando así, desde el inicio del recorrido, la rugosidad de las paredes y las curvaturas del techo original. A continuación, se atraviesa un pasadizo que nos conduce a los vestuarios iluminados con fluorescentes suspendidos del techo y, en el caso del vestidor femenino, por ventanales con luz natural. Es en este punto donde tiene fin el diseño de espacios muy iluminados y empieza el diseño de baja intensidad lumínica. La salida de los vestuarios conecta con el espacio de la escalera en donde la mayor parte de las superficies están pintadas de negro; la luz proviene de unas velas sobre el pavimento y de unas luminarias de luz cálida, empotradas en cada uno de los escalones. Al descender por las escaleras se percibe un gran espacio conformado principalmente por fábricas de piedra o ladrillo con arcos de medio punto. Una arquitectura propia de los antiguos almacenes de los edificios del s. XIX. Estos muros rugosos y los techos abovedados se iluminan por velas que permiten vislumbrar los límites del espacio. Además, la disposición de las velas insinúa el recorrido que el visitante debe de hacer para ir descubriendo cada uno de los subespacios con diferentes baños termales y áreas de relajación. Los estanques de agua cuentan con un tipo de iluminación distinta, ya que refractan la luz de las lámparas LED dispuestos en su interior. Las lámparas que iluminan las piscinas están empotradas en las paredes del vaso y emiten una luz fría que contrasta con la luz cálida de las velas. Las piscinas están revestidas con piedra caliza blanca y los pasamanos de apoyo para la entrada en las piscinas son de acero inoxidable.



Figura 79. Interior de los baños termales. Pegenaute, P. 2008. <https://www.pedropegenaute.es/>

A continuación, se detalla la metodología aplicada:

Paso 1: Observación

En primer lugar, se observó que el balneario urbano Aire cumplía con los tres requisitos para ser seleccionado en el estudio: Contar con un diseño de baja intensidad lumínica, utilizar diferentes temperaturas de color en el diseño lumínico y tener un diseño espacial ideado en torno al recorrido que debe realizar el usuario de estas instalaciones.

En segundo lugar, se han identificado tres recorridos consecutivos que corresponden a diferentes actividades del usuario. El primer recorrido, en la planta baja, corresponde a los espacios de preparación que permitirán al visitante el uso de los baños termales, tales como la recepción, los vestuarios y los aseos. Este primer recorrido cuenta con un nivel de iluminación alto debido a que las actividades que allí se realizan precisan de una visión detallada de las superficies. El segundo recorrido, en la planta del sótano, corresponde a los espacios propiamente relacionadas a los baños termales y tratamientos terapéuticos, que utilizan bajos niveles de iluminación. Por último, en la planta entresuelo, el espacio también cuenta con poca luz y el recorrido nos dirige a unos compartimentos con camillas para masajes y descanso.

Finalmente, se seleccionó el segundo recorrido para el análisis ya que tiene bajos niveles de luz, un recorrido más largo dentro del espacio y utiliza diferentes temperaturas de color en su diseño lumínico. En la planta sótano se identificaron cuatro puntos de observación, aptos para realizar las mediciones lumínicas. El primer punto nos muestra una sala que conduce a las piscinas. Esta sala está iluminada por velas a ambos lados a lo largo del recorrido. El segundo punto de medición se ha hecho cerca de las piscinas. El tercero muestra la zona de descanso iluminada principalmente por la luz cálida de las velas; sin embargo, se aprecia también una superficie retroiluminada con una temperatura de color ajena al resto de luces y que indica la zona de servicio. Finalmente, el cuarto punto se sitúa en la zona de tratamientos terapéuticos.

A continuación, en la planta sótano, donde se hicieron las mediciones, se señalan los cuatro puntos de observación llamados P1, P2, P3 y P4, siguiendo el orden del párrafo anterior.

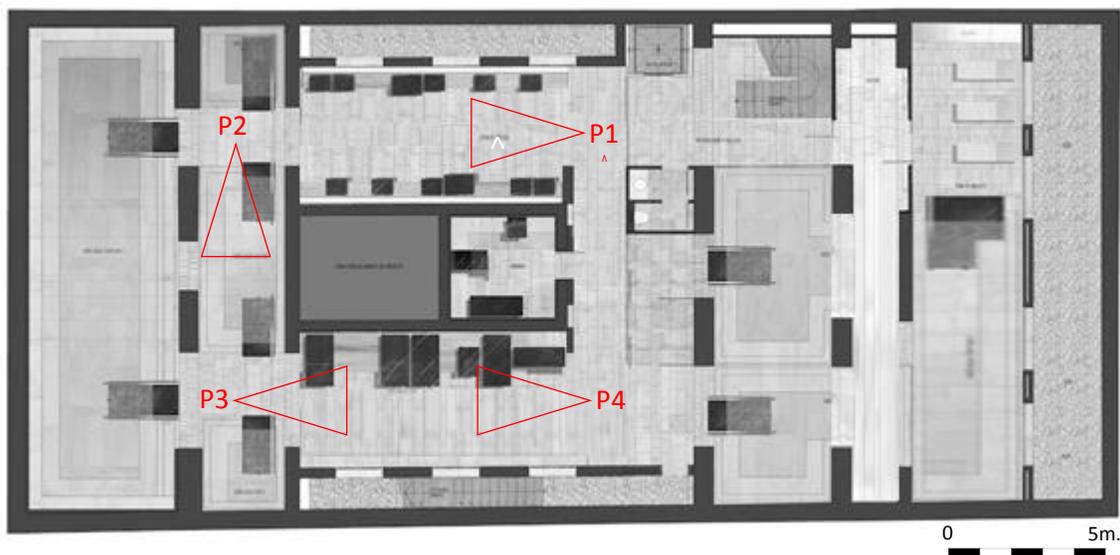


Figura 80. Planta sótano con puntos de medición.

Paso 2: Medición.

Todas las mediciones fueron tomadas el día 26 de julio de 2021, comenzando a las 8:30h, antes de la apertura del local. Debido a que en el sótano no existen ventanas hacia el exterior, la luz natural queda restringida tan solo a la planta baja y por tanto la planta sótano, donde se realizaron las mediciones, está enteramente iluminada por fuentes de luz artificial.

La tarea en esta etapa consistió en obtener los datos de iluminancias, temperaturas de color y luminancias de las superficies en cada una de las escenas seleccionadas.

Las medidas de iluminancias se tomaron con un luxómetro en cada uno de los cuatro puntos señalados en el plano anterior y situados a una altura de 0.9m por encima del suelo. Los valores de iluminancia oscilan entre 0 lx y 1 lx. Los valores de iluminancia sirvieron para corroborar que el caso de estudio corresponde a un espacio de baja intensidad lumínica.

Al respecto de la temperatura de color, se obtuvo la información técnica de cada una de las diferentes fuentes de luz y se encontró lo siguiente:

- Las velas, utilizadas para iluminar el recinto, cuentan con temperatura de color de 1850 K.
- Lámpara CorePro LED spot 35W, usada para iluminar las piscinas, tiene temperatura de color de 4000 K.

Las medidas de luminancias se hicieron con la ayuda de un luminancímetro. Se tomaron las medidas en las siguientes superficies: la hoja gris, colocada en los cuatro puntos de observación, y las piscinas, debido a que contaban con mayor nivel de luminancia aparente dentro del espacio. Para obtener la luminancia de todas las superficies es necesario recurrir al uso de una cámara fotográfica réflex y un trípode para capturar imágenes digitales en los puntos de observación y posteriormente procesarlas con un software de iluminación. La medida de luminancia sobre la hoja gris se utiliza para tener un punto de referencia dentro de la escena visual fotografiada, esta referencia sirve para ajustar posteriormente la escala de luminancia de la escena fotografiada. El trípode con la cámara se ubicó en cada uno de los puntos de medición y en la dirección que muestra el plano (figura 80). La cámara fotográfica estuvo sobre el trípode a una altura de 1.50 m y, en la mayoría de los casos, la hoja gris estuvo frente a la cámara fotográfica a una distancia de 1.50 m. A continuación, se hizo una serie fotográfica en los cuatro puntos identificados en la etapa de observación. La cámara fue programada para hacer tres fotografías de la misma escena con una diferencia de dos pasos en el tiempo de exposición entre cada una de las fotografías. Por tanto, se obtuvieron las fotos de la escena subexpuesta, central y sobreexpuesta. Las fotos fueron procesadas con el software Aftab Alpha para obtener imágenes en HDR y falso color. La imagen en falso color nos permite ver que la escala de valores de luminancia de las superficies que reflejan la luz está entre 0 cd/m² y 11 cd/m²; sin embargo, es importante anotar que la luminancia más alta, en algunos puntos de la piscina, es de 12 cd/m². Además, hay algunos valores de luminancia superiores a 11 cd/m² que corresponden puntualmente a una de las fuentes de luz orientadas a la cámara fotográfica. En este caso de estudio, no se pudieron realizar más fotografías debido al acotado tiempo, sin embargo, las cuatro series de fotos sirven para el análisis debido a los patrones repetidos de luminancia encontrados en el recinto de los baños termales. Las imágenes permiten evaluar los dos conjuntos de superficies iluminadas al mismo tiempo.

A continuación, la selección de fotografías:

Punto 1



Imagen subexpuesta

Punto 2



Imagen subexpuesta



Imagen central



Imagen central



Imagen sobreexpuesta

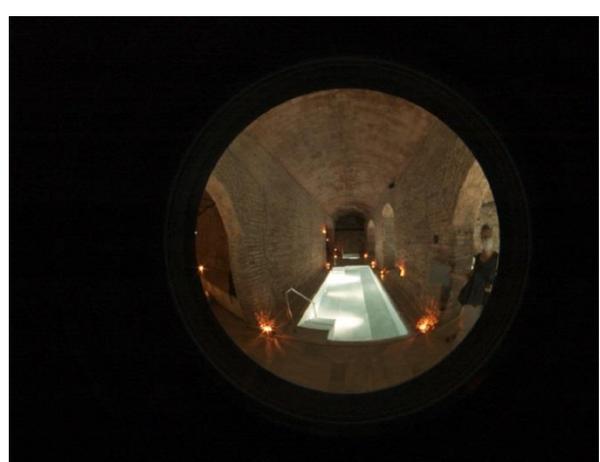


Imagen sobreexpuesta

Punto 3



Imagen subexpuesta

Punto 4



Imagen subexpuesta



Imagen central



Imagen central



Imagen sobreexpuesta



Imagen sobreexpuesta

Paso 3: Resultados.

En primer lugar, para el análisis, se han identificado dos conjuntos de superficies. El primer conjunto está compuesto por las superficies que conforman el cerramiento del recinto, es decir, los muros de ladrillo y piedra, los techos abovedados de ladrillo y el pavimento revestido con mármol blanco. Este conjunto de superficies cuenta con una iluminación baja y muy cálida que proviene principalmente de las velas dispuestas en todo el recinto y que ayudan a definir la circulación dentro de él. El segundo conjunto de superficies corresponde a los vasos de agua que significan la parte más importante del balneario urbano. Los vasos de las piscinas están revestidos por piezas de piedra caliza natural de color blanco y se encuentran iluminados por lámparas LED de luz fría sumergidas en el agua. Es así que observamos que en el diseño lumínico se utilizan dos tipos de fuentes de luz debido a la intención lumínica de diferenciar entre conjuntos de superficies. El primer conjunto define el espacio y permite el recorrido en él, mientras que el segundo conjunto supone para el usuario la inmersión en los baños termales.

En segundo lugar, se procesaron las series de fotografías que se tomaron en los cuatro puntos de medición para obtener imágenes en HDR y en falso color. Las imágenes en HDR se aprecian en las figuras 81, 83, 85 y 87; mientras que, las imágenes en falso color se muestran en las figuras 82, 84, 86 y 88. Las imágenes en HDR muestran el color de las superficies iluminadas con diferente temperatura de color. Las imágenes en falso color muestran los valores de luminancia de las superficies. En todas las imágenes de falso color se utiliza la misma escala de valores con rango de 0 cd/m^2 a 11 cd/m^2 . Además, se muestra el valor de luminancia medio, el valor de luminancia mínimo y el valor de luminancia máximo. El valor de luminancia medio en las cuatro escenas estudiadas, está entre 0.2 cd/m^2 y 0.5 cd/m^2 . Las imágenes en falso color también nos permiten aproximarnos a los niveles de luminancia media en cada uno de los dos conjuntos de superficies a estudiar: el espacio transitable y los vasos de agua. En el caso del primer conjunto se puede separar entre las superficies cercanas a las velas, que marcan el camino a seguir por el transeúnte, con valores de luminancia que rondan los 5.5 cd/m^2 ; y las superficies lejanas a las velas, que definen el recinto, con valores de luminancia inferiores a 0.3 cd/m^2 y que cubren más del 50% del campo visual. En el caso del segundo conjunto, las superficies de agua tienen luminancias entorno a los 3.5 cd/m^2 . En cada uno de los conjuntos de superficies existe un rango de luminancia distinto; sin embargo, en ocasiones los valores de luminancias de los dos conjuntos de superficies coinciden.

- El primer conjunto de superficies, el contenedor del espacio interior, está entre 0 cd/m^2 y 0.9 cd/m^2 , mientras que las superficies próximas a las velas, que insinúan el recorrido, están entre 0.9 cd/m^2 y 8.7 cd/m^2 . El valor medio de luminancia es 0.3 cd/m^2 . Iluminado con T.C. de 1850 K.
- El segundo conjunto de superficies, los vasos de las piscinas, tiene valores de luminancia entre 2.2 cd/m^2 y 11 cd/m^2 . El valor medio de luminancia es 3.5 cd/m^2 . Iluminado con T.C. de 4000 K.

Finalmente, analizando en simultáneo las fotos en HDR y las imágenes en falso color notaremos que la temperatura de color sirve para diferenciar entre superficies con valores de luminancias parecidos, pero de conjuntos de superficies con significado distinto para el visitante.



Figura 81. HDR en punto de medición 1

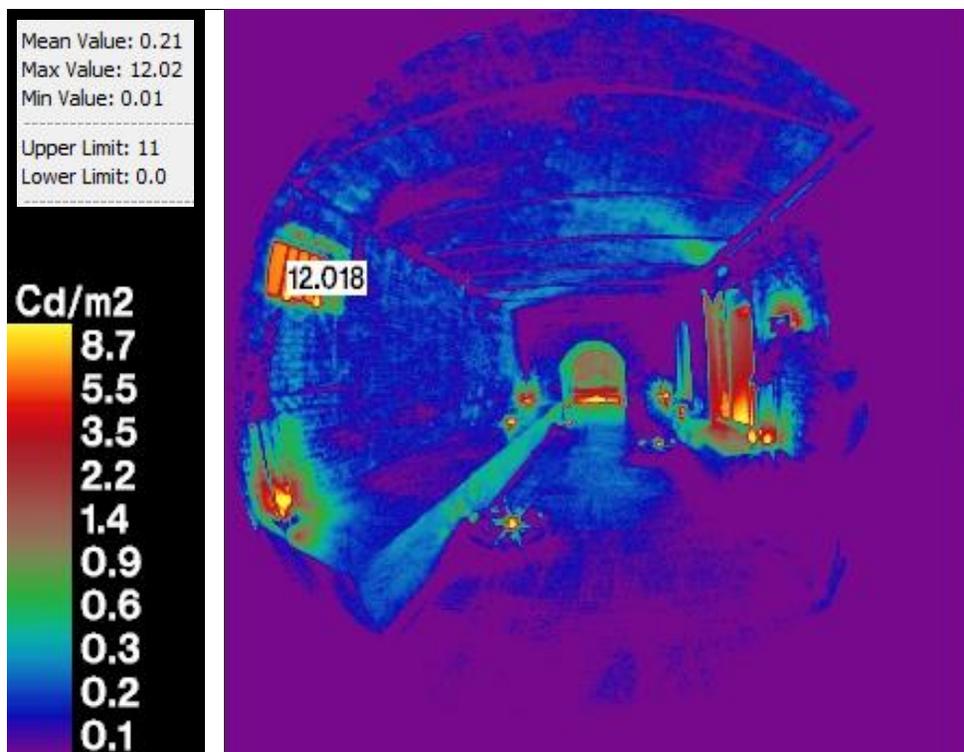


Figura 82. Imagen Falso color en punto de medición 1



Figura 83. HDR en punto de medición 2

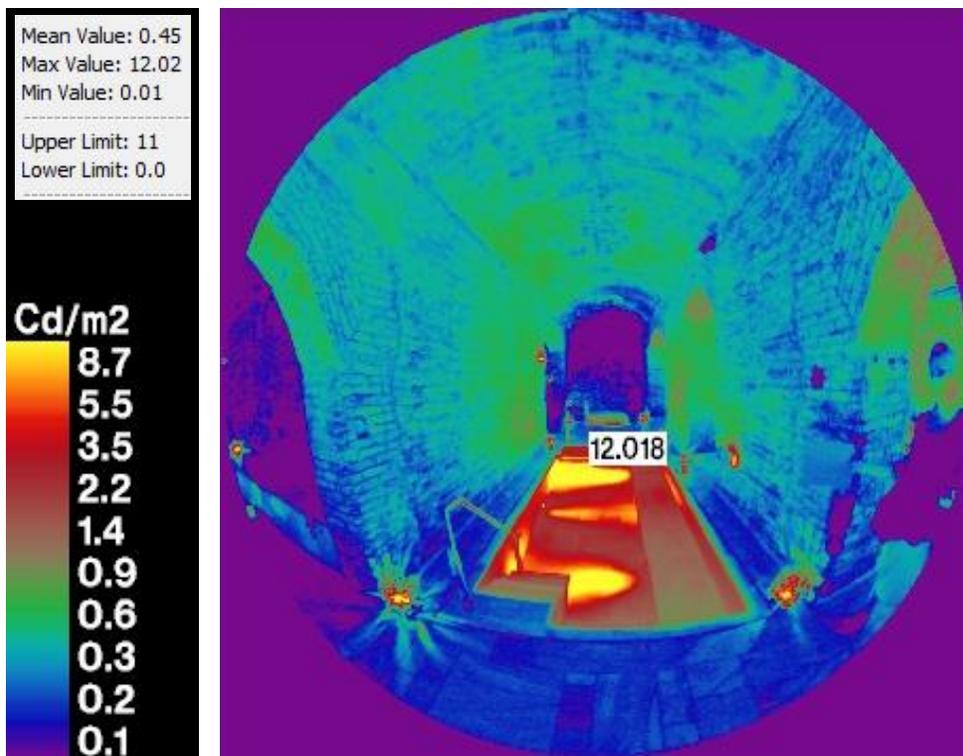


Figura 84. Imagen Falso color en punto de medición 2



Figura 85. HDR en punto de medición 3

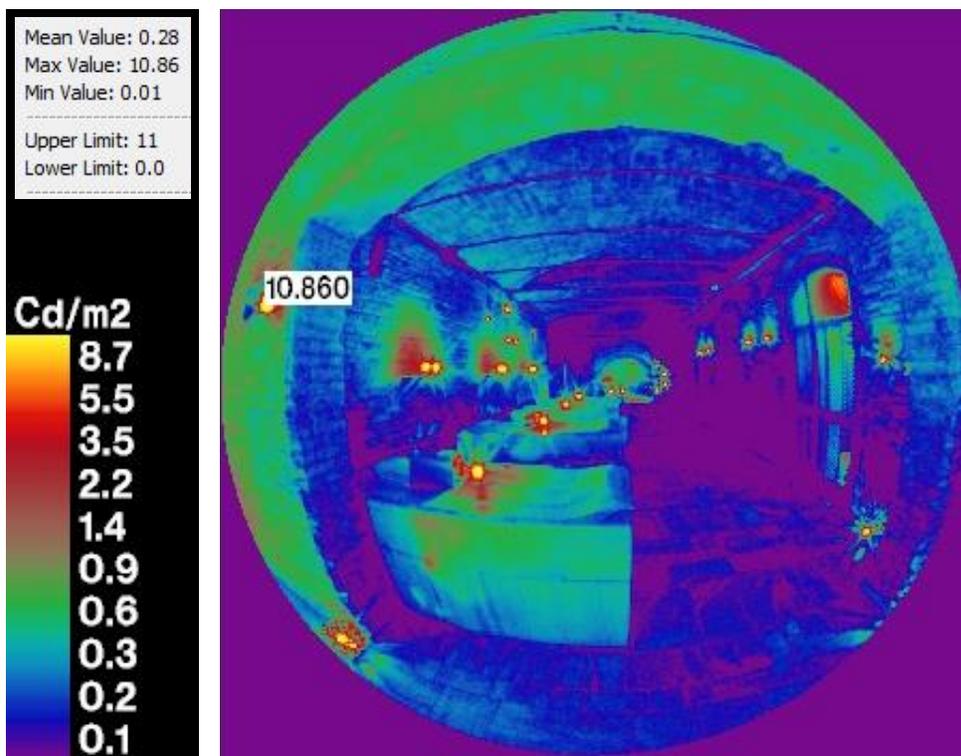


Figura 86. Imagen Falso color en punto de medición 3



Figura 87. HDR en punto de medición 4

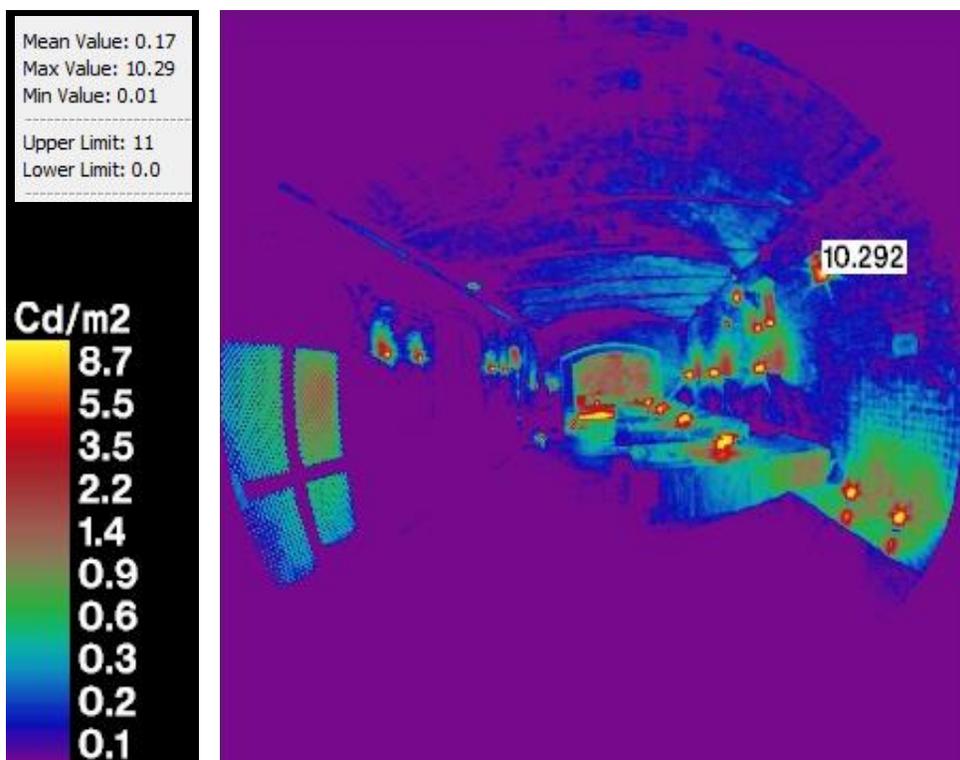


Figura 88. Imagen Falso color en punto de medición 4

MACBA: Capilla Convento de los Ángeles

Figura 89. Exterior de Capilla Convento de los Ángeles. 2015. <https://www.monestirs.cat/monst/bcn/bn02ange.htm>

El espacio expositivo Capella MACBA, conocido también como Capella Convent dels Àngels, se sitúa en el barrio del Raval dentro de la ciudad de Barcelona. Este espacio, declarado bien cultural de interés nacional, fue anteriormente parte del convento para las monjas de la Tercera Orden de Santo Domingo desarrollado por el maestro Bartomeu Roig. La iglesia, cuya existencia data desde 1473, consta de una nave cubierta por una bóveda de crucería soportada con arcos propios del estilo gótico, unas capillas laterales entre los contrafuertes, un ábside poligonal y una fachada austera con un portón de estilo renacentista. Además, cuenta con un espacio anexo conocido como la capilla del Pie de la Cruz, el cual también está cubierto por una bóveda de crucería, pero con una altura menor. La Capella forma parte del Museo de Arte Contemporáneo de Barcelona desde el 2006 y actualmente, en el 2021, se lleva a cabo la exposición llamada “En tiempo real, la colección Rafael Tous de arte conceptual”. El coleccionista apostó por obras de artistas de trabajo experimental que fusionan la performance y el site-specific, desarrolladas entre los años 1970 y 1980. Las piezas de la colección están dispuestas dentro de la Capella Convent dels Àngels de manera que forman dos recorridos longitudinales que comparten el mismo final, sin embargo, ambos recorridos están diferenciados por el color de la luz empleado para iluminar las paredes del ábside. El visitante debe elegir uno de los dos recorridos para llegar al mismo destino, un muro blanco que oculta el mensaje final de la exposición; luego de develarse la frase detrás del muro, los visitantes intuitivamente toman el otro camino para volver al inicio de la exposición. La exposición continua en la Capella Pie de la Cruz, pero con una propuesta de alta intensidad lumínica que ha sido descartada del presente estudio.

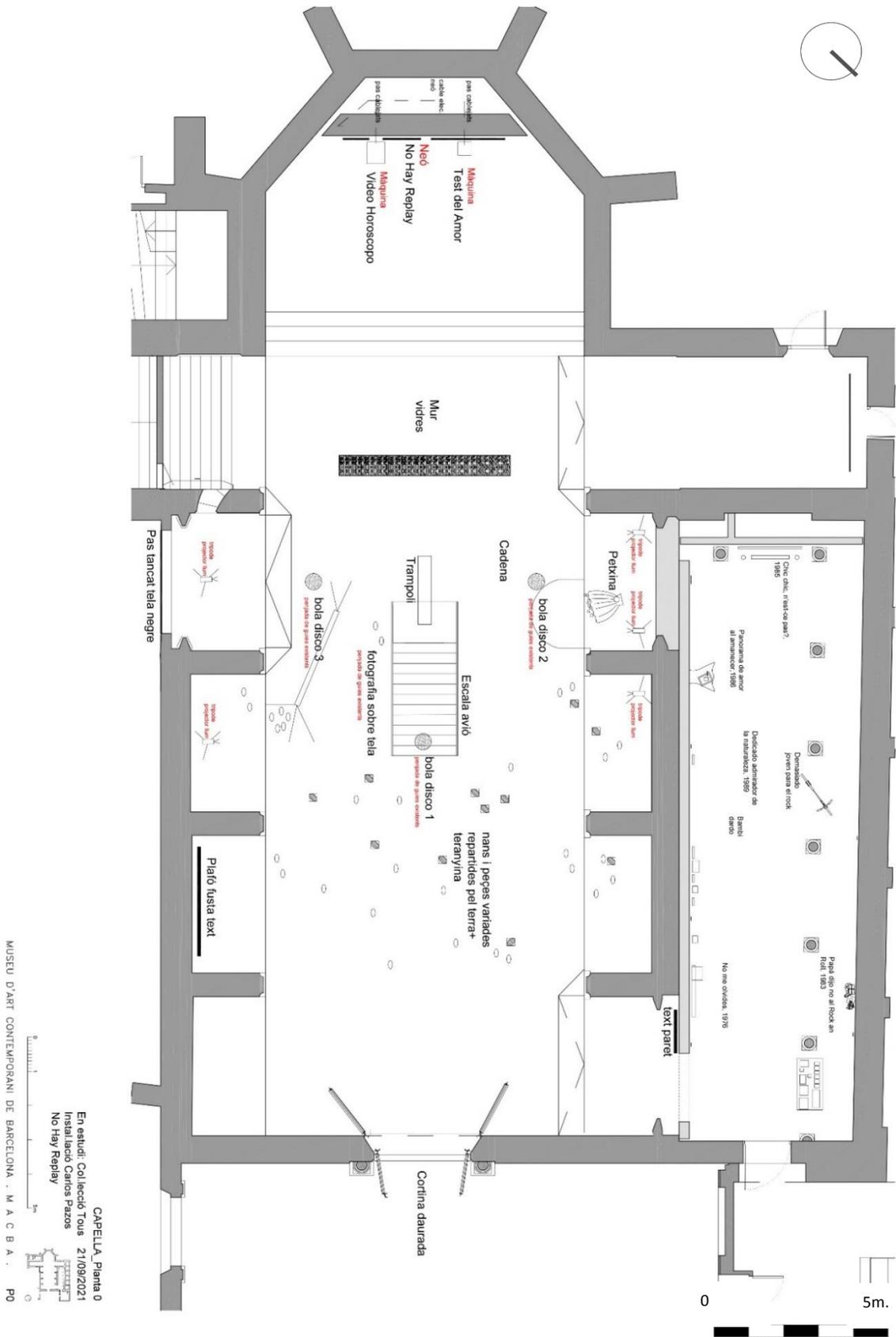


Figura 90. Planta de la Capilla. Archivos del Macba. 2021.

Diseño de iluminación.

Al ingresar a la Capella Convent dels Àngels lo primero que llama la atención es el drástico cambio en el nivel de luz entre el exterior y el interior. Para ello se ha bloqueado el paso de la luz solar por las ventanas tapiadas y por el portón de ingreso, este último está completamente cubierto por una doble cortina, compuesta por una capa de felpa de color negro en el exterior y otra capa de tela sintética de color dorado en el interior. El diseño de baja intensidad lumínica refuerza la intención de llevar al visitante a un estado de calma y contemplación. Observamos tres intenciones lumínicas; la primera, iluminar los trabajos artísticos; la segunda, insinuar el recorrido; y, la tercera, mostrar los límites del espacio. Las piezas de la colección están iluminadas por unas lámparas LED con luz cálida y dirigida a cada uno de los objetos exhibidos. El recorrido está determinado por la disposición de los objetos dentro de la capilla y el empleo de luces de neón en el ábside de la capilla, que sirven para distinguir dos rutas paralelas con un mismo destino. Las superficies que contienen el espacio de la capilla tienen una iluminación de pequeños y múltiples rayos de luz en movimiento que pretenden recordar los lugares de entretenimiento musical de los años 70. El efecto lumínico se consigue con las esferas giratorias que se encuentran suspendidas de la cubierta e iluminadas cada una con un haz de luz LED blanco cálido. El diseño de iluminación y el silencio en la capilla sugiere una pausa en el tiempo que permite contemplar los objetos sacados de su contexto habitual.

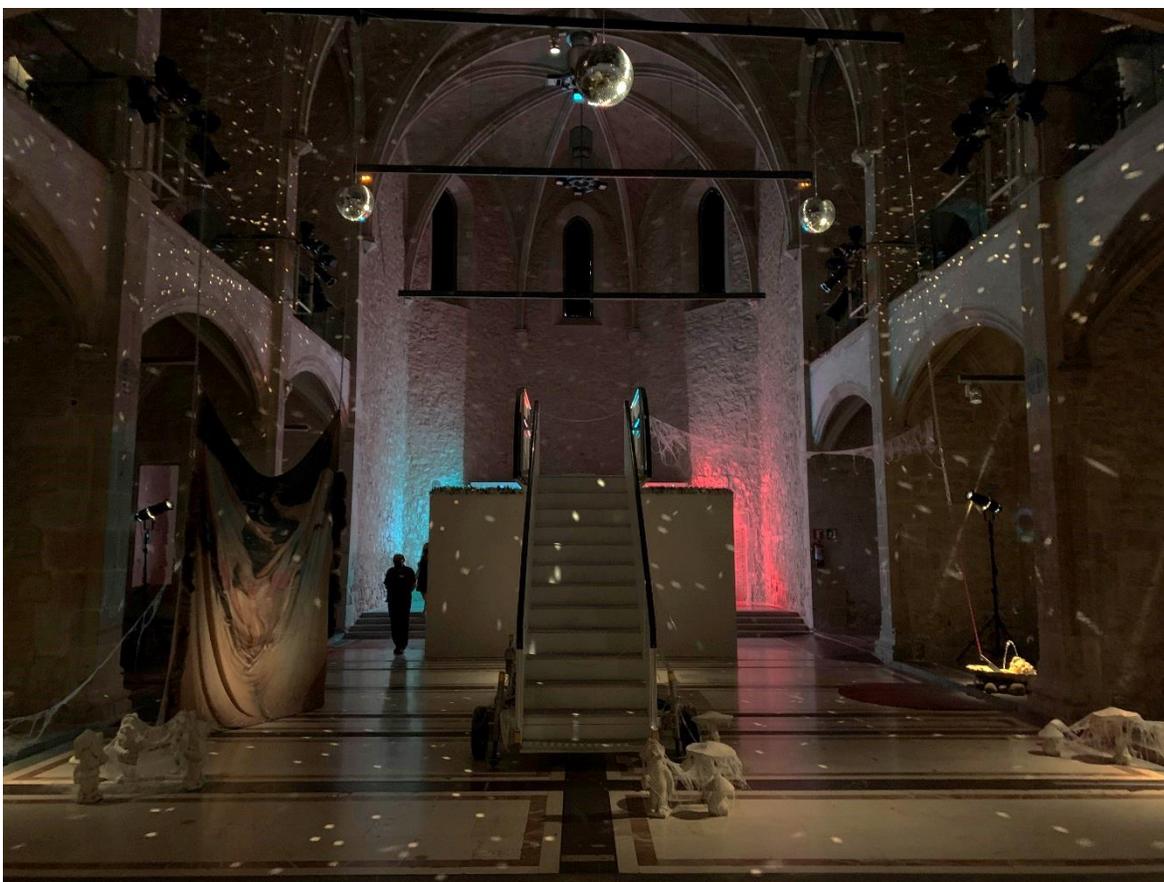


Figura 91. Interior de Capilla durante exposición: En tiempo real, la colección Rafael Tous de arte conceptual.

A continuación, se detallan los pasos de la metodología:

Paso 2: Medición.

Las mediciones fueron tomadas el día 15 de septiembre de 2021, comenzando a las 17:00h. El interior de la capilla quedó iluminado únicamente por fuentes de luz artificial debido a que las ventanas y el portón de ingreso fueron bloqueados para restringir el paso de la luz natural. La tarea en esta etapa consistió en obtener los datos de iluminancias, temperaturas de color y luminancias de las superficies en cada una de las escenas seleccionadas.

Las medidas de iluminancias se tomaron con un luxómetro en cada uno de los cuatro puntos señalados en el plano anterior y situados a una altura de 0.9 m por encima del suelo. Los valores de iluminancia oscilan entre 0 lx y 5 lx. Los valores de iluminancia sirvieron para corroborar que el caso de estudio corresponde a un espacio de baja intensidad lumínica.

Al respecto de la temperatura de color, se obtuvo la información técnica de cada una de las diferentes fuentes de luz y se encontró lo siguiente:

- Lámpara ST770B 27S/CH PSU-E MB FG WH, utilizadas para iluminar las piezas de exhibición, cuenta con temperatura de color de 2700 K.
- Lámpara ST770B 27S/830 PSU-E MB FG WH, usada para iluminar las esferas giratorias, tiene temperatura de color de 3000 K.
- Luz de Neón, usada en el ábside, tiene un color de luz rojo debido al gas de neón para iluminar el lado derecho del ábside; mientras que, el lado derecho es de color azul por el gas de mercurio.

Las medidas de luminancias se hicieron con la ayuda de un luminancímetro. Se tomaron las medidas en las siguientes superficies: una hoja gris, colocada en los seis puntos de observación debido a que contaban con mayor nivel de luminancia aparente dentro del espacio. Para obtener la luminancia de todas las superficies es necesario recurrir al uso de una cámara fotográfica réflex y un trípode para capturar imágenes digitales en los puntos de observación y posteriormente procesarlas con un software de iluminación. La medida de luminancia sobre la hoja gris se utiliza para tener un punto de referencia dentro de la escena visual fotografiada, esta referencia sirve para ajustar posteriormente la escala de luminancia de la escena fotografiada. Para empezar, la hoja gris que fue colocada frente a la cámara fotográfica. El trípode con la cámara se ubicó en cada uno de los puntos de medición y en la dirección que muestra el plano (figura 92). La cámara fotográfica estuvo sobre el trípode a una altura de 1.50 m. A continuación, se hizo una serie fotográfica en los seis puntos identificados en la etapa de observación. La cámara fue programada para hacer tres fotografías de la misma escena con una diferencia de dos pasos en el tiempo de exposición entre cada uno de las fotografías. Por tanto, se obtuvieron las fotos de la escena subexpuesta, central y sobreexpuesta. Las fotos fueron procesadas con el software Aftab Alpha para obtener imágenes en HDR y falso color. La imagen en falso color nos permite ver que la escala de valores de luminancia de las superficies que reflejan la luz está entre 0 cd/m^2 y 11 cd/m^2 ; sin embargo, es importante anotar que la luminancia más alta es de 36 cd/m^2 debido a que observamos directamente la fuente de luz. En este caso de estudio se eligieron cuatro de las seis series de fotos ya que sirven para el análisis debido a los patrones repetidos de luminancia encontrados en la capilla.

A continuación, se muestra cada una de las cuatro sesiones fotográficas seleccionadas:

Punto 1



Imagen subexpuesta.

Punto 3



Imagen subexpuesta.



Imagen central.



Imagen central.



Imagen sobreexpuesta.



Imagen sobreexpuesta.

Punto 4



Imagen subexpuesta.

Punto 6



Imagen subexpuesta.



Imagen central.



Imagen subexpuesta.



Imagen sobrepuesta.



Imagen subexpuesta.

Paso 3: Resultados.

Se han identificado tres conjuntos de superficies. El primer conjunto está conformado por los objetos de exhibición de color blanco e iluminados con luz cálida desde el techo de las capillas laterales de la iglesia. El segundo conjunto de superficies corresponde al ábside de la capilla iluminado por fuentes de luz de neón de diferente color que sirven para diferenciar las dos rutas paralelas a lo largo del recorrido de la exposición. El tercer conjunto está compuesto por las superficies que conforman el cerramiento de la capilla, es decir, los muros de piedra, la bóveda nervada y el pavimento revestido con mármol. Este conjunto de superficies cuenta con una iluminación baja y cálida que proviene principalmente de las esferas giratorias y reflectantes de luz. Es así que observamos que en el diseño lumínico se utilizan tres tipos de fuentes de luz debido a la intención lumínica de diferenciar entre conjuntos de superficies. El primer conjunto resalta las piezas de la colección del artista, el segundo conjunto permite diferenciar las rutas en el recorrido y el tercer conjunto definen los límites del espacio de la capilla.

Además, las seis series de fotografías se procesaron para obtener imágenes en HDR y en falso color las cuales se encuentran en el anexo 5. Las imágenes en HDR seleccionadas se aprecian en las figuras 93, 95, 97 y 99; mientras que, las imágenes en falso color se muestran en las figuras 94, 96, 98 y 100. Las imágenes en HDR muestran el color de las superficies iluminadas con diferente color de luz. Las imágenes en falso color muestran los valores de luminancia de las superficies. En todas las imágenes de falso color se utiliza la misma escala de valores con rango de 0 cd/m^2 a 11 cd/m^2 . Además, se muestra el valor de luminancia medio, el valor de luminancia mínimo y el valor de luminancia máximo. El valor de luminancia medio en las cuatro escenas estudiadas, está entre 0.2 cd/m^2 y 0.6 cd/m^2 . Las imágenes en falso color también nos permiten aproximarnos a los niveles de luminancia media en cada uno de los conjuntos de superficies a estudiar: la exhibición, el recorrido y la capilla. En el caso del primer conjunto se muestran valores de luminancia que rondan los 3.5 cd/m^2 . En el caso del segundo conjunto, las superficies del ábside tienen luminancias entorno a los 2.2 cd/m^2 . En cada uno de los dos conjuntos anteriores de superficies existe un rango de luminancia distinto; sin embargo, en ocasiones los valores de luminancias de los dos conjuntos de superficies coinciden. En el caso del tercer conjunto de superficies, la capilla de la iglesia, debido al movimiento de las luces, la cámara ha captado la luminancia resultante del tiempo de exposición de la fotografía. En este caso el valor promedio de la luminancia es de 0.2 cd/m^2 .

- El primer conjunto, los objetos de exhibición, está entre 2.2 cd/m^2 y 8.7 cd/m^2 . El valor medio de luminancia es 3.5 cd/m^2 . Iluminado con T.C. de 2700 K.
- El segundo conjunto, el ábside de la capilla, tiene valores de luminancia entre 0.9 cd/m^2 y 3.5 cd/m^2 . El valor medio de luminancia es 2.2 cd/m^2 . Iluminado con color de luz rojo y azul.
- El tercer conjunto, la nave de la capilla, tiene valores de luminancia entre 0.1 cd/m^2 y 2.2 cd/m^2 . El valor medio de luminancia es 0.2 cd/m^2 Iluminado con T.C. de 3000 K.

Por un lado, analizando en simultáneo las fotos en HDR y las imágenes en falso color notaremos que la temperatura de color a pesar de ser diferente entre el primer y tercer conjunto de superficies, se perciben igual. Por otro lado, el análisis de la iluminación en el ábside de la iglesia con diferente color de luz sirve para diferenciar entre superficies con valores de luminancias iguales. Esta diferenciación sirve para comunicar que existen dos maneras de llegar hasta el final de la capilla y de esta manera reforzar el mensaje de la exposición.



Figura 93. HDR en punto de medición 1

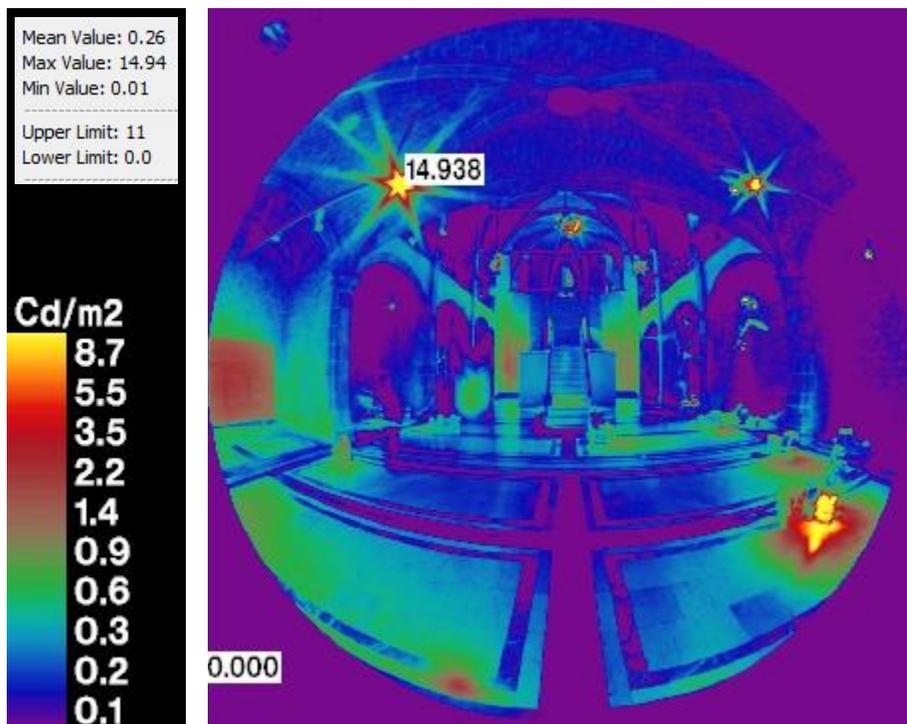


Figura 94. Imagen Falso color en punto de medición 1

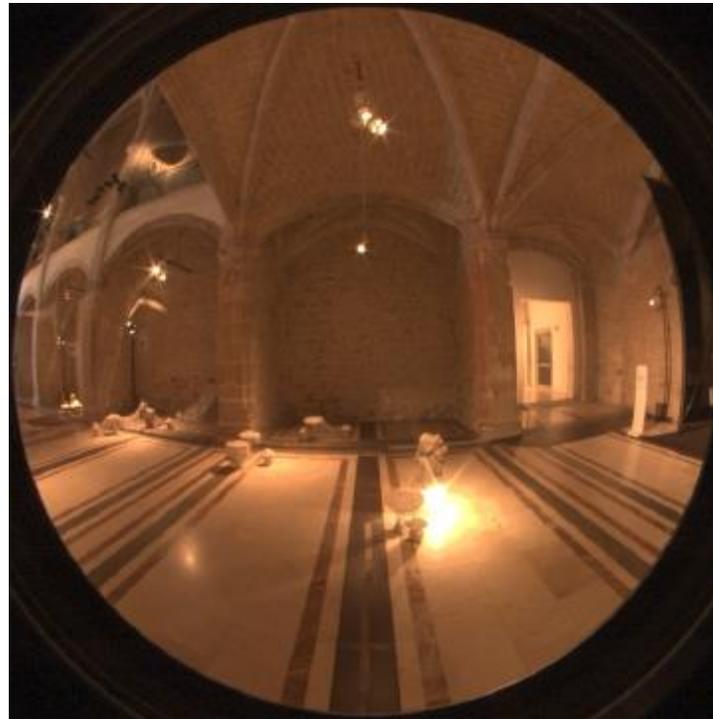


Figura 95. HDR en punto de medición 3.

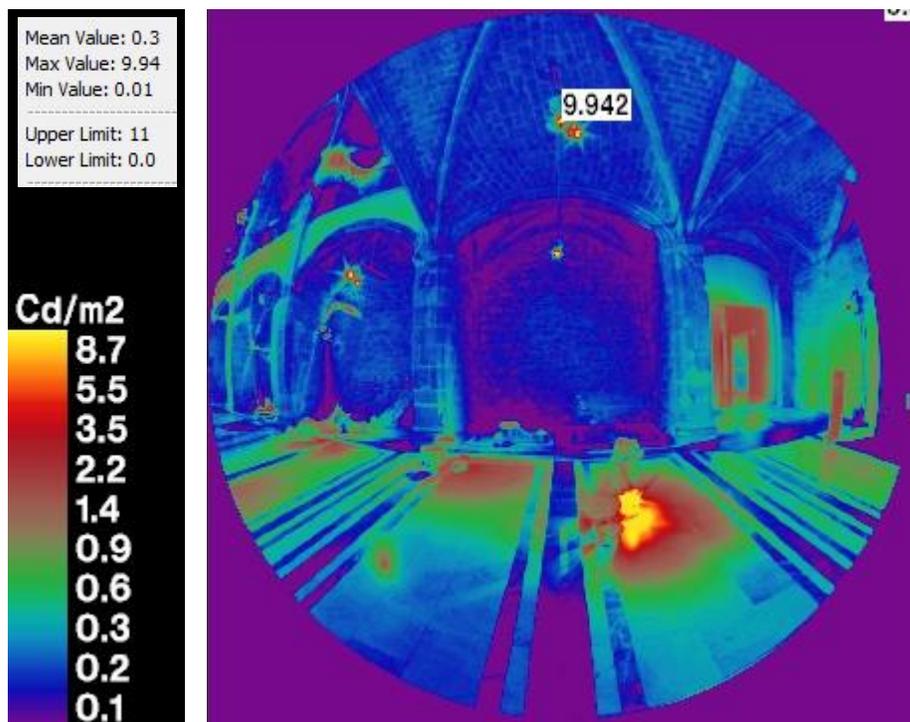


Figura 96. Imagen Falso color en punto de medición 3.



Figura 97. HDR en punto de medición 4.

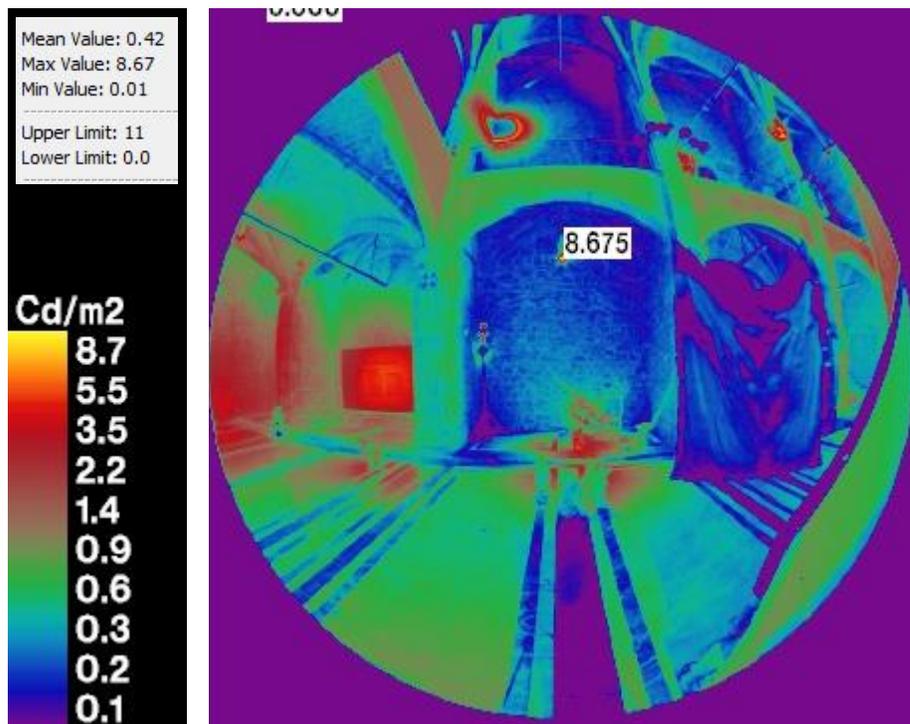


Figura 98. Imagen Falso color en punto de medición 4.



Figura 99. HDR en punto de medición 6.

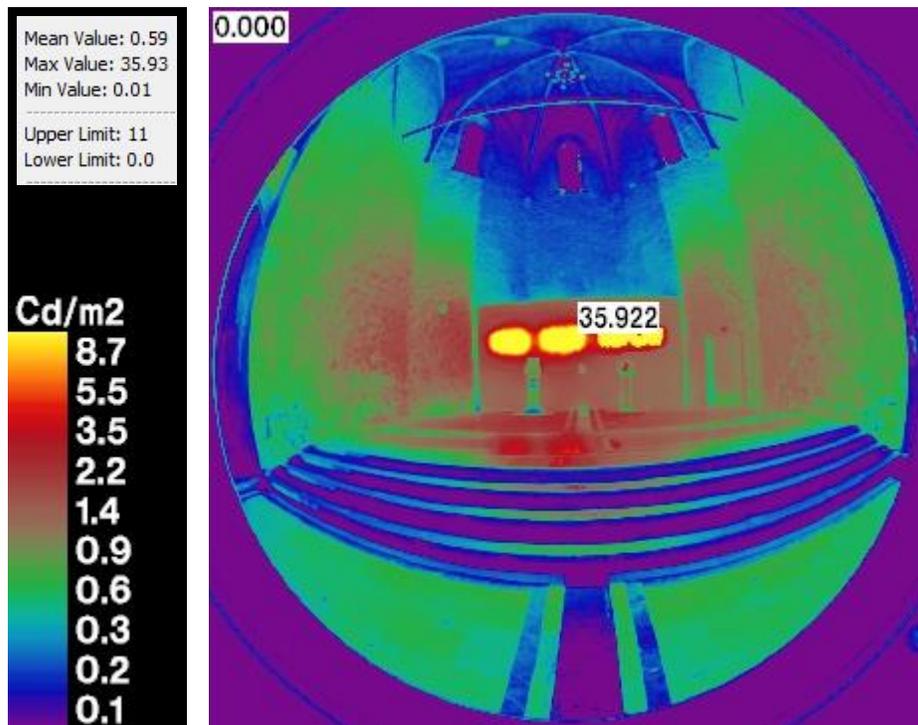


Figura 100. Imagen Falso color en punto de medición 6.

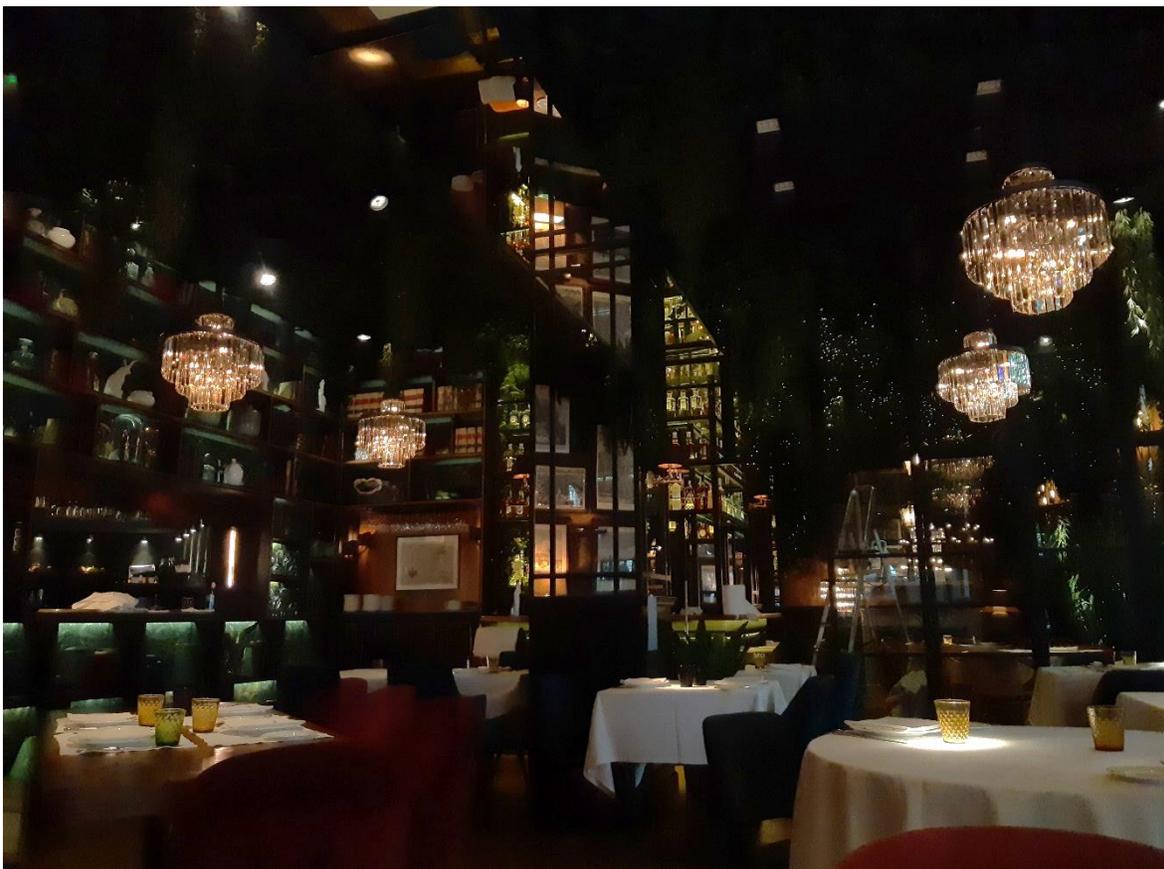
Restaurant FEROS

Figura 101. Interior del restaurante - bar Feroz

El restaurante Feroz se ubica en la esquina de la calle Tuset con Travesera de Gracia del barrio de Sant Gervasi – Galvany, en la ciudad de Barcelona. La localización en esquina permite tener cuatro accesos, uno de ellos es el ingreso principal en donde los clientes deben anunciarse, los otros dos sirven de acceso a las terrazas desde dos salas de comensales separadas y el último es el ingreso del personal. El restaurante-bar se desarrolla en dos plantas, en la primera se ubican los dos comedores y las tres barras de bar, la cocina y el área de vestidores del personal. En el sótano se encuentran los servicios del público y los almacenes. El diseño estuvo a cargo de Pablo Peyra Studio que incluyó tanto el interiorismo como el diseño lumínico. La intención del diseño fue reunir la esencia de la selva por la noche y el refinamiento de la ciudad, es así que se optó por la vegetación y la luz como protagonistas del espacio. La tensión entre la salvaje jungla y la sofisticada urbe se manifiesta en la elección del mobiliario y de los elementos decorativos. La paleta de colores y la iluminación también juegan con la dualidad del concepto del diseño utilizando tonos cálidos y fríos. En el caso del color se eligieron los colores pardos y verdes; mientras que, para la luz se utilizaron diferentes temperaturas de color. Además, se utiliza el color negro para camuflar todas las instalaciones ubicadas en el techo y las paredes en el corredor de ingreso.

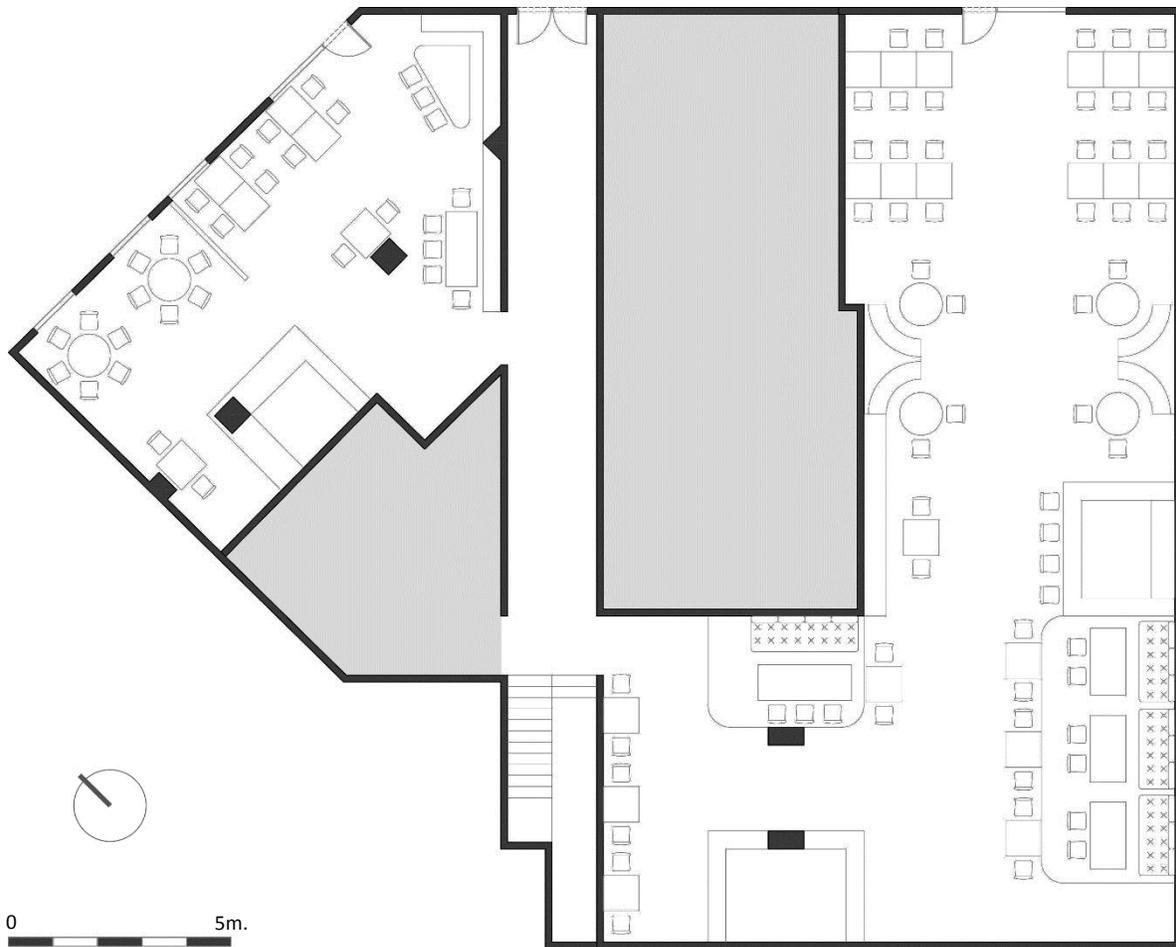


Figura 102. Planta baja del restaurante-bar Feroz.

Diseño de iluminación.

El ingreso principal al restaurante nos da acceso a un pasadizo largo y en penumbra, cuyas superficies están pintadas de negro y se vislumbran gracias a las luminarias colgantes de baja intensidad lumínica. El recorrido en este ingreso sirve de paso intermedio entre el alto nivel de luz en el exterior, durante el día, y el bajo nivel de luz en el interior. En el día la iluminación artificial toma mayor protagonismo en la sala de comensales más grande debido a la profundidad del espacio. Por la noche, el momento de mayor concurrencia, las dos salas quedan únicamente iluminadas por luz artificial. Al ingresar a la sala más grande del restaurante destaca en primer lugar los numerosos candelabros de cristal suspendidos del techo, todos ellos están reunidos de forma que son el punto focal del restaurante. Los mismos candelabros se encuentran por separado en la sala más pequeña del restaurante y cumplen la función de iluminar el espacio. Existe otro tipo de lámpara cuyo objetivo es el de iluminar de manera directa sobre cada una de las mesas del comedor con un haz de luz cálido. Del mismo modo, hay otro tipo de iluminación para las tres barras de bar que cuentan con luz indirecta y temperatura de color fría. Es así que el diseño de baja intensidad lumínica permite diferenciar, utilizando la temperatura de color, el área del comedor y el área de la barra.

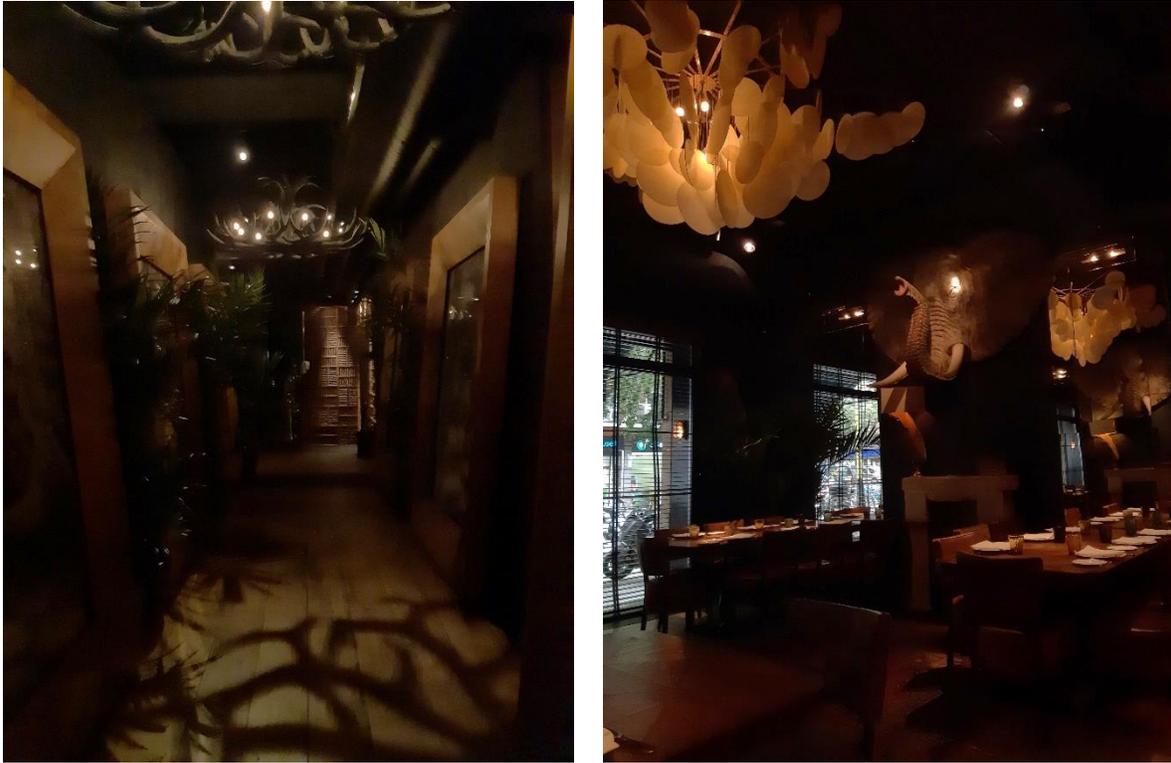


Figura 103. Izquierda: el ingreso al restaurante. Derecha: el salón grande de comedor.



Figura 104. Barra de bar. Pablo Peyra Studio. 2018. <https://pablopeyrastudio.com/>

A continuación, se detalla la metodología aplicada:

Paso 1: Observación.

Se observó que las instalaciones del restaurante - bar FEROS cumplen con las características que se buscan para ser tomado como caso de estudio: bajo nivel de luz, empleo de diferentes temperaturas de color de luz y el recorrido diferenciado dentro del espacio. Si bien el ingreso principal nos lleva a dos salones distintos del restaurante, el uso que se le da a ambos es mixto, es decir tanto de restaurante como de bar. Es por ello que el diseño lumínico cumple un papel importante en el diseño interior, ya que ayuda a diferenciar entre el espacio del comedor y el espacio destinado al bar.

En el restaurante-bar se identificaron diez puntos de observación adecuados para llevar a cabo este estudio. El primer punto está en el ingreso principal, orientado en el sentido longitudinal del pasadizo que conduce a las dos salas del restaurante. El segundo punto se encuentra también en el pasadizo, pero con la orientación contraria al primero para mostrar las luminancias del exterior. El tercer punto está en el acceso a la sala más grande de comensales, en él observamos tanto el área del comedor como el área de la barra. El cuarto punto está ubicado en medio de la sala de comensales y orientado a la misma barra de bar que observamos en el punto anterior. El quinto punto comparte la misma ubicación que el cuarto punto, pero orientado en el sentido opuesto, es decir, dirigido hacia la otra barra de bar. El sexto punto está justo delante del acceso a la terraza del restaurante y dirigido en el sentido longitudinal de la sala de comensales. El séptimo punto, ubicado en el otro extremo longitudinal de la sala, está orientado hacia el acceso a la terraza. El octavo punto se encuentra en la sala pequeña de comensales y dirigido hacia el área de comedor. El noveno punto, también está en la sala pequeña pero orientada hacia la barra del bar. Por último, el décimo punto, en la misma sala, muestra tanto el área de comedor como el área de la barra.

A continuación, se muestra el plano de planta con los 10 puntos donde se hicieron las mediciones. Se señala en color rojo cuatro puntos de observación elegidos para caracterizar el estudio, llamados P3, P5, P8 y P10.

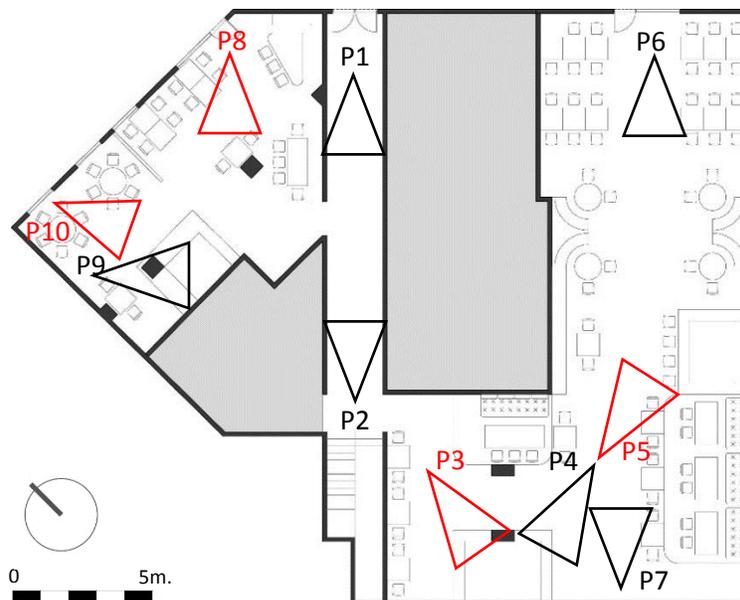


Figura 105. Puntos de medición en restaurante Feros

Paso 2: Medición.

Las mediciones fueron tomadas el día 29 de septiembre de 2021, comenzando a las 10:00h, antes de la apertura del local. El cielo se encontraba parcialmente nublado. La alta intensidad lumínica del exterior queda muy reducida en el interior debido a la filtración de la luz por las persianas negras de las ventanas.

El objetivo de las mediciones fue de conseguir los valores de iluminancias, temperaturas de color y luminancias de las superficies en cada una de las escenas seleccionadas.

Las medidas de iluminancias se tomaron con un luxómetro en los diez puntos seleccionados en la etapa de observación y situados a una altura de 0.9 m por encima del suelo. Los valores de iluminancia oscilan entre 5 lx y 20 lx en los puntos de medición alejados de las ventanas y de 20 lx a 60 lx en los puntos P6, P8 y P10 que se encuentran cerca de las ventanas.

Al respecto de la temperatura de color, se obtuvo la información técnica de cada una de las diferentes fuentes de luz y se encontró lo siguiente:

- Lámpara Classic LEDCandle ND 4.3-40W E14 827 B35 CL, en forma de velas fueron utilizadas para los candelabros, cuentan con temperatura de color de 2700 K.
- Lámpara ST321T LED27S/FMT PSU MB FG WH, proyectores led usados para iluminar las mesas, tienen temperatura de color de 3000 K.
- Lámpara Master LEDtube HF 1500mm UO 36W 840 T5, tubos de led utilizados para iluminar el perímetro de las barras de bar. Temperatura de color de 4000 K.

Las medidas de luminancias se hicieron con la ayuda de un luminancímetro. Se hicieron las mediciones sobre una hoja gris que fue colocada en los diez puntos de observación. Para obtener la luminancia de todas las superficies es necesario recurrir al uso de una cámara fotográfica réflex y un trípode para capturar imágenes digitales en los puntos de observación y posteriormente procesarlas con un software de iluminación. La medida de luminancia sobre la hoja gris se utiliza para tener un punto de referencia dentro de la escena visual fotografiada, esta referencia sirve para ajustar posteriormente la escala de luminancia de la escena fotografiada. Para empezar, la hoja gris que fue colocada frente a la cámara fotográfica. El trípode con la cámara se ubicó en cada uno de los puntos de medición en la dirección que muestra el plano (figura 105). La cámara fotográfica estuvo sobre el trípode a una altura de 1.50 m. A continuación, se hizo una serie fotográfica en los diez puntos identificados en la etapa de observación. La cámara fue programada para hacer tres fotografías de la misma escena con una diferencia de dos pasos en el tiempo de exposición entre cada uno de las fotografías. Por tanto, se obtuvieron las fotos de la escena subexpuesta, central y sobreexpuesta. Las fotos fueron procesadas con el software Aftab Alpha para obtener imágenes en HDR y falso color. La imagen en falso color nos permite ver que la escala de valores de luminancia de las superficies que reflejan la luz está entre 0 cd/m^2 y 11 cd/m^2 ; sin embargo, es importante anotar que la luminancia más alta es de 39 cd/m^2 debido a que observamos directamente la fuente de luz. En este caso de estudio se eligieron cuatro de las diez series de fotos que sirven para el análisis debido a los patrones repetidos de luminancia encontrados en el restaurante FERROZ. Las imágenes en HDR y falso color que corresponden a los diez puntos de medición están en el anexo 6.

A continuación, se muestran cada una de las sesiones fotográficas seleccionadas:

Punto 3



Imagen subexpuesta.

Punto 5



Imagen subexpuesta.



Imagen central.



Imagen central.



Imagen sobreexpuesta.



Imagen sobreexpuesta.

Punto 8



Imagen subexpuesta.

Punto 10



Imagen subexpuesta.



Imagen central.



Imagen subexpuesta.



Imagen sobrepuesta.



Imagen subexpuesta.

Paso 3: Resultados.

El local comercial se caracteriza por tener un uso mixto de restaurante y bar. La iluminación ayuda a distinguir los dos usos del lugar que se dan al mismo tiempo en los dos salones del local. El recorrido se inicia por un pasadizo largo que lleva hacia las dos salas y a partir de allí la circulación se intuye por el área en penumbra que queda entre las áreas de las mesas y el bar. La iluminación general del local se alcanza con el uso de candelabros y luminarias colgantes, ambas con luz cálida de poca intensidad, entre 5 lx y 10lx, repartidos en las dos salas. El área de los comensales se diferencia por tener un haz de luz de intensidad media, entre 10 lx y 20 lx, pero muy concentrado en un punto sobre cada una de las mesas. El área del bar se distingue ya que cuenta con iluminación indirecta debajo de la barra, intensidad media y temperatura de color más fría que las anteriores.

En cuanto al análisis de las imágenes, se procesaron las fotografías para obtener imágenes en HDR y en falso color. Las imágenes en HDR se aprecian en las figuras 106, 108, 110 y 112; mientras que, las imágenes en falso color se muestran en las figuras 107, 109, 111 y 113. Las imágenes en HDR muestran el color de las superficies iluminadas con diferente color de luz. Las imágenes en falso color muestran los valores de luminancia de las superficies. En todas las imágenes de falso color se utiliza la misma escala de valores con rango de 0 cd/m² a 11 cd/m². Además, se muestra el valor de luminancia medio, el valor de luminancia mínimo y el valor de luminancia máximo. El valor de luminancia medio en las cuatro escenas estudiadas, está entre 0.5 cd/m² y 1 cd/m². Las imágenes en falso color también nos permiten aproximarnos a los niveles de luminancia media en cada uno de los conjuntos de superficies a estudiar: el área de comedor, el área de bar y los recorridos. En el caso del comedor se muestran valores de luminancia que rondan los 3.5 cd/m². En el caso del bar, las superficies de la barra tienen luminancias entorno a los 3.5 cd/m². Las superficies de recorrido tienen una luminancia media de 0.3 cd/m². En los dos primeros conjuntos de superficies existe un rango de luminancia similares ya que deben de cumplir con la normativa; por tanto, el diseño lumínico recurre a otras características de la luz para diferenciar las áreas de comedor y bar.

- El primer conjunto de superficies, el área del comedor, está entre 0.2 cd/m² y 8.7 cd/m². El valor medio de luminancia es 3.5 cd/m². Iluminado con T.C. de 3000 K.
- El segundo conjunto de superficies, el área del bar, tiene valores de luminancia entre 0.1 cd/m² y 5.5 cd/m². El valor medio de luminancia es 3.5 cd/m². Iluminado con T.C. de 4000 K.
- El tercer conjunto, los recorridos, tienen luminancia media de 0.3 cd/m² y T.C. de 2700 K.

Si analizamos en simultáneo las fotos en HDR y las imágenes en falso color notaremos que las temperaturas de color, a pesar de ser diferente entre la lámpara del candelabro sobre el recorrido y la lámpara del proyector sobre la mesa, se perciben como similares. La falta de distinción se debe a que la diferencia entre temperaturas de color de ambas lámparas es muy cercana, tan sólo de 300 K. El cambio de temperatura entre las barras de bar y las mesas del comedor es más notorio a la vista ya que la diferencia es de 1000 K. En las imágenes en HDR es más difícil ver la diferencia entre la temperatura de color de las barras de bar y las mesas de comedor. La similitud aparente entre el color de luz de ambos tipos de luz, en la imagen en HDR, podría deberse a que el color de las superficies iluminadas. Los colores empleados en la barra son cálidos y la luz es más fría; mientras que, el color de los manteles de las mesas es blanco y la luz es más cálida. La falta de correspondencia entre el color de la luz y el color de la superficie podría ocasionar que la temperatura de color aparente de las superficies se vea similar en las imágenes HDR.



Figura 106. HDR en punto de medición 3.

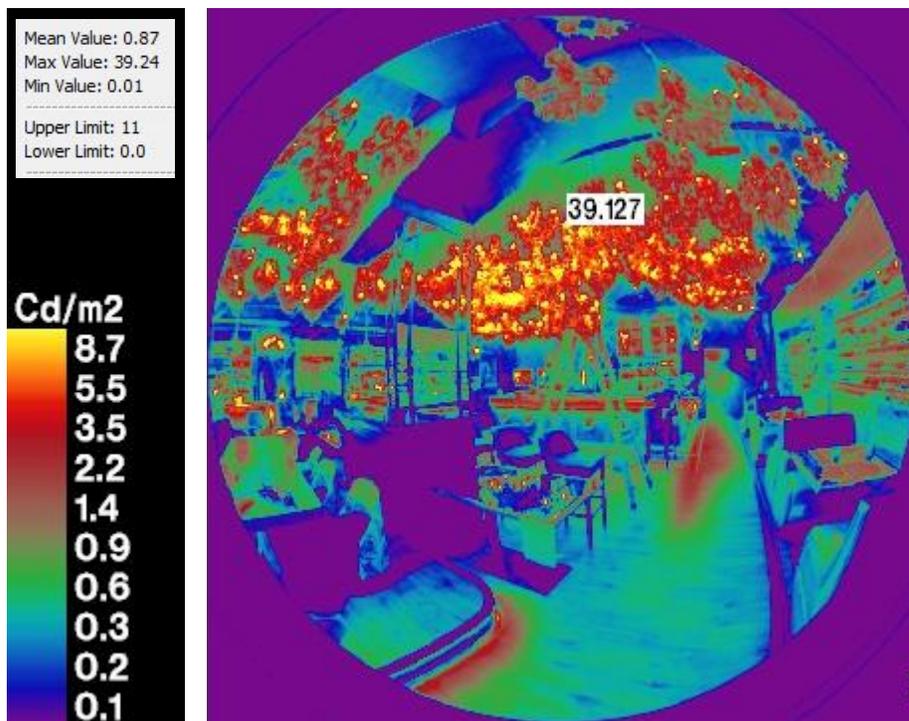


Figura 107. Imagen Falso color en punto de medición 3.



Figura 108. HDR en punto de medición 5.

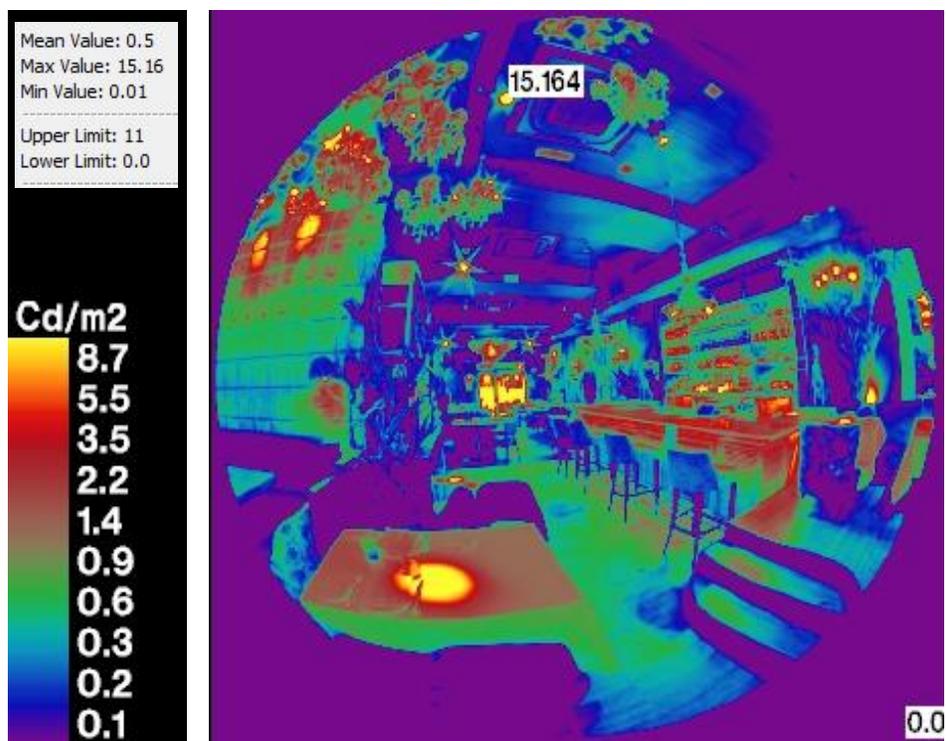


Figura 109. Imagen Falso color en punto de medición 5.

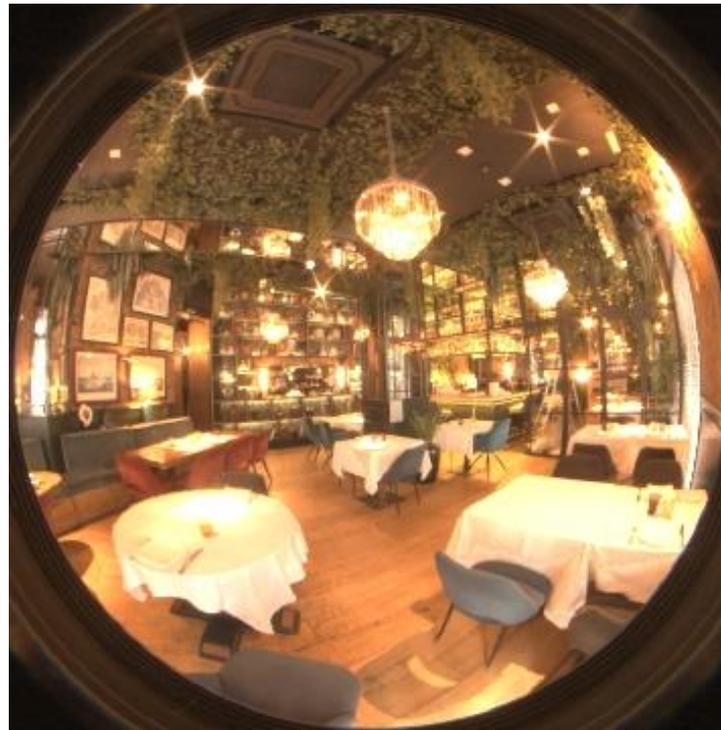


Figura 110. HDR en punto de medición 8.

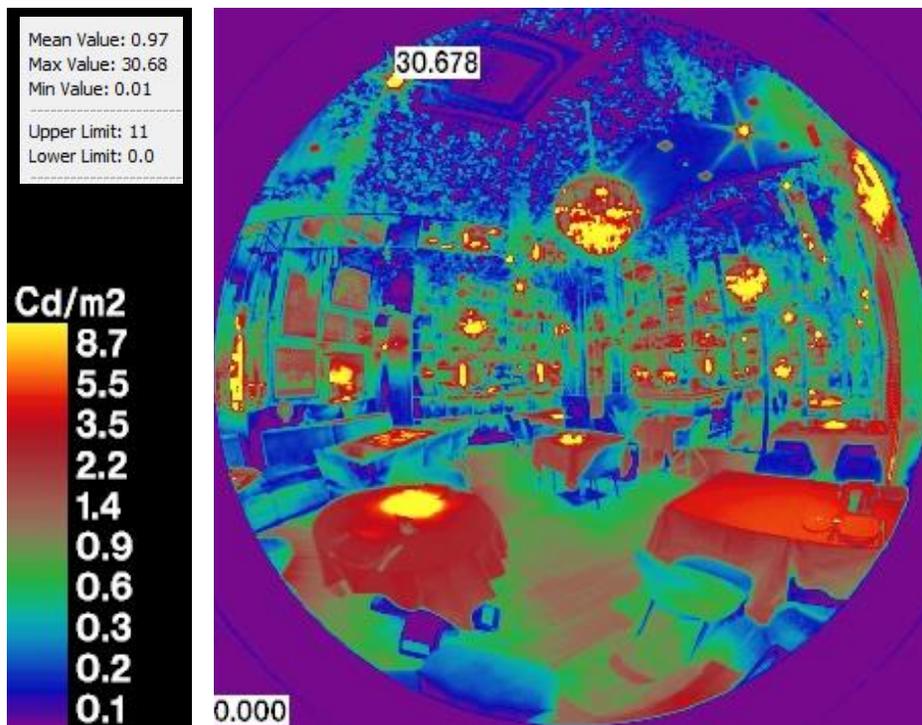


Figura 111. Imagen Falso color en punto de medición 8.



Figura 112. HDR en punto de medición 10.

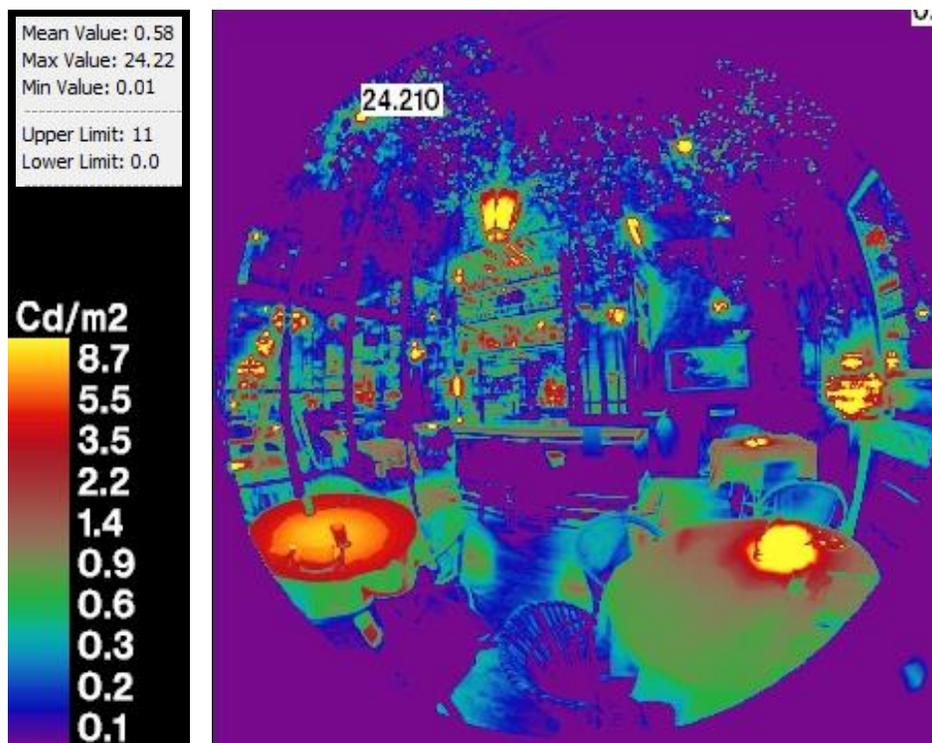


Figura 113. Imagen Falso color en punto de medición 10

CCCB: Exposición Ciencia Fricción

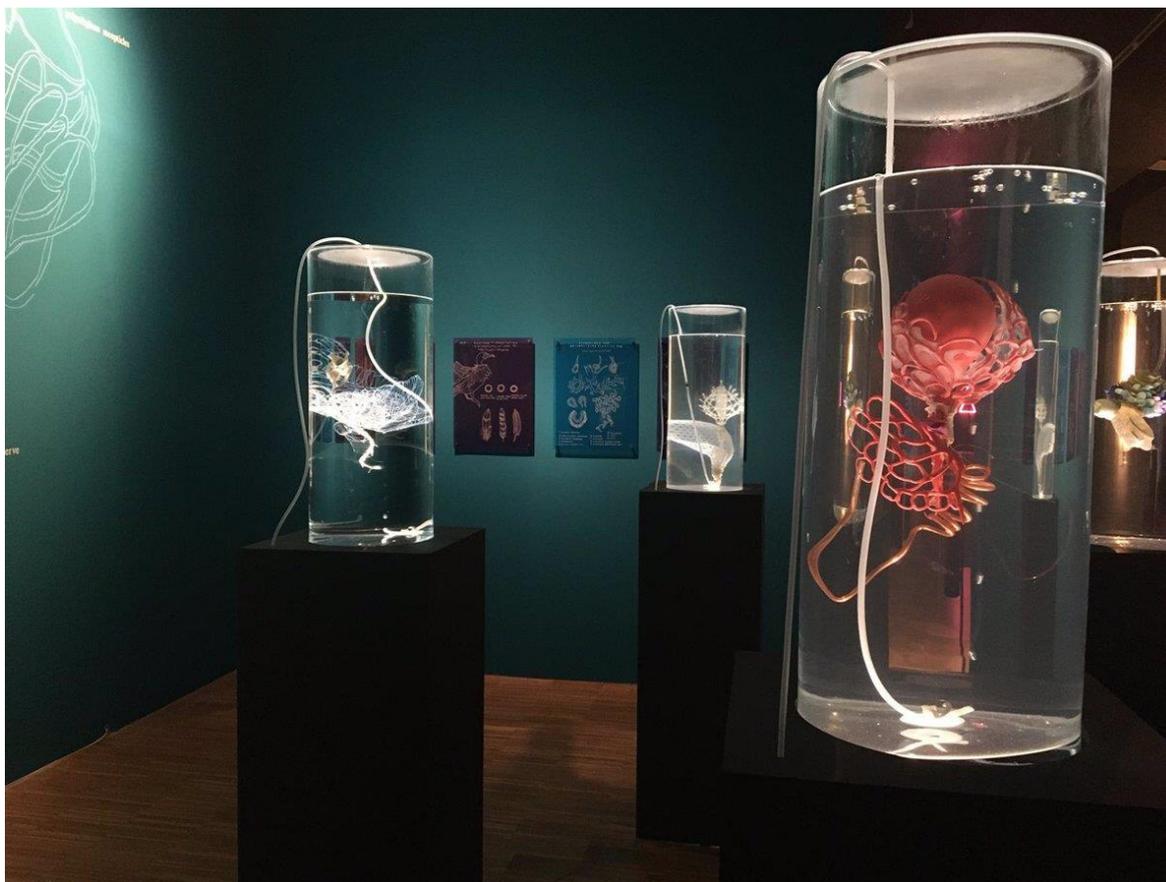


Figura 114. Interior de sala de exposiciones. EUROPAPRESS. 2021. <https://www.europapress.es/catalunya/noticia-cccb-explora-dialogo-especies-exposicion-ciencia-friccio-20210611150418.html>

El espacio expositivo del Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona, conocido también como CCCB, se encuentra en el barrio del Raval dentro de la ciudad de Barcelona. Los diferentes edificios, que hoy ocupa el centro cultural, inicialmente fueron parte de un convento del siglo XVIII. Los arquitectos encargados de reformar y adaptar las nuevas instalaciones, inaugurado en 1994, fueron Helio Piñón y Albert Viaplana. El edificio original en forma de U fue conectado a otro edificio nuevo con lo que se terminó consolidando el patio central de acceso. El CCCB cuenta con salas de exposiciones, auditorio, librería, aulas y salas polivalentes. Las dos salas de exposiciones del edificio nuevo se ubican en la última planta. En la sala de exposiciones número dos se ha montado la exposición llamada Ciencia Fricción que se lleva a cabo desde junio hasta noviembre de 2021. La muestra está comisariada por María Ptqk, quien estuvo a cargo del diseño junto con el equipo museográfico y luminotécnico del CCCB. El guion museográfico requería diferentes salas consecutivas que forman un recorrido segmentado y lineal. Las piezas de la colección, hechas por diferentes artistas, reúnen imágenes digitales, videos, collages, fotografías y objetos diversos. La mayor cantidad de objetos de la colección están dispuestos en superficies verticales, y otros están sobre mesas y pedestales. A pesar de la abundante información tanto de objetos, imágenes y cartelas informativas, se llega a distinguir un lenguaje de la luz al utilizar diferentes temperaturas de color.

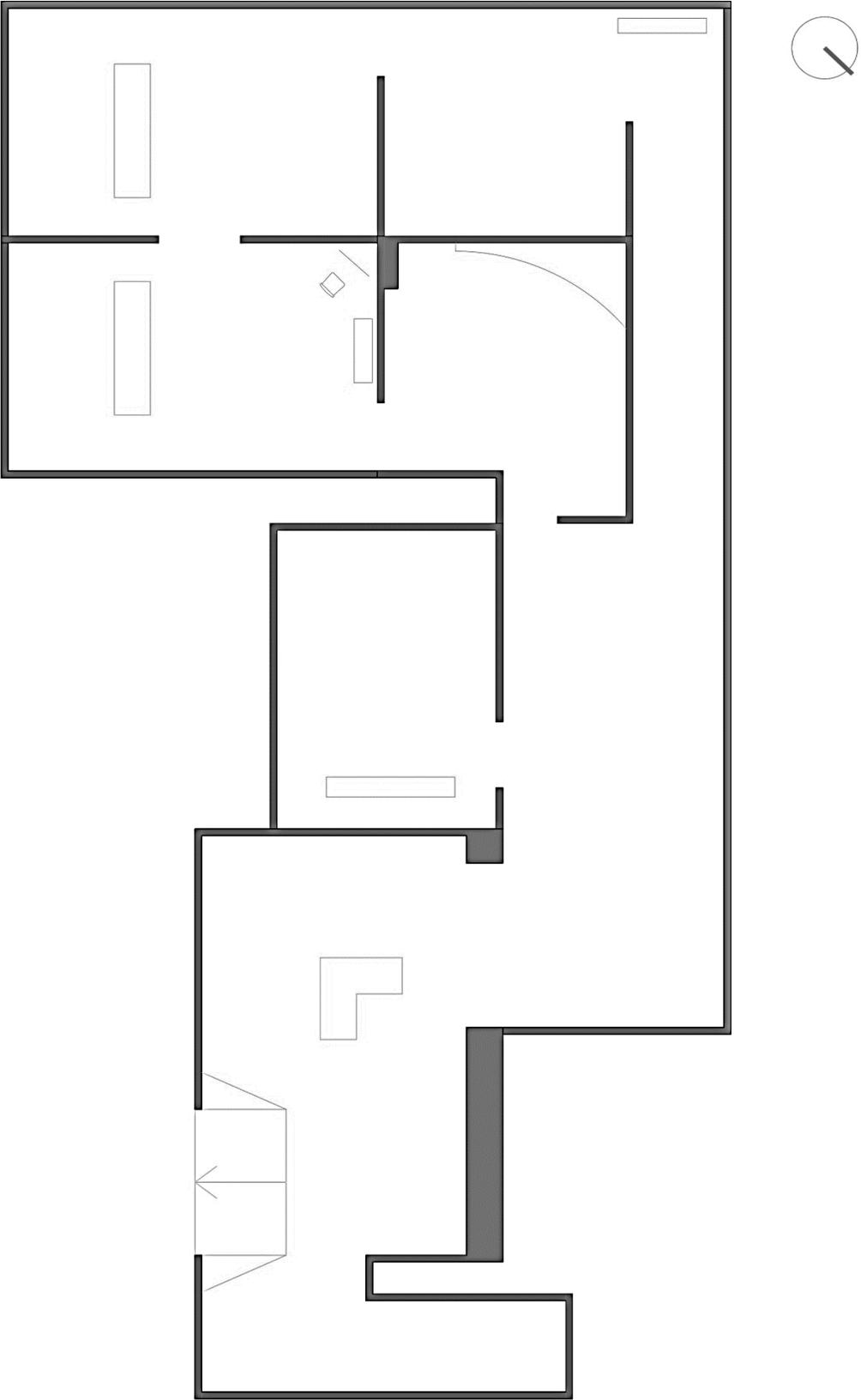


Figura 115. Planta de la Sala de exhibición del CCCB.



Diseño de iluminación.

El largo recorrido desde el patio descubierto del CCCB hasta las salas de exposiciones permite la progresiva adecuación a los bajos niveles de luz. La exposición empieza con una sala amplia y pintada de negro, lo primero que llama la atención al entrar es una gran proyección de video sobre una de las paredes negras. Acto seguido, observamos una mesa en forma de L ubicada en el centro de la sala de forma que insinúa el recorrido perimetral que se debe de hacer. La iluminación concentrada sobre los objetos en las mesas y las paredes permite distinguir rápidamente lo que es de interés para la vista. Además de las imágenes a blanco y negro enmarcadas y puestas sobre las paredes, encontramos un televisor en la esquina de la sala que muestra imágenes a color. Todos los objetos expuestos van acompañados de cartelas informativas que se diferencian de las piezas de colección por la forma en la que son iluminados. Por un lado, los objetos de exhibición sobre las mesas y suspendidos en las paredes cuentan con luz blanca fría. Por otro lado, los textos explicativos de la exposición están iluminados con una luz cálida, dirigida y recortada al tamaño de las cartelas. Además, las imágenes de los proyectores y en las pantallas seleccionadas para esta muestra tienen un color de luz en la gama de los colores fríos. El mismo patrón de diseño lumínico se repite en todas las salas salvo en aquellas que no tienen pantallas ni proyectores, entonces se aprecian solo dos temperaturas de color. Cabe destacar una sala en la que solo hay una gran proyección, en este caso se advierte una luz de color azulada en el techo.

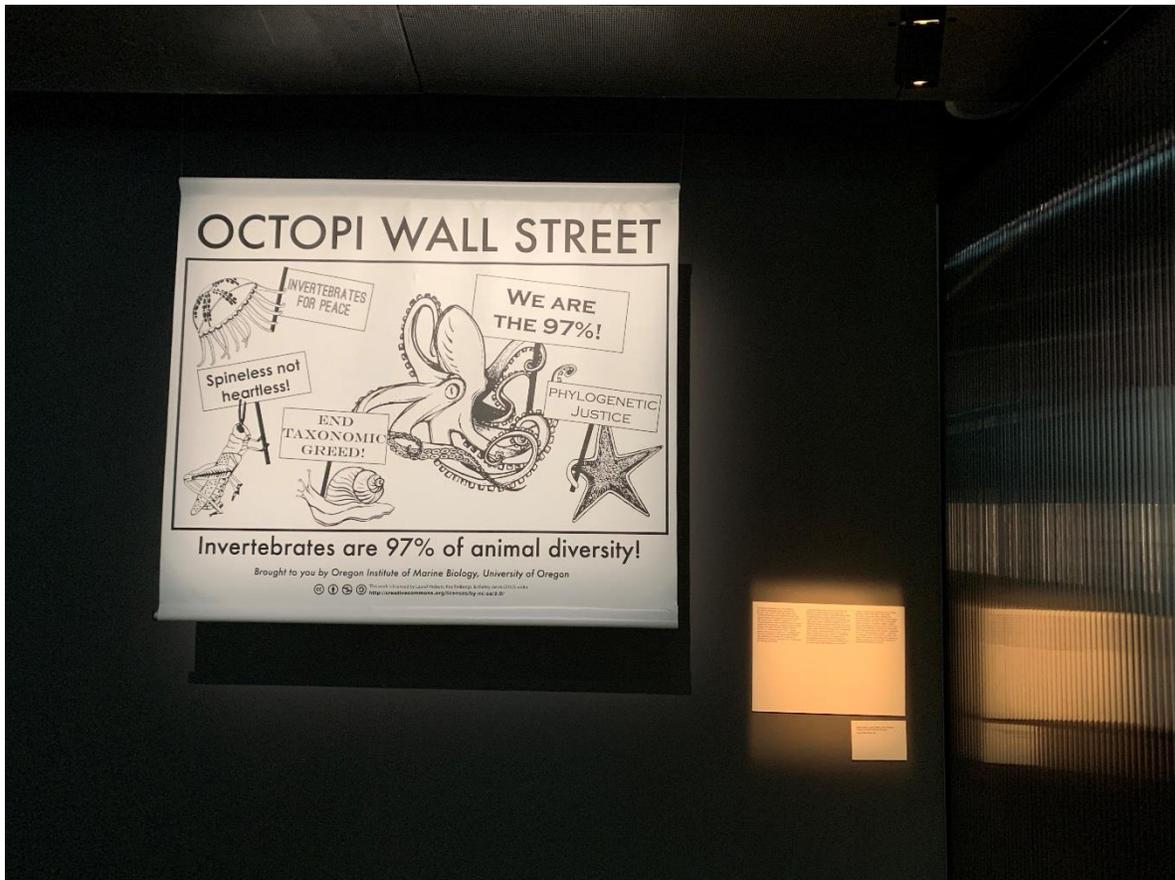


Figura 116. Interior de sala de exposición.

A continuación, se detalla la metodología:

Paso 1: Observación.

En la sala de exposiciones del CCCB se observa que cuenta con un recorrido claro y lineal, un diseño de baja intensidad lumínica y el uso de diferentes temperaturas de color. El recorrido de las salas no precisa de iluminación ya que las mismas piezas de la exposición iluminadas sirven de guía al visitante. El recorrido sólo está iluminado expresamente cuando en una de las salas el nivel de luz es muy bajo, no tiene objetos expuestos y se debe hacer un giro dentro de ella. En el recorrido se identificaron diez puntos de medición. Los cuatro primeros puntos de observación se ubicaron en la primera sala del recorrido por ser la más grande de todas. El primero y el segundo, que comparten la misma ubicación, están orientados a las dos paredes con exhibición por ser el inicio del discurso expositivo. El tercero y el cuarto están ubicados en el centro de la sala, una muestra la proyección de video sobre la pared y la otra permite tener una visión global de la exhibición incluyendo la mesa central. El quinto punto se encuentra en la siguiente sala en donde sólo encontramos una imagen proyectada en una pared y un banco. El sexto punto se ubica en la sala con menor nivel lumínico de todas, en donde sólo el camino de entrada y salida se ilumina ya que obedece a un cambio de dirección. En el séptimo punto encontramos nuevamente parte de la exposición y se ubica en el centro de la sala orientado hacia el ingreso de la misma. El octavo punto, en la siguiente sala, se orienta hacia una de las paredes que está pintada en dos colores contrastantes para marcar un cambio en el significado de las piezas de la colección. El noveno punto, en la última sala, está orientado hacia una de las paredes con mayor contenido de piezas expuestas. Por último, el décimo punto está orientado a la última pieza de la colección y se encuentra en el pasadizo de salida.

En la siguiente figura, la planta, se indica el lugar donde se tomaron las medidas y fotografías. Además, se resalta en color rojo los cuatro puntos de observación elegidos (P1, P3, P7 y P10) para ilustrar el estudio.

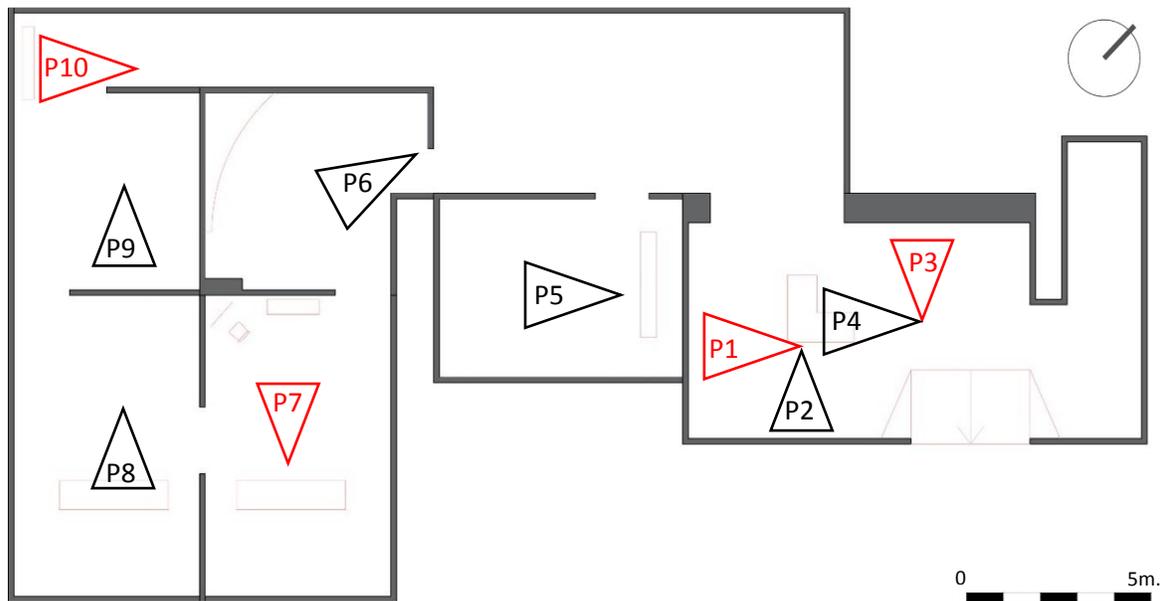


Figura 117. Puntos de medición en sala de exposición

Paso 2: Medición.

La campaña de mediciones se realizó el día 15 de septiembre de 2021, comenzando a las 15:00h. La sala se encuentra en la tercera planta del CCCB del nuevo edificio, en el ala noroeste del patio interior. La sala de exposición no tiene aberturas al exterior; por tanto, se encuentra iluminada con luz artificial.

Se definieron diez puntos para hacer la campaña de mediciones de los cuales se eligieron los siguientes cuatro puntos para explicarlos en este apartado: Los dos primeros en el primer espacio, en donde se aprecian los objetos de la colección y la imagen de un proyector; el tercero, en uno de los espacios intermedios que incorpora, además de los objetos e imágenes, una lámpara de luz cálida como parte de la exhibición; y, el cuarto, al final de la exposición que muestra un cartel suspendido del techo y una cartela explicativa que están iluminados con temperatura de color diferentes. Se tomaron medidas de iluminancias y luminancias usando el luxómetro y el luminancímetro; y, además, se tomó nota del valor de temperatura de color indicado en cada una de las lámparas.

La iluminancia se tomó en un plano de trabajo ubicado a 0.9 m. del suelo. Los niveles de luz registrados en cada uno de los diez puntos de medición fueron: 10lx, 10lx, 5lx, 5lx, 3lx, 1lx, 5lx, 1lx, 4lx y 9lx. Por tanto, siendo el valor máximo de iluminancia de 10lx, se trata del caso de estudio con mayor nivel de luz en comparación a los anteriores; sin embargo, puede ser considerado como un espacio de baja intensidad lumínica.

La luminancia fue tomada sobre una hoja en gris colocada en cada uno de los puntos de medición, en posición vertical frente a la cámara fotográfica. La luminancia del resto de superficies se obtuvo utilizando una cámara réflex sobre un trípode y un software para procesar fotos. La cámara y el trípode se colocaron en los diez puntos de medición. La cámara se encontró a una altura de 1.50 m. y fue orientada hacia los objetos de exhibición. Se usó el programa manual de la cámara para hacer tres fotos consecutivas con diferencia de dos pasos de exposición entre las fotos. Posteriormente, se utilizó el software Aftab Alpha para visualizar las luminancias en todas las superficies de cada escena. Al procesar las fotos obtuvo imágenes HDR y en falso color en escala de luminancias con un rango de 0 cd/m² y 12 cd/m² para poder compararlo con los demás casos de estudio. Se puede apreciar que, de manera general, las luminancias se encuentran entre 0 cd/m² y 12 cd/m², aunque en una de las escenas se aprecia una pequeña superficie de 20 cd/m² que corresponde a una lámpara del techo enfrentada a la cámara fotográfica.

La temperatura de color se identificó al consultar la información técnica de las lámparas encontradas en el recinto, que son:

- Lámpara ST315T LED27S/CH PSU FR24 BK, utilizada para iluminar las cartelas explicativas, cuentan con temperatura de color de 2700 K.
- Lámpara ST315T LED39S/840 PSU FR36 BK, usada para iluminar las piezas de exhibición, tiene temperatura de color de 4000 K.
- Lámpara de cinta LED, Master LEDstrip 4.3W927 475 lm/M 5M utilizada en el suelo para indicar un cambio de dirección, tiene un color de luz equivalente a 2700 K.

A continuación, se muestran cada una de las sesiones fotográficas seleccionadas:

Punto 1



Imagen subexpuesta.

Punto 3



Imagen subexpuesta.



Imagen central.



Imagen central.



Imagen sobreexpuesta.



Imagen sobreexpuesta.

Punto 7



Imagen subexpuesta.

Punto 10

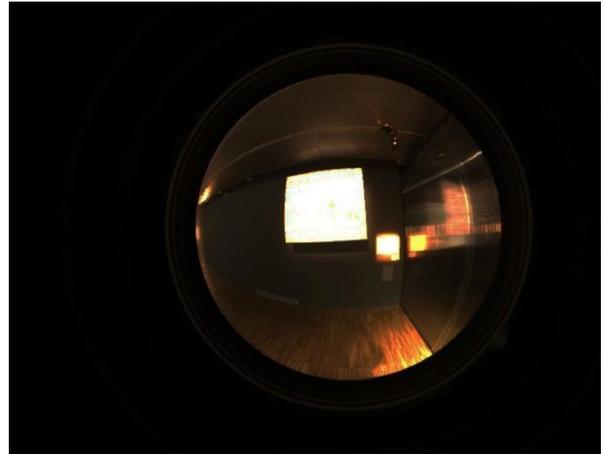


Imagen subexpuesta.



Imagen central.

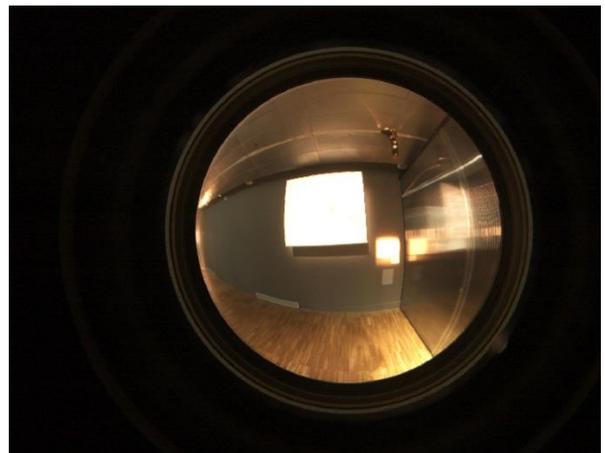


Imagen subexpuesta.



Imagen sobreexpuesta.



Imagen subexpuesta.

Paso 3: Resultados.

Las diez series de fotografías tomadas en la campaña de medición fueron colocadas dentro del software de cálculo de luminancias para obtener imágenes en HDR y falso color que se encuentran en el anexo 7. Para este aparatado se escogieron cuatro imágenes en HDR que se aprecian en las figuras 118, 120, 122 y 124. Las imágenes obtenidas fueron procesadas en el software para convertirlas en imágenes en falso color, como vemos en las figuras 119, 121, 123 y 125. Las imágenes HDR permiten ver el color de las superficies y las de falso color muestran los valores de luminancia.

Además, las imágenes en falso color permiten agrupar las superficies por conjuntos de luminancias. Es así que se aprecian tres conjuntos que destacan por el tipo de iluminación: luz directa y recortada. El primer conjunto está formado por todos los objetos de exhibición. El segundo conjunto conformado por las cartelas informativas. El tercer conjunto reúne las superficies que conforman el espacio, es decir, paredes, suelos y techos. Las imágenes en falso color muestran la escala de luminancias adoptada que va de 0 cd/m^2 a 11 cd/m^2 . En cada una de las escenas analizadas se observa el valor de luminancia medio, el valor de luminancia mínimo y el valor de luminancia máximo. En las cuatro escenas escogidas el valor medio de las luminancias se encuentra entre 0.42 cd/m^2 y 0.68 cd/m^2 . Además, la escala de colores nos revela que la luminancia media en el primer conjunto, los objetos de exhibición, se acerca a las 7 cd/m^2 . El valor de luminancia medio en el segundo conjunto, las superficies de las cartelas, rondan los 9 cd/m^2 . El tercer conjunto, las superficies que contienen el espacio, tiene un promedio de luminancia de 0.15 cd/m^2 . Como podemos ver, los dos primeros conjuntos tienen valores de luminancia bastante similares; mientras que, el tercer conjunto se diferencia por un mayor contraste de luminancias.

La materialidad de los tres conjuntos se diferencia principalmente por el color. El contenedor del espacio está compuesto de superficies de color negro que absorben la luz y por tanto tienen bajo nivel de luminancia. Los objetos de soporte a la exhibición, sean marcos de cuadros, mesas, cartelas, etc. son de color blanco. Las superficies propias de exhibición tienen colores variados. Continuando con el análisis cromático, en las imágenes en HDR se observa que los objetos del primer conjunto son iluminados empleando dos niveles de temperatura de color. Los objetos de exhibición están iluminados con luz fría y las cartelas de información están iluminados con luz cálida.

- El primer conjunto de superficies, los objetos que forman parte de la colección y sus respectivos soportes, presenta luminancias que rondan entre 1 cd/m^2 y 11 cd/m^2 . El valor medio de luminancia es 7 cd/m^2 . Iluminados con T.C. de 4000 K.
- El segundo conjunto, las cartelas informativas que acompañan a los objetos exhibidos, tiene valores de luminancias entre 3.5 cd/m^2 y 11 cd/m^2 . El valor medio de luminancia es 9 cd/m^2 . Iluminados con T.C. de 2700 K.
- El tercer conjunto, las superficies del espacio, presenta luminancias entre 0 cd/m^2 y 0.9 cd/m^2 . El valor medio de luminancia es 0.15 cd/m^2 . No tiene iluminación propia, sólo reflejo.

El análisis paralelo de las imágenes en HDR y en falso color nos revela que la temperatura de color es una herramienta útil para distinguir entre el primer y segundo conjunto de superficies con diferente significado, aun cuando el rango de luminancias que observamos es el mismo en ambos casos. La distinción de información gracias al color de la luz es de ayuda al observador para asimilar rápidamente el contenido de la exposición.



Figura 118. HDR en punto de medición 1

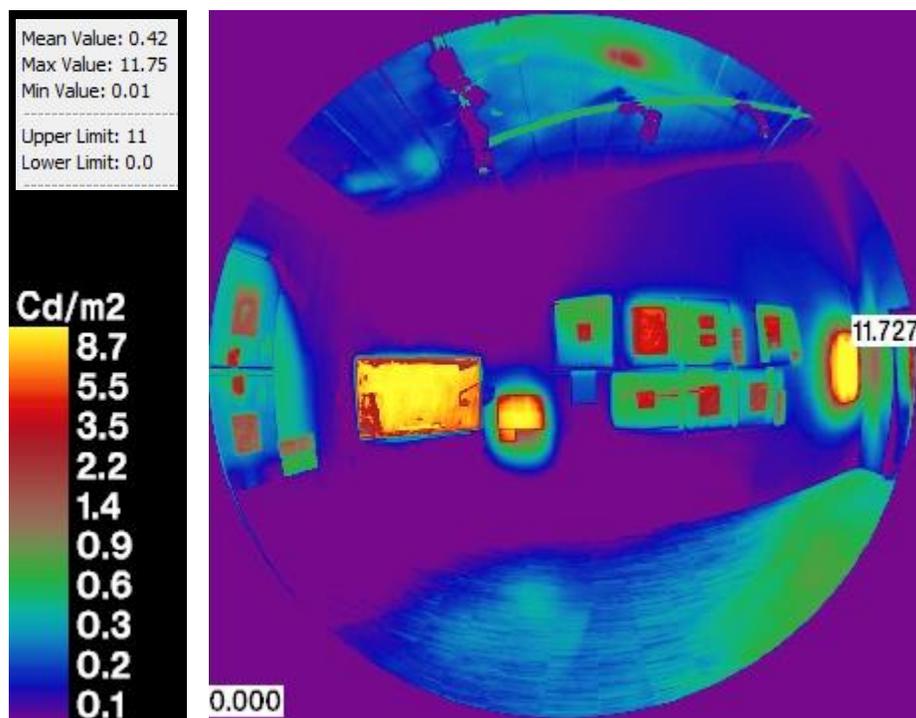


Figura 119. Imagen Falso color en punto de medición 1.



Figura 120. HDR en punto de medición 3.

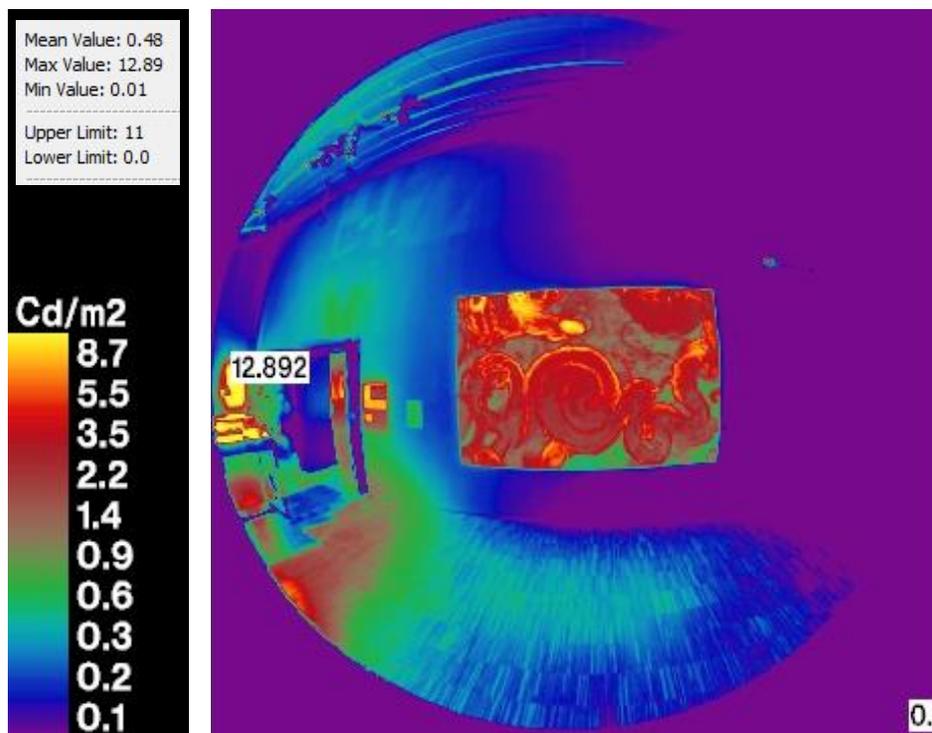


Figura 121. Imagen Falso color en punto de medición 3.



Figura 122. HDR en punto de medición 7

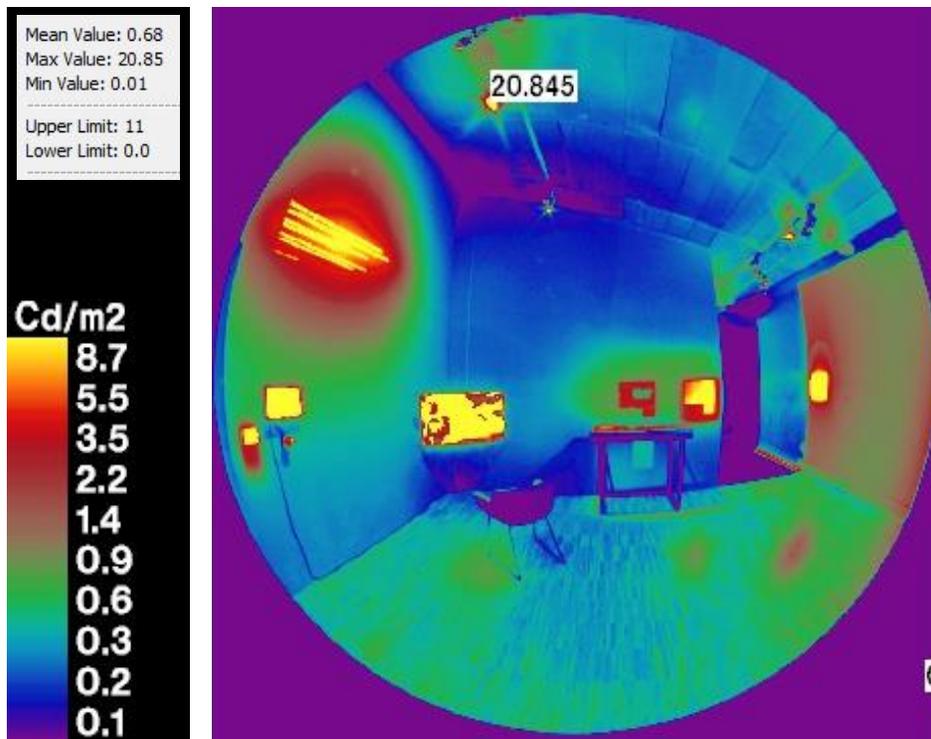


Figura 123. Imagen Falso color en punto de medición 7.

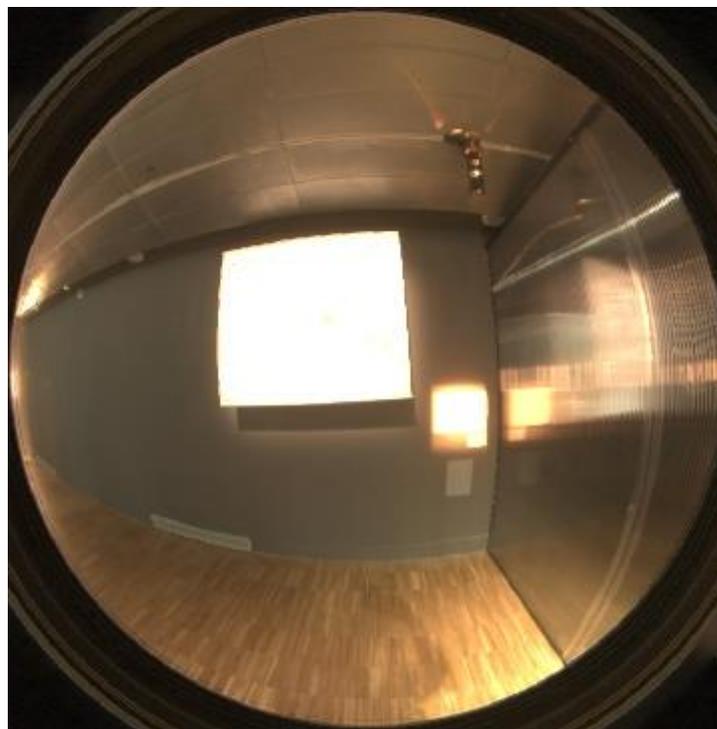


Figura 124. HDR en punto de medición 10.

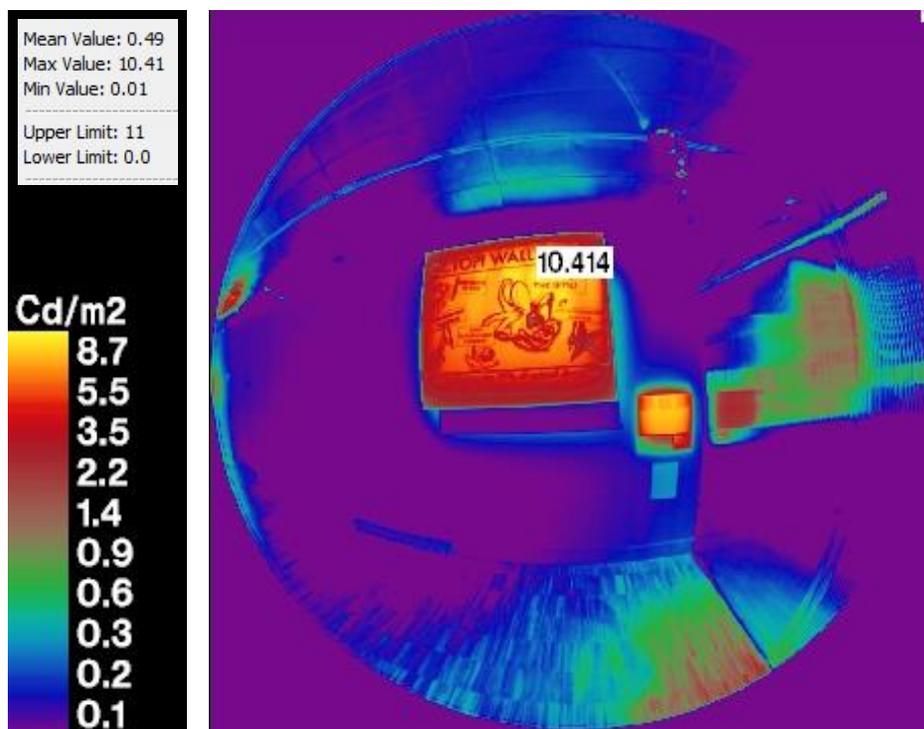


Figura 125. Imagen Falso color en punto de medición 10.

Capítulo 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS



Figura 126. El sol vuelve a acariciar el rostro de Ramsés II en el templo de Abu Simbel. *La Vanguardia*. 2019. <https://www.lavanguardia.com/ocio/viajes/20190222/46598331643/abu-simbel-egipto-sol-22-de-febrero-ilumina-ramses-ii.html>



Figura 127. Vista interior. *Jeff Hu. La vanguardia*. 2019.

“Siempre quise escribir un libro sobre la luz. No sabría de ninguna otra cosa que pudiera recordarme más a la eternidad”

Andrzej Stasiuk (2003)

4.1 Análisis de resultados por caso de estudio.

Museo de Badalona.

La evaluación del diseño de iluminación de este museo nos permite cuantificar la luminancia en espacios con diferentes intenciones lumínicas. Se han examinado tres superficies iluminadas de conjuntos diferentes, así como el contenedor del edificio. Debido a la superposición de superficies iluminadas en el campo visual, se ha realizado un análisis de la correlación entre los valores de luminancia y la temperatura de color.

El análisis de imágenes en falso color (Figuras 67, 69, 71 y 73) revela que existen diferentes luminancias en los principales conjuntos de superficies. La luminancia más alta corresponde a la iluminación del panel de información iluminado con luz blanca. Los valores de luminancia medio-altos se encuentran en los vestigios de la ciudad romana con lámparas de luz cálida colocadas cerca del suelo y dirigidas hacia las paredes y pisos antiguos. Los valores de luminancia medio-bajos se encuentran en las nuevas pasarelas iluminadas con lámparas de luz fría sobre la superficie del suelo transitable. La luminancia más baja corresponde a las superficies negras del nuevo edificio. Las paredes, las columnas y el techo están absorbiendo los reflejos de las diferentes superficies de iluminación. A veces hay superposiciones de luminancia similares en la misma escena visual y esto puede comprometer la legibilidad de la información. El estudio de caso revela la viabilidad de utilizar fuentes de luz con diferentes temperaturas de color para separar superficies que pueden ser cercanas o coincidentes en valores de luminancia.

Los resultados del Museo de Badalona nos permiten aproximarnos a los niveles de luminancia media en cada uno de los conjuntos de superficies. Los paneles informativos tienen una luminancia media de 9 cd/m^2 y una temperatura de color de 4000 K; en las ruinas romanas el valor medio de luminancia es de 7 cd/m^2 , iluminados con temperatura de color de 2700 K; la pasarela, a su vez, con un valor medio de luminancia de 0.6 cd/m^2 y presenta una temperatura de color de 6500 K; mientras que, la media de luminancia del edificio contenedor del museo es de 0.1 cd/m^2 . El último conjunto de superficies, que contienen el espacio, cubre casi el 50% del campo visual en todos los puntos de medición; razón por la cual, el valor medio de luminancia total en el campo visual es inferior a 1 cd/m^2 . Si la visión escotópica comienza cuando la luminancia promedio en todo el campo visual es menor de 10 cd/m^2 (Hofmann & Ganslandt, 1992), podemos decir que el espacio corresponde a un diseño de baja intensidad de luz. Por tanto, la percepción del color de las superficies comienza a reducirse ya que la visión se estimula principalmente por el uso de los fotorreceptores llamados bastones. Teniendo en cuenta que un aspecto importante para las actividades visuales es el color de las superficies, la temperatura del color podría servir como una herramienta para el diseño de iluminación para llevar información cromática al campo visual.

En las Figuras 66, 68 y 72, el puente metálico ocupa hasta el 10% del campo visual y se superpone a las ruinas romanas que alcanzan hasta el 40% del campo visual. La nueva pasarela metálica presenta un nivel de luminancia media 10 veces inferior a las antiguas paredes y pavimentos, sin embargo, en muchas ocasiones esa diferencia de $1/10$ se reduce a $1/1$. Para diferenciar entre la actividad visual de caminar y la de observar las ruinas se utilizan dos temperaturas de color distintas. La primera, está iluminada con una luz muy fría en comparación a la segunda, de la ciudad romana, que tiene luz cálida. La poca diferencia entre contraste de luminancias de los conjuntos de superficies es, incluso, más evidente en las Figuras 66 y 70, en donde el contraste de luminancia

entre las superficies de la ciudad romana y los paneles de información es tan solo de 1/1. Este último conjunto de superficies, los paneles, representa menos del 1% del campo visual. Por tanto, es necesario destacarlo con una temperatura de color diferente.

Es así que en este análisis vemos tres características a destacar en el diseño lumínico. La primera, la información visual que nos llega de las superficies se puede agrupar en cuatro conjuntos que corresponden a actividades diferentes relacionadas con la visión. Las fotografías muestran que estas actividades ocurren simultáneamente a lo largo del recorrido del museo. La segunda, los valores de luminancia de estos cuatro conjuntos de superficies a veces se superponen entre sí. La tercera, la temperatura de color resalta el contraste cromático entre superficies en el campo visual. De acuerdo con los resultados obtenidos, la comparación de cada conjunto de superficies estudiadas sirve para deducir que, para espacios con poca intensidad lumínica, la temperatura de color ayuda a diferenciar y clasificar la información visual.

El diseño lumínico de los museos arqueológicos en Barcelona sirve para analizar la repercusión del uso de la temperatura de color como herramienta en la percepción visual dentro de los espacios con bajos niveles de iluminación. El museo de Badalona cumple con la normativa actual para iluminar los objetos de exhibición, sin embargo, las regulaciones son más flexibles sobre cómo iluminar otras superficies. Se deja al diseñador de iluminación la posibilidad de elegir cómo iluminar el resto de superficies teniendo en cuenta las actividades del usuario. En espacios con poca intensidad de luz, cuando los valores de luminancia de las superficies son muy similares, el color de la superficie es ineficaz para distinguir la información visual. En el caso de que se superpongan superficies iluminadas para diferentes actividades, la temperatura de color sirve como herramienta para dar información visual al usuario. Por tanto, ambos valores, luminancia y temperatura de color, responden a las finalidades del diseño arquitectónico y lumínico. El objetivo del diseño de iluminación es lograr la combinación correcta de temperatura de color y luminancia según la actividad visual. Si bien es evidente que cada actividad requiere un diseño de iluminación diferente, el presente trabajo revela que la temperatura de color permite diferenciar un mayor número de actividades simultáneamente.

En los casos de conservación e interpretación del patrimonio construido donde los valores de luminancia son bajos, nos guiamos por la visión escotópica. Por tanto, la información visual proporcionada por las superficies de color se reduce y nos guiamos por el contraste de luminancia. La temperatura del color es una herramienta en el diseño de iluminación para devolver información cromática disminuida por la visión escotópica y proporcionar información visual cuando los valores de luminancia se parecen entre sí. El uso de diferentes temperaturas de color permite diferenciar superficies con bajo contraste de luminancia en función de las actividades relacionadas con la visión. La investigación en diseño de baja intensidad luminosa contribuye con dar estrategias de ahorro de energía en el campo de la iluminación eléctrica.

Baños termales Aire.

El diseño de un balneario urbano dedicado a la relajación y bienestar del cuerpo busca su inspiración en la tradición de los baños de las antiguas civilizaciones. Los nuevos baños termales de AIRE procuran recrear la atmosfera de calma similar a la de un templo para lo cual los diseñadores del espacio recurrieron al uso de la luz y la sombra. El diseño lumínico que propusieron los arquitectos fue planteado para que las piscinas de los baños se asimilaran a objetos preciosos como unas joyas dentro de los vestigios de una edificación en desuso. Para ello se decidió construir un entorno en penumbra con la iluminación imprescindible para vislumbrar los límites del espacio y que permitiera resaltar las piscinas.

En espacios de baja intensidad lumínica los valores de luminancias tienen un rango más acotado en comparación a los espacios con mucha luz. Cuando el contraste entre luminancias de las superficies es bajo, es necesario recurrir a otras estrategias que forman parte del diseño lumínico para diferenciar entre superficies con diferente significado para el usuario. El uso de velas para la iluminación de los espacios de circulación y de leds para las piscinas es una estrategia que se concreta en asignar una temperatura de color a cada uso.

La valoración de la luz en este caso de estudio permite cuantificar las luminancias de las superficies y agruparlas por rangos asociados a conjuntos de superficies. El análisis nos lleva a identificar dos conjuntos diferentes de superficies en la escena visual. El primer conjunto, las superficies que definen el espacio, presenta una iluminancia media de 0.3 cd/m^2 y una temperatura de color de 1850 K. El segundo conjunto, los vasos de piscinas, tiene el promedio de luminancias en 3.5 cd/m^2 y está iluminado con temperatura de color de 4000 K.

Observamos que a pesar de que los valores medios de luminancias de cada conjunto de superficies son distantes entre sí, algunos valores coinciden dentro del rango de luminancias. Por tanto, se recurre al uso de temperaturas de color de la luz distantes entre sí, para enfatizar la diferencia entre cada conjunto de superficies. El propósito de los diseñadores lumínicos fue alcanzado gracias a que procuraron diferenciar la estructura nueva de la antigua no solo con la cantidad de luz sino con el color de la luz.

Los baños termales de Aire, en la sede de Barcelona, son un claro ejemplo del uso de la temperatura de color de la luz como lenguaje para comunicar diferencias entre las superficies que se perciben dentro del campo visual. En este caso se intuye la intención de distinguir entre superficies que tienen usos diferentes. La luz cálida de las velas permite reconocer los límites del espacio y, a la vez, sirve para guiarnos por el recorrido entre sus muros y pavimento. La luz fría del LED destaca las superficies de los vasos de las piscinas e invitan al visitante a sumergirse en el agua. De acuerdo con los resultados obtenidos en este caso de estudio, el análisis comparativo de cada conjunto de superficies sirve para confirmar que, en espacios con poca intensidad lumínica, la temperatura de color ayuda a diferenciar y clasificar la información visual.

Museo de arte contemporáneo de Barcelona, MACBA.

El diseño de la exposición de la colección Rafael Tous es una excelente oportunidad que encontró el MACBA para exponer el significativo esfuerzo del artista por salvaguardar las prácticas experimentales de los años setenta y ochenta en Cataluña. La elección de hacer esta exposición en la Capella Convent dels Àngels es ideal para resaltar el carácter onírico que envuelve a las piezas de la colección. El diseño lumínico que se ideó tiene la volición de transportar al visitante de la exposición a un lugar que parece congelado en el tiempo y que permite ir descubriendo a lo largo del recorrido no sólo cada una de los objetos expuestos, sino también el mensaje final que articula el discurso de la exposición.

Con el objetivo de lograr reproducir una atmosfera misteriosa se decidió cerrar completamente el paso de la luz solar y dejar la capilla cubierta en una penumbra que sirva como lienzo oscuro para comenzar a dibujar, con luz, las siluetas de las obras expuestas y del recinto. Para ello se decidió iluminar cada una de las piezas de la colección con una luz recortada, dirigida y cálida proveniente del techo. Además, se iluminó la capilla con luces cálidas en movimiento y en el ábside se utilizó dos colores de luz que contrastan con el resto de la iluminación. La intención de utilizar diferentes colores de luz para resaltar el final de la capilla sirve para diferenciar entre dos rutas similares en longitud y destino, pero al mismo tiempo diferentes en contenido.

Es así que observamos tres conjuntos de superficies. La primera, los objetos de exhibición, tienen luminancias promedio de 3.5 cd/m^2 y temperatura de color de 2700 K. El segundo, el ábside de la capilla, con un valor medio de luminancia de 2.2 cd/m^2 , pero iluminado con dos colores de luz distintos: rojo y azul. El tercero, la nave de la capilla, con luminancias alrededor de 0.2 cd/m^2 cuenta con temperatura de color de 3000 K.

En los espacios de este tipo de galerías los valores de luminancias tienen un rango más acotado en comparación a los espacios con mucha luz. Cuando el contraste entre luminancias de las superficies es bajo, es necesario recurrir a otras estrategias que forman parte del diseño lumínico para diferenciar entre superficies con diferente significado para el usuario. El uso del color de la luz es una estrategia que se suma al uso de la temperatura de color para comunicar al visitante diferencias en el uso del espacio. En este caso la intención es de distinguir entre dos rutas aparentemente iguales y que conducen al mismo destino, en donde un mensaje escrito, también con luz, revela el significado de la exposición. El uso de diferentes temperaturas de color para iluminar los objetos expuestos y la capilla parece ser imperceptible al ojo del usuario del espacio. La dificultad por distinguir entre dos conjuntos de superficies, iluminadas con temperaturas de color que se diferencian tan solo por 300 K, es superada gracias a que en el primer conjunto se utiliza una luz estática y en el segundo conjunto hace uso de la luz en movimiento.

El diseño de iluminación en la Capella Convent dels Àngels nos permite observar que para diferenciar entre temperaturas de color se debe considerar valores mayores a los utilizados en este diseño. Además, la incorporación de fuentes de luz con distintos colores sirve también como estrategia de comunicación. Observamos que los rangos de valores de luminancias coinciden en los dos lados del ábside de la capilla, sin embargo, se recurre al uso del color de la luz para diferenciar entre las rutas que el visitante elige para llegar a descubrir el mensaje que acompaña al discurso de la exposición: No hay REPLAY.

Restaurante Feroz.

El diseño interior del restaurante tuvo como inspiración la coexistencia de la jungla y la ciudad en un mismo lugar, para ello fusionó también la imagen de un refinado restaurante y la de un atrevido bar. Este concepto de dualidad lo llevaron también al diseño lumínico empleando diferentes temperaturas de color e intensidades de luz. Además, utilizaron la estrategia de reducir el alto nivel de luz del exterior a través de un pasadizo profundo y pintado de negro que conduce al usuario desde el ingreso principal hasta los salones de comedor. Una vez dentro de cada salón resaltan las superficies iluminadas, destinadas a comer o beber, con el fondo de las paredes oscuras y poco iluminadas. El diseño logra así provocar la curiosidad del visitante por descubrir cada uno de los detalles en la decoración.

Con el fin de hacer notorio que tanto los usuarios del restaurante como del bar comparten un mismo lugar, pero al mismo tiempo tienen su propio espacio, se hizo uso de una luz más cálida para la actividad de comer y una luz más fría para la actividad de beber. La distinción en el color de la luz, ayuda a distinguir rápidamente los dos conjuntos de superficies y con ello logran también orientar al usuario. Sin embargo, la diferencia entre las temperaturas de color es más perceptible cuando el espacio está ocupado ya que existe una mayor variedad de colores que resaltan cuando la temperatura de color de la luz coincide con el color, cálido o frío, de la superficie iluminada. Por tanto, cuando la temperatura de color de la luz corresponde con la gama de colores de las superficies iluminadas, la diferenciación entre conjuntos de superficies es más evidente. Cabe mencionar que existe un tercer tipo de lámpara utilizada para la iluminación general del espacio. Este tipo de lámpara es de bajo nivel de luz y sirve para iluminar tanto los límites del espacio como el recorrido dentro de los dos salones. El primer y segundo conjunto de superficies, el área de comedor y bar, tienen valores medios de luminancias en 3.5 cd/m^2 y utilizan lámparas con temperaturas de color de 3000 K y 4000 K, respectivamente. El tercer conjunto, los recorridos iluminados con candelabros, tienen un promedio de luminancias de 0.3 cd/m^2 y una temperatura de color de 2700 K.

Es así, que tanto la barra como las mesas de comensales tienen un nivel alto de luz, mientras que, el espacio resultante entre esas dos áreas se mantiene con el nivel bajo de la iluminación general. Se observa también que no se logra diferenciar a simple vista el color de la luz entre las lámparas de los candelabros y las lámparas de los proyectores sobre las mesas ya que los dos valores de temperatura de color son muy aproximados.

La evaluación del diseño de iluminación en el restaurante FEROS nos permite reconocer algunas estrategias en el diseño lumínico. En primer lugar, se observa que en espacios de baja intensidad lumínica el empleo de diferentes temperaturas de color sirve para separar zonas dentro del mismo espacio. En segundo lugar, se aprecia que la correspondencia entre el color de la superficie y el color de la luz ayuda a evidenciar la diferencia entre espacios con gamas de color cálida y color frío. Además, nos sirve para corroborar que para diferenciar entre temperaturas de color se debe considerar valores mayores 1000 K. Por último, este caso es útil también para observar que la estrategia de usar diferentes intensidades de luz para diferenciar la zona de circulación de la zona de reposo puede utilizarse en paralelo a la estrategia del uso de diferentes temperaturas de color para diferenciar entre el uso de comedor y de bar.

Centre de Cultura Contemporànea de Barcelona, CCCB.

La exposición Ciencia Fricción dentro del CCCB es un ejemplo típico de galería de arte en donde se opta por resaltar las piezas expuestas por contraste con el entorno oscuro. La idea detrás del diseño es la de un contenedor negro, llamado también Black Box (YATIR, 2020), que sirve como un fondo poco perceptible a la vista. El diseño lumínico consiste en dirigir la luz a las obras exhibidas y a la información museográfica. En este diseño en particular vemos muchas pantallas de televisión y proyecciones sobre superficies verticales con un nivel alto de luminancia. El efecto de que la fuente de luz proviene de la misma superficie de exhibición es conseguido también con las otras piezas de la muestra. Tanto los objetos de la colección como las cartelas informativas son iluminadas con un haz de luz que está recortado y ajustado a su propio tamaño y forma. El resultado es que hay un claro contraste de luminancias entre la superficie de interés museográfico y el fondo.

Casi todas las superficies iluminadas oscilan en el mismo rango de luminancias, entre 7 cd/m^2 y 9 cd/m^2 ; mientras que, el fondo tiene una media de luminancia de 0.15 cd/m^2 , obteniendo así un contraste de 10/1 entre el objeto y el fondo. Esta estrategia de diseño lumínico funciona bien para resaltar y separar el contenido museográfico del fondo; sin embargo, para clasificar la información visual que recibimos de las superficies iluminadas es necesario recurrir a otro tipo de recursos lumínicos. Observamos que se utiliza el cambio de la temperatura de color para diferenciar entre la información escrita, los objetos de la colección e incluso la información en los dispositivos audiovisuales. El primer conjunto, los objetos, está iluminado con luz blanca fría de 4000 K; y el segundo conjunto, las cartelas, está iluminado con luz blanca cálida de 2700 K. Además, la luz fría de los objetos expuestos es algo más notorio en las pantallas y las superficies con proyecciones. Cabe resaltar que el color de la luz sobre las superficies iluminadas es más notorio debido a que el entorno actúa como un fondo negro que potencia el contraste cromático.

El recorrido en la galería es posible de percibir visualmente gracias a que el nivel de iluminación sobre las obras expuestas permite que las reflexiones de la luz nos orienten dentro del espacio. Sólo en el caso de que los niveles de luz sean muy bajos como es en el caso de la tercera sala, se utiliza una fuente adicional de luz para informar de un giro en el recorrido. La fuente de luz adicional consiste en una tira de led de 2700 K que sirve de línea luminosa que indica el cambio de dirección en el recorrido. Como está línea destaca por su posición en el suelo no ha sido necesario utilizar otra temperatura de color.

El análisis del diseño lumínico en la sala de exposiciones del CCCB que alberga la exposición de Ciencia fricción demuestra una vez más que el uso de diferentes temperaturas de color es otro recurso que debemos considerar cuando trabajamos con bajos nivel de iluminación. Observamos que la diferenciación cromática gracias al color de la luz permite separar visualmente la información escrita de la información gráfica dentro de la exposición. Este caso de estudio también permite evidenciar que las fuentes de luz, a veces, no son únicamente las luminarias destinadas a iluminar las superficies de interés museográfico, sino que también lo pueden ser las propias obras de la colección.

4.1 Análisis comparativo de casos de estudio.

La recopilación de los datos extraídos en cada caso de estudio nos permite ordenarlos de forma que puedan ser comparados entre ellos. Este análisis sirve para hacer una lectura transversal de la información que nos sirve para extraer conclusiones generales.

En primer lugar, se analizan los valores mínimos, medios y máximos de las escenas que han sido escogidas para representar cada caso de estudio. Estos tres valores de luminancia de las cuatro sesiones fotográficas se ordenan consecutivamente en los cinco casos de estudio (ver figura 128). La gráfica reúne todos los datos obtenidos y presenta, en el eje de las abscisas, el rango de luminancias percibidas por el ojo humano en escala logarítmica; mientras que, las escenas escogidas por caso de estudio se encuentran en el eje de las ordenadas. La gráfica muestra que el promedio de luminancia en todos los casos es menor a 1 cd/m^2 . Según algunos autores, los valores que corresponden con la visión mesópica son aquellos menores a 3 cd/m^2 , aunque otras fuentes indican 10 cd/m^2 como límite. Cabe destacar que el valor mínimo de luminancia está limitado por la precisión de los datos obtenidos con el luminancímetro y el software empleado, ambos llegan a medir las luminancias con precisión de dos decimales. Los valores máximos de luminancia en todos los casos de estudio pertenecen a las luminancias de las propias fuentes de luz o sus reflejos en superficies de reflexión especular. En ningún caso ocurre deslumbramiento ya que la relación entre la luminancia máxima y media es de $10/1$. Esto nos advierte del cuidado que se debe tener en el reparto de luminancias tanto de superficies reflectantes como de las propias luminarias.

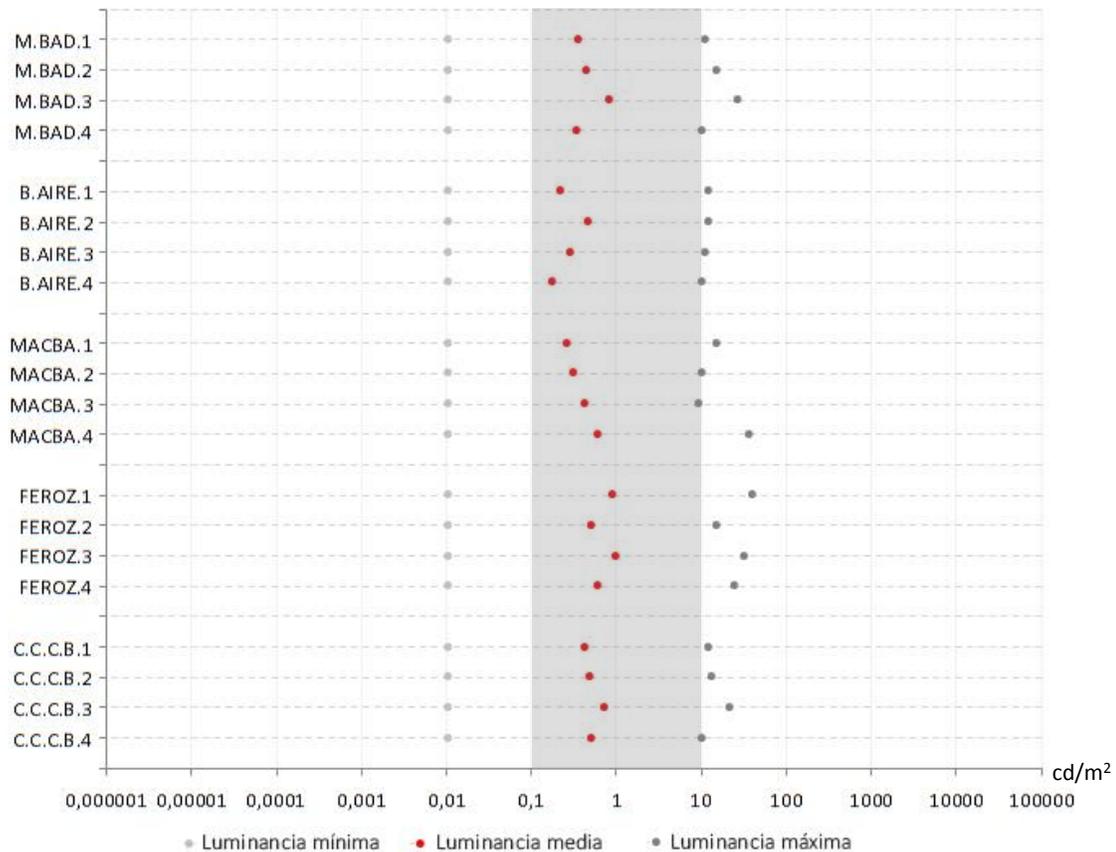


Figura 128. Gráfica comparativa de luminancias en cuatro escenas de cinco casos de estudio.

En segundo lugar, se hace una evaluación pormenorizada de los valores de luminancia y del color de la luz discriminándolos por conjuntos de superficies que aportan diferente información visual. El campo visual ha sido sectorizado por áreas que abarcan superficies que tienen relación con determinadas actividades en donde la visión del usuario está involucrada. Cada una de estas áreas nos permiten encontrar el valor promedio de luminancia que corresponde a cada conjunto de superficies. Además, se identifica qué temperatura de color ha sido utilizada para iluminar las superficies dentro de la escena visual. Los valores de luminancia se ubican, en el eje de las abscisas, dentro de la escala de luminancia que corresponde con la visión mesópica. La temperatura de color se ha ubicado en el eje de las ordenadas.

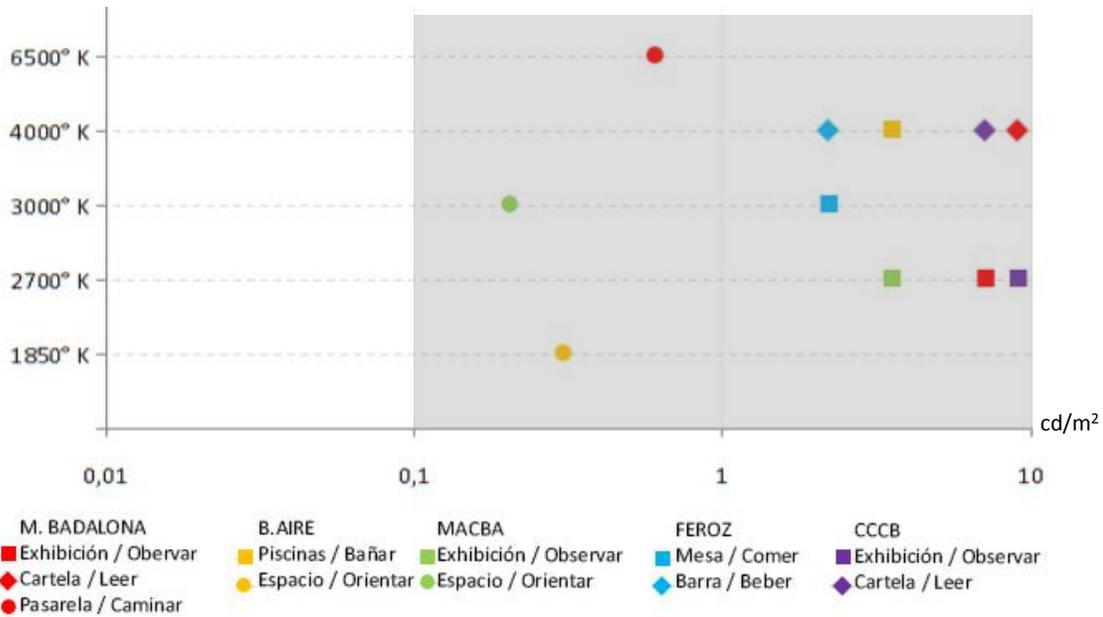


Figura 129. Gráfica comparativa entre conjuntos de superficies, con distinta tarea visual, en los cinco casos de estudio.

En la gráfica podemos observar simultáneamente la correspondencia entre el promedio de luminancias de cada conjunto de superficies con la temperatura de color empleada para iluminarla. En el Museo de Badalona vemos que el conjunto que pertenece a la exhibición del museo tiene valores de luminancia similares a las cartelas informativas. Las superficies de estos dos grupos se superponen ya que las cartelas están hechas de metacrilato transparente ubicadas delante la exhibición. La diferenciación de estos dos conjuntos de superficies no es evidente por el contraste de luminancias, pero sí se logra gracias al uso de dos temperaturas de color distintas. Lo mismo sucede en caso de la exposición en el CCCB, los objetos de exhibición y las cartelas se diferencian por la temperatura de color. En el MACBA y el restaurante Feroz se recurre a la misma estrategia con la diferencia de que los conjuntos de superficies responden a otro tipo de actividades relacionadas a la visión. En el caso del MACBA se diferencia, entre la exhibición y el recorrido que sigue el visitante de la exposición, con el color de la luz. En el restaurante Feroz se segrega la información visual, áreas de comer y áreas de beber, con la temperatura de color. Por último, en el caso de los baños termales de Aire, si bien existe un contraste de luminancias de 10/1 entre los dos conjuntos de superficies que es suficiente en casos en donde se desea utilizar una sola temperatura de color; observamos que empleando diferentes temperaturas de color se consigue un contraste cromático que ayuda a resaltar los vasos de las piscinas, la intención original del diseño.

Capítulo 5: CONCLUSIONES



Figura 130. Alpha Tunnel looking toward the East Portal at Roden Crater by James Turrell, an art installation in the northern Arizona desert. Klaus Obermeyer. 2019. https://archithese.ch/index.php/ansicht/sesam-oeffne-dich.html?page_g45032=4

“Incluso un espacio que se pretende que quede oscuro debería tener un poco de luz procedente de alguna misteriosa abertura para decirnos lo oscuro que es en realidad. Todo espacio debe ser definido por su estructura y por el carácter de su luz.”

Louis Kahn, citado por Norberg-Schulz & Digerud (1990)

5.1 Confirmación de la hipótesis.

La hipótesis inicial planteaba que en los espacios con muy poca luz la temperatura de color tiene un papel destacado para permitirnos distinguir e interpretar la información que llega a nuestros ojos. Con este punto de partida se ha desarrollado la investigación del estado del arte, el análisis de los casos de estudio y la sistematización de la información. Este documento culmina en las conclusiones, donde se confirma la hipótesis planteada.

La temperatura de color de la luz es un parámetro del diseño lumínico que adquiere interés desde la aparición de las lámparas de descarga como nuevas fuentes de luz artificial, a principios del siglo XX. Arie Andries Kruithof, en 1941, y los estudios posteriores hasta 1970, evaluaron qué combinaciones de temperatura de color e intensidad lumínica ofrecían condiciones agradables para las personas, y establecieron que los espacios de baja intensidad lumínica deben estar iluminados con temperaturas de color bajas. Con la incorporación del IRC en 1974 como una nueva variable de evaluación de la calidad de la luz, para situaciones que requieren agudeza visual, se concluyó que el confort no está tan directamente relacionado con la temperatura de color. Sin embargo, en el gráfico de Kruithof lo más significativo no es la información cuantitativa precisa, sino las zonas que diferencia en función de las combinaciones de los dos parámetros que compara: Iluminancia y temperatura de color. Los valores de la zona central en blanco representan condiciones lumínicas similares a las que el hombre se ha adaptado en entornos naturales. Para valores de iluminancias mayores de 500 lx, el intervalo del gráfico en blanco corresponde a un intervalo de temperatura de color de entre 3000 K a 10000 K. Es decir, que en visión diurna, las personas tenemos una visión cómoda o agradable con temperaturas de color de la luz muy diferentes. En cambio, en la banda baja del gráfico, sólo valores bajos de temperatura de color entran en la zona agradable, los valores altos pasan al área gris, identificada como no agradable.

Cabe mencionar que sólo se analizan cinco casos de estudio debido a la dificultad de encontrar espacios con niveles lumínicos muy bajos que utilicen intencionadamente diferentes temperaturas de color de luz. Hay pocos proyectos lumínicos ideados para niveles tan bajos de luz. La observación, medición y análisis de los resultados de los diferentes casos, vistos en los capítulos 3 y 4, permiten demostrar que el uso de la temperatura de color está asociado a voliciones del diseño lumínico. Se asignan temperaturas de color diferentes a superficies u objetos que tienen asignadas funciones distintas. En cierto modo se establece un lenguaje con la luz.

Una escena con valores de intensidad lumínica inferiores a 10 lux ofrece luminancias bajas. Las superficies iluminadas de los objetos tienen luminancias entre 0.1 cd/m^2 y 10 cd/m^2 , que corresponden a valores de la visión mesópica. La luminancia promedio oscila entre 0.1 cd/m^2 y 1 cd/m^2 y más del 50% del área en el campo visual están entre 0.01 cd/m^2 y 0.1 cd/m^2 . Debido a que el rango de la visión mesópica es más estrecho que el de la visión escotópica o fotópica la posibilidad de destacar superficies por contraste de luminancias es menor y, en los casos de estudio, esta limitación se compensa con el uso de diferentes temperaturas de color.

Con los datos obtenidos en el estudio podemos retomar el gráfico de Kruithof para hacer una reflexión acerca del uso de la temperatura de color en espacios de baja intensidad lumínica. Si bien los valores encontrados están fuera de la zona considerada como agradable o “natural”, las superficies iluminadas con temperaturas de color más bajas corresponden a aquellas que son el centro de la actividad, mientras que las superficies en las que se emplea temperaturas de color más

altas producen una sensación de extrañamiento. Se ha constatado que la temperatura de color puede aportar un significado en espacios de baja intensidad lumínica. En cambio, en situaciones de alta intensidad lumínica los mismos valores de temperatura de color no se perciben tan extraños o diferentes a la comodidad ya que quedan situados, en el gráfico, en la zona señalada por Kruithoff como “pleasing”. El análisis de los resultados en cada uno de estos espacios conlleva a corroborar que el uso de diferentes temperaturas de color, en baja intensidad de luz, es capaz de aportar información. En los casos de estudio se distinguen hasta un máximo de tres temperaturas de color en una misma escena, lo que permite una comunicación efectiva mediante el contraste cromático de las superficies.

De este estudio se desprende que en visión mesópica y escotópica, cuando los valores de luminancias predominantes están por debajo de 10 cd/m^2 , los contrastes de luminancias tienen menos margen de valores en comparación con la visión fotópica que abarca desde 0.1 cd/m^2 hasta $100\,000 \text{ cd/m}^2$. En el recorrido de espacios de baja intensidad lumínica la información cromática de las superficies disminuye y los valores de luminancias de las superficies se parecen mucho entre sí. En estos casos es preciso señalar tres estrategias eficaces en el diseño lumínico. Primero, utilizar la temperatura de color para diferenciar superficies con luminancias similares, pero con distinto significado para el observador. Segundo, emplear la temperatura de color alta para resaltar los elementos extraños al uso principal del espacio, pero que complementan la información visual del usuario. Tercero, evitar la intrusión lumínica del exterior o cualquier escena visual con contrastes de luminancias que sobrepasen la proporción de 1:10. Por lo tanto, podemos concluir que, en un espacio con muy poca intensidad lumínica, el uso de diferentes temperaturas de color de la luz, si está asociado a distintos roles que cumplen las superficies, facilita la comunicación visual dentro del espacio.

5.2 Líneas de trabajo para posteriores investigaciones.

La variable del tiempo es un factor fundamental que afecta en varios sentidos al desarrollo de esta tesis. Se ha puesto énfasis en cumplir con el objetivo planteado en esta investigación dentro del plazo establecido para la investigación; sin embargo, hay aspectos que merecen seguir indagándose con respecto al diseño de baja intensidad lumínica. Entre ellos se destacan:

- Realizar mediciones en espacios domésticos en donde los niveles de luz pueden ser incluso más bajos de los que vimos en los casos de estudio presentados.
- Investigar con mayor detenimiento la correspondencia entre el color de las superficies y el color de la luz para encontrar si existe una relación en el campo de la colorimetría que pueda ser aplicado al diseño lumínico.
- Continuar en la investigación del beneficio asociado a la temperatura de color incluyendo otros parámetros más allá de la iluminancia; tales como la luminancia, el color y la textura de las superficies, el IRC, la acomodación y adaptación del ojo, etc.
- Demostrar que la estrategia de uso intencional de diferentes temperaturas de color, en el diseño lumínico de espacios con bajo nivel de luz, sirve también en espacios urbanos.
- Aplicar las conclusiones extraídas en espacios destinados a personas con visibilidad disminuida para observar si existe una mejora en el rendimiento de sus actividades.

BIBLIOGRAFÍA

- AADL. (2006). Luminotecnia. Retrieved January 19, 2022, from IRAM-AADL J 2006 website: <http://www.aadl.com.ar/normas-iram-aadl/>
- Aguilar Sánchez, A. (2014). *Sunlight and glare : the impact of sun patches on the light balance of indoor spaces* (Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona). Retrieved from https://discovery.upc.edu/permalink/34CSUC_UPC/rdgucl/alma991004888912306711
- Alberti, L. B. (1435). *De Pictura*. Editions Macula; Illustrated edición (14 febrero 1992).
- Andulce, P. (2015, October). Relajo Urbano. *La Tercera, Mas Deco*, 40. Retrieved from https://abaa-arq.com/wp-content/uploads/2021/10/abaa_mas_deco_la_tercera_aire_spa_chile_2013.pdf
- Arnau Amo, J. (2014). *El Espacio, la luz y lo santo : la arquitectura del templo cristiana* (F. J. Avilés Jiménez & M. E. Gutiérrez Mozo, Eds.) [Book]. Toledo: Colegio de Arquitectos de Castilla La Mancha.
- Aston, S. M., & Belichambers, H. E. (1969). Illumination, colour rendering and visual clarity. *Lighting Research & Technology*, 1(4), 259–261. <https://doi.org/10.1177/14771535690010040401>
- Baker, N. V., Fanchiotti, A., & Steemers, K. (1993). *Daylighting in Architecture: A European Reference Book*. London: James & James Ltd.
- Bartlett, N. R. (1965). Dark and Light Adaptation. In C. H. Graham (Ed.), *Vision and Visual Perception*. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Bazán, L. N., Ajmat, R. F., & Sandoval, J. D. (2018). LIGHTING IN MUSEUMS, VISITORS' EXPERIENCE AND SATISFACTION IN A HERITAGE CONTEXT. STUDY CASES IN NORTHWEST ARGENTINA. *Anales AFA*, 29(Especial InVision), 39–48. <https://doi.org/10.31527/analesafa.2018.inVisionT.39>
- Behling, S., & Behling, S. (2002). *Sol Power: La evolución de la arquitectura sostenible* (G. Gil, Ed.).
- Binet, H., Casati, R., Oechslin, W., Ando, T., & Cachola, P. (2002). *Das Geheimnis des Schattens : Licht und Schatten in der Architektur = The Secret of the shadow : light and shadow in architecture* (2. unverän, p. 223; H. Binet, R. Casati, W. Oechslin, T. Ando, & P. Cachola Schmal, Eds.) [Book]. 2. unverän, p. 223. Frankfurt am Main: Deutsches Architektur Museum.
- Bodmann, H. W. (1967). Quality of Interior Lighting Based on Luminance. *Lighting Research and Technology*, 32(1 IESTrans), 22–40. <https://doi.org/10.1177/147715356703200104>
- Bortoft, H., Naydler, J., & Fortea, C. (2002). *Goethe y la ciencia* (H. Bortoft, J. Naydler, & C. Fortea, Eds.) [Book]. Madrid: Siruela.
- Bouma, P. J. (1949). *LES COULEURS ET LEUR PERCEPTION VISUELLE*. Eindhoven: NV Philips' Gloeilampenfabrieken.
- Boyce, P., Akashi, Y., Hunter, C., & Bullough, J. (2003). The impact of spectral power distribution on the performance of an achromatic visual task. *Lighting Research & Technology*, 35(2), 141–156. <https://doi.org/10.1191/1477153503li075oa>

REFERENCIAS

- Boyce, P. R. (1977). Investigations of the subjective balance between illuminance and lamp colour properties. *Lighting Research & Technology*, 9(1), 11–24. <https://doi.org/10.1177/096032717700900102>
- Boyce, P. R., & Cuttle, C. (1990). Effect of correlated colour temperature on the perception of interiors and colour discrimination performance. *Lighting Research & Technology*, 22(1), 19–36. <https://doi.org/10.1177/096032719002200102>
- Brandi, U. (2012). *Lighting Design : Principles, Implementation, Case Studies* [Book]. <https://doi.org/10.11129/detail.9783034615693>
- Bright, & Arthur. (1949). *The Electric-Lamp Industry: Technological Change and Economic Development from 1800 to 1947*. New York: Macmillan.
- Casas, J. I. (1975). *OPT ICA*. Zaragoza: Cooperativa de Artes Gráficas.
- CEI & Prilux. (2019). Prilux y el Colegio San Patricio avanzan en la investigación sobre la temperatura de color. Retrieved December 10, 2021, from La revista del Comité Español de Iluminación website: <https://luciscei.com/prilux-y-el-colegio-san-patricio-avanzan-en-la-investigacion-sobre-la-temperatura-de-color/>
- CIE. (1995). *Method for Measuring and Specifying Colour Rendering. Properties of Light Sources*. (J. Schanda, Ed.). Vienna: CIE Central Bureau.
- CIE & Technical Committee ISO/TC 274, L. and lighting. (2020). CIE ISO DIS 11664-2:2020 COLORIMETRY – PART 2: CIE STANDARD ILLUMINANTS. Retrieved December 10, 2021, from ISO/CIE 11664-2 website: <https://cie.co.at/publications/colorimetry-part-2-cie-standard-illuminants>
- Coaton, J. R., & Marsden, A. M. (1997). *Lamps and lighting* (4th ed; J. R. Coaton & A. M. Marsden, Eds.) [Book]. 4th ed. London [etc: Arnold.
- Coch, H., Serra, R., & Isalgué, A. (1998). The Mediterranean blind: Less light, better vision. *Renewable Energy*, 15(1–4), 431–436. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00199-2](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00199-2)
- Cordero, E. (2016). *Estudio de Indicadores de calidad de fuentes luminosas y su correlación con la discriminación y la apariencia de color con fuentes convencionales y fuentes led*. Universidad de Extremadura.
- Custers, P., de Kort, Y., IJsselsteijn, W., & de Kruiff, M. (2010). Lighting in retail environments: Atmosphere perception in the real world. *Lighting Research & Technology*, 42(3), 331–343. <https://doi.org/10.1177/1477153510377836>
- Cuttle, C. (2010). Towards the third stage of the lighting profession. *Lighting Research & Technology*, 42(1), 73–93. <https://doi.org/10.1177/1477153509104013>
- De las Casas, J. M., González, R., & Puente, R. (1991). *Curso de iluminación integrada en la arquitectura*. Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid COAM.
- De Ponte, S. (1996). *Architetture di luce : luminoso e sublime notturno nelle discipline progettuali e di produzione estetica* (S. Dierna, Ed.) [Book]. Roma: Gangemi.
- Domínguez Carreño, E. (2015). *El Valor de la sombra : reflexiones sobre el diseño de la oscuridad en la luz* (Dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior

- d'Arquitectura de Barcelona; H. Coch Roura & R. San Martín, Eds.). Retrieved from https://discovery.upc.edu/permalink/34CSUC_UPC/rdgucl/alma991003978599706711
- Dong, L., Shang, X., Zhao, Y., & Qin, L. (2018). The impact of LED light color on the dark adaptation of human vision in tunnel entrances. *IEEE Photonics Journal*, *10*(5), 1–11. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2868829>
- Espinoza Cateriano, E., Lopez-Besora, J., Alonso-Montolio, C., Coch Roura, H., & Crespo Cabillo, I. (2022). The Value of the Colour Temperature in a Low Light Intensity Design. In J. L. C. (eds) Littlewood J., Howlett R.J. (Ed.), *Sustainability in Energy and Buildings 2021. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 263* (pp. 135–145). https://doi.org/10.1007/978-981-16-6269-0_12
- Espinoza, E., Coch, H., & Crespo, I. (2021). Characterization of library lighting design: A study of dynamic and static space. In J. C. Soares Gonçalves (Ed.), *Planning Post Carbon Cities: 35th PLEA Conference on Passive and Low Energy Architecture, A Coruña, 1st-3rd September 2020: Proceedings* (pp. 73–78). <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497947>
- Espinoza, E., Lopez-Besora, J., Isalgue, A., Coch, H., & Crespo, I. (2020). Evaluation of Three Lighting Software in the Use of Different Light Intensity Spaces. In J. L. C. (eds) Littlewood J., Howlett R.J. (Ed.), *Sustainability in Energy and Buildings 2020. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 203*. (pp. 419–429). https://doi.org/10.1007/978-981-15-8783-2_35
- Feijó, J. (1994). *Instalaciones de iluminación en la arquitectura* (1° Edición). Valladolid: Secretariado de Publicaciones Universidad de Valladolid.
- Fernández-Galiano. (2003). Diálogo y logo. Jacques Herzog piensa en voz alta. *N° 91*, 25–31. Retrieved from <https://arquitecturaviva.com/articulos/dialogo-y-logo>
- Folguera, E., & Muros, A. (2013). *La iluminación artificial es arquitectura* (1° edición; Iniciativa Digital Politècnica, Ed.). Barcelona: Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC.
- Fotios, S., & Atli, D. (2012). Comparing Judgments of Visual Clarity and Spatial Brightness through an Analysis of Studies Using the Category Rating Procedure. *LEUKOS*, *8*(4), 261–281. <https://doi.org/10.1582/LEUKOS.2012.08.04.002>
- Gibson, J. J. (1974). La percepción del mundo visual. In C. Méndez & J. Rey (Eds.), *Biblioteca de Diseño y Artes Visuales* (Primera ed) [Book]. Retrieved from <https://es.scribd.com/doc/73546518/Gibson-James-J-Percepcion-Del-Mundo-Visual>
- Gilberto Leonardo, O. (2004). LA DEFINICIÓN DEL CONCEPTO DE PERCEPCIÓN EN PSICOLOGÍA CON BASE EN LA TEORÍA GESTALT. *Revista de Estudios Sociales*, (18), 89–96. <https://doi.org/10.7440/res18.2004.08>
- Guild, J. (1931). The colorimetric properties of the spectrum. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, *230*(681–693), 149–187. <https://doi.org/10.1098/rsta.1932.0005>
- Harrington, R. E. (1954). Effect of Color Temperature on Apparent Brightness. *Journal of the Optical Society of America*, *44*(2), 113–116.
- Hecht, S., & Hsia, Y. (1945). Dark Adaptation Following Light Adaptation to Red and White Lights*1. *Journal of the Optical Society of America*, *35*(4), 261.

<https://doi.org/10.1364/JOSA.35.000261>

- Helmholtz, H. (1866). *Handbuch der Physiologischen Optik*. Retrieved from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=4u7IRLnD11IC&oi=fnd&pg=PA1&dq=helmholtz+optik&ots=XReDZh13wq&sig=sIBtnliPlzBdeb5adnJRakK9aCA#v=onepage&q=helmholtz+optik&f=false>
- Hofmann, H., & Ganslandt, R. (1992). ERCO Handbook of Lighting Design. In ERCO Leuchten GmbH (Ed.), *Architecture* (1st ed.). Retrieved from <https://download.erco.com/en/media/handbook>
- Holonyak, N., & Bevacqua, S. F. (1962). COHERENT (VISIBLE) LIGHT EMISSION FROM Ga(As_{1-x}P_x) JUNCTIONS. *Applied Physics Letters*, 1(4), 82–83. <https://doi.org/10.1063/1.1753706>
- Hopkinson, R. G., & Kay, J. D. (1972). *The Lighting of buildings* (Second; Faber and Faber, Ed.) [Book]. London: Faber and Faber.
- Hopkinson, R. G., Stevens, W. R., & Waldram, J. M. (1941). Brightness and Contrast in Illuminating Engineering. *Lighting Research and Technology*, 6(1-10 IEStrans), 37–48. <https://doi.org/10.1177/147715354100600104>
- Isalgué, A. (1993). *Física de la Ilum i el so* (1° edición). Barcelona: Edicions UPC.
- Ives, H. E. (1912). XII. Studies in the photometry of lights of different colours. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 24(139), 149–188. <https://doi.org/10.1080/14786440708637317>
- Jacobs, A. (2004). *SynthLight Handbook* (London Metropolitan University, Ed.). Londres: Low Energy Architecture Research Unit, LEARN.
- Jay, P. (2002). Review: Subjective criteria for lighting design. *Lighting Research & Technology*, 34(2), 87–96. <https://doi.org/10.1191/1365782802li035rr>
- Kalff, L. C. (1971). *Creative light* [Book]. London: MacMillan.
- Kanaya, S., Hashimoto, K., & Kichize, E. (1979). Subjective Balance Between General Color Rendering Index, Color Temperature and Illuminance of interior Lighting. In B. central de la CIE (Ed.), *Proceedings of the CIE 19th Session* (p. 501). Kyoto.
- Kawasaki, A., & Kardon, R. (2007). Intrinsically photosensitive retinal ganglion cells. *Journal Neuro-Ophthalmol*, 27(3), 195–204. <https://doi.org/10.1007/s00347-021-01476-4>
- König, A., & Ritter, R. (1892). On the value of the brightness of spectral colours with different absolute intensity. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 33(205), 541–542. <https://doi.org/10.1080/14786449208620297>
- Kries, J. V. (1882). *Die Gesichts Empfindungen und ihre analyse*. Leipzig: Verlag von Veit & Comp.
- Kruthof, A. (1941). Tubular luminescence lamps for general illumination. *Philips Technical Review*, 6, 65–96.
- Lam, W. M. C. (1977). *Perception and Lighting as Formgivers for Architecture* (4° edición). New York: McGraw-Hill Book.
- Lam, W. M. C. (1986). *Sunlighting as formgiver for architecture* (Van Nostrand Reinhold, Ed.) [Book]. New York: Van Nostrand Reinhold.

- Lichttechnische Deutsche Gesellschaft (LiTG). (2000). *Good Lighting for Museums, Galleries and Exhibitions 18*. Retrieved from http://en.licht.de/fileadmin/Publications/licht-wissen/0703_lw18_E_light_museums_galleries_web.pdf
- Lima, M. (2010). *Percepção visual aplicada à arquitetura e à iluminação* (P. P. Marques, Ed.) [Book]. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna.
- López Besora, J. (2015). *La llum mediterrània i els espais d'accés a l'arquitectura*. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona.
- Mahnke, F. H. (1996). *Color, environment, and human response: an interdisciplinary understanding of color and its use as a beneficial element in the design of the architectural environment*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- Mandelbaum, J. (1941). DARK ADAPTATION. *Archives of Ophthalmology*, 26(2), 203. <https://doi.org/10.1001/archopht.1941.00870140053003>
- Marr, D. (1982). *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information* (1st Editio). San Francisco: W.H. Freeman.
- Martín, F. (2007). *Instalaciones de iluminación* (1º Edición; F. E. de la Edificación, Ed.). Madrid: Torán, S.A.
- Mayné, J. (2020). *Entrevista a museógrafo y diseñador lumínico de Museo de Badalona*. Barcelona: Eduardo Espinoza.
- Michel, L. (1995). *Light : the shape of space : designing with space and light* [Book]. New York: John Wiley.
- Microsoft. (2021). RSQ function of Excel for Office 365. Retrieved March 2, 2022, from Microsoft homepage website: <https://support.office.com/en-us/article/rsq-function-d7161715-250d-4a01-b80d-a8364f2be08f>
- Miles, W. R. (1953). Effectiveness of Red Light on Dark Adaptation. *Journal of the Optical Society of America*, 43(6), 435–441. <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/JOSA.43.000435>
- Miller, J. V. & Miller, R. E. (1994). Museum lighting - pure and simple. Retrieved from <http://www.nouvir.com/pdfs/MuseumLighting.pdf>
- MINCOTUR. (2008). Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 y EA-07. In Real Decreto 1890/2008 (Ed.), 279 (pp. 1–53). Madrid: MINCOTUR.
- Miri, M. (2015). Luminance-based HDR photos to help lighting designers in their everyday work. *5th Global Lighting Design Conference on Proceedings*, 198–204. Roma.
- Monedero, J. (2015). *Simulación visual de materiales : teoría, técnicas, análisis de casos* (1ra edición; I. D. Politècnica, Ed.). Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=npmdCwAAQBAJ>
- Moore, C. (1977). *La casa, la forma y el diseño*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Moreland, J. D., & Cruz, A. (1959). Colour Perception with the Peripheral Retina. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 6(2), 117–151. <https://doi.org/10.1080/713826278>

REFERENCIAS

- Morente, C., & Garcia, M. (2012). Curso on-line de Iluminación. Retrieved March 29, 2022, from Fuentes de luz y equipos auxiliares website: <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-fuentesDeLuz.php>
- Moretti, L. (2013). *Espacios-luz en la arquitectura religiosa*. (2° edición). Barcelona: Ricardo Sánchez Lampreave.
- Muñoz Heras, O. (2012). *Luces y sombras : museos contemporáneos españoles* [Book]. Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.
- Munsell, A. H. (1915). *Atlas of the Munsell color system*. Boston: Wadsworth, Howland & Co., Inc.
- Nassau, K. (2002). Las causas del color. *Temas 27: Investigación y Ciencia. Edición Española de SCIENTIFIC AMERICAN.*, 8–25.
- Newton, I. (1704). *Opticks* (1st editio). London: W. Innys.
- Norberg-Schulz, C., & Digerud, J. G. (1990). *Louis I. Khan: idea e imagen*. Madrid: Xarait D.L. SA.
- Oppezzo, M., & Schwartz, D. L. (2014). Give your ideas some legs: The positive effect of walking on creative thinking. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 40(4), 1142–1152. <https://doi.org/10.1037/a0036577>
- Philips. (2021). ¿Por qué se considera que los LED son más eficientes que las fuentes de luz convencionales? Retrieved December 27, 2021, from Preguntas frecuentes website: <https://www.lighting.philips.es/soporte/soporte-de-productos/preguntas-frecuentes/life-and-light-output/leds-more-efficient-than-conventional-light-sources>
- Purkinje, J. E. (1825). *Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne*. (P. In commission der J. G. Calve'schen Buchhandlung [Johann Gottfried Calve], Ed.). Berlin: G. Reimer.
- Quevedo, L., Aznar-Casanova, J. A., Merindano, D., & Solé, J. (2010). Una tarea para evaluar la agudeza visual dinámica y una valoración de la estabilidad de sus mediciones. *Psicologica*, 31(1), 109–128.
- Rasmussen, S. E. (2012). *La Experiencia de la arquitectura: sobre la percepción de nuestro entorno*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Rea, M. S. (2000). *The IESNA LIGHTING HANDBOOK, Reference and Application* (9th ed.; J. Block, Ed.). New York: Illuminating Engineering Society of North America.
- Rockcastle, S., & Andersen, M. (2014). Measuring the dynamics of contrast & daylight variability in architecture: A proof-of-concept methodology. *Building and Environment*, 81, 320–333. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2014.06.012>
- Rodríguez, M. A. (2021). *Iluminación de exposiciones: De la práctica a la teoría*. (1° edición). Galicia: IRED.
- Rombauts, P. (2001). Visual comfort in underground working environments. *9th LUX-Europa Lighting Conference*, 388–393. Reikjavick-IJsland.
- Roque, G. (2002). Color y luz. *Temas 27: Investigación y Ciencia. Edición Española de SCIENTIFIC AMERICAN.*, 4–7.
- Ruggiero, F., Serra, R., & Dimundo, A. (2009). Re-interpretation of traditional architecture for

- visual comfort. *Building and Environment*, 44(9), 1886–1891.
<https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2009.01.006>
- Samuel, F. (2007). *Le Corbusier in Detail*. <https://doi.org/10.4324/9780080550626>
- Sánchez Vértiz Ruiz, R. L. (2005). *Percepción ambiental en la arquitectura religiosa del centro de México : els siglo XVI : enfrentamiento entre dos modos de representar “lo divino” a través de la percepción arquitectónica* (Dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona). Retrieved from https://discovery.upc.edu/permalink/34CSUC_UPC/rdgucl/alma991003093909706711
- Schielke, T. (2020). Interpreting Art with Light: Museum Lighting between Objectivity and Hyperrealism. *LEUKOS*, 16(1), 7–24. <https://doi.org/10.1080/15502724.2018.1530123>
- Serra, R. (1999). *Arquitectura y climas* (1° Edición). Barcelona: Editorial Gustavo Gili.
- Serra, R., & Coch, H. (1995). *Arquitectura y energía natural* (1° edición; E. UPC, Ed.). Retrieved from <http://hdl.handle.net/2099.3/36276>
- Sharif-Askari, H., & Abu-Hijleh, B. (2018). Review of museums' indoor environment conditions studies and guidelines and their impact on the museums' artifacts and energy consumption. *Building and Environment*, 143, 186–195. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.07.012>
- Smith, F. K., & Bertolone, F. (1986). *Bringing Interiors to Light: The Principles and Practices of Lighting Design*. New York: Watson-Guptill Publications, Incorporated.
- Smith, S. W., & Rea, M. S. (1979). Relationships between Office Task Performance and Rating of Feelings and task evaluations under different Light Sources and Levels. In B. central de la CIE (Ed.), *Proceedings of the CIE 19th Session* (p. 501). Kyoto.
- Stasiuk, A. (2003). *El mundo detrás de Dukla* (1° edición). Barcelona: Editorial El Acantilado.
- Svaetichin, G., & MacNichol, E. F. (1958). RETINAL MECHANISMS FOR CHROMATIC AND ACHROMATIC VISION. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 74(2), 385–404. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1958.tb39560.x>
- Sylvania, F. (2015). *Lighting for Museums and Galleries*.
- Tanizaki, J. (1994). *El elogio de la sombra* (1° edición). Madrid: Ediciones Siruela.
- Tregenza, P., & Wilson, M. (2011). *Daylighting: Architecture and lighting design* (Taylor & Francis Group, Ed.). New York: Routledge.
- Ulas, E., & Bretherton, A. (2015). *A Case Study on Lighting for Museums and Galleries*. Sydney: Museums & Galleries Queensland.
- Viénot, F., Durand, M.-L., & Mahler, E. (2009). Kruithof's rule revisited using LED illumination. *Journal of Modern Optics*, 56(13), 1433–1446. <https://doi.org/10.1080/09500340903151278>
- Von Goethe, J. W. (1810). *Theory of colours* (W. C. and Sons, Ed.). London: Jhon Murray.
- Walk21. (2006). Carta Internacional del Caminar. Retrieved November 23, 2021, from <https://ciudadesquecaminan.org/wp-content/uploads/2019/09/CartaInternacionalDelCaminar-1.pdf>

REFERENCIAS

- Weigel, R. G. (1973). *Luminotécnia sus principios y aplicaciones* (G. Gili, Ed.). Barcelona.
- Wolfe, U., & Ali, N. (2015). Dark adaptation and Purkinje shift: A laboratory exercise in perceptual neuroscience. *Journal of Undergraduate Neuroscience Education*, 13(2), A59–A63.
- Wright, W. D. (1928). A trichromatic colorimeter with spectral primaries. *Transactions of the Optical Society*, 29(5), 225–242. <https://doi.org/10.1088/1475-4878/29/5/302>
- Wyszecki, G., & Stiles, W. S. (1982). Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae. In Jhon Wiley & Sons Inc. (Ed.), *Color Science* (2nd ed.). New York: Wiley Interscience.
- YATIR, S. Y. (2020). *GLASS MUSEUMS: EXHIBITION DESIGN AND SPACES FOR CONTEMPORARY GLASS ART IN THE 'GLASS AGE'* (THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF ÇANKAYA UNIVERSITY). Retrieved from <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>
- Yeo, T. (2019). Fusion Optix Launches App for iOS and Android Devices. Retrieved March 2, 2022, from <https://www.fusionoptix.com/2019/03/fusion-optix-launches-smartphone-app/>
- Yoon, G. H., & Kim, J. T. (2014). The Effects of Illuminance and Correlated Color Temperature on Visual Comfort of Occupants' Behavior. *KIEAE Journal*, 14(1), 23–30. <https://doi.org/10.12813/kieae.2014.14.1.023>
- Young, T. (1802). II. The Bakerian Lecture. On the theory of light and colours. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 92, 12–48. <https://doi.org/10.1098/rstl.1802.0004>
- Zabalbeascoa, A. (2011, January). Luz dónde, cómo y cuándo. *El País*. Retrieved from https://elpais.com/elpais/2011/01/17/del_tirador_a_la_ciudad/1295246220_129524.html
- Zumthor, P. (2009). La luz en el paisaje. In *Pensar la arquitectura* (2ª ed. amp, p. 75). Barcelona: Gustavo Gili.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites de iluminancia y tiempo de exposición por sensibilidad de objetos. CIE 157:2004. _____	43
Tabla 2. Relación de luminancias con tarea visual según norma IRAM- AADL J-20-06. Bazán. 2018. Anales AFA. _____	45
Tabla 3. Valores UGR. Folguera & Muros. 2013. Oficina de Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC. _	45
Tabla 4. Tabla de IRC y temperatura de color de diversos tipos de lámparas. Martín. 2007. *IRC y TC LED. Rodríguez. 2021. _____	48
Tabla 5. Tabla de niveles de iluminación (recomendados por la CE), para diversas actividades. Martín. 2007. _____	53
Tabla 6. Limitaciones de la luz molesta procedente de instalaciones de alumbrado exterior. Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior. Instrucción técnica EA-03. BOE-A-2008-18634. MINCOTUR, 2008. _____	55
Tabla 7. Tabla comparativa del análisis de los tres softwares de luminancias. _____	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>L'empire des lumières</i> . René Magritte. 1953. Guggenheim New York.	4
Figura 2. <i>Yad Vashem - Centro Mundial de Conmemoración de la Shoá</i> . Moshe Safdie. 2005. https://www.yadvashem.org/es/museum.html	14
Figura 3. <i>Tipos de onda</i> . Hofmann & Ganslandt. 1992. https://download.erco.com/en/media/handbook	15
Figura 4. <i>Espectro de radiación solar</i> . Aemet 2018. https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/531_radiacion-solar	15
Figura 5. <i>Ley de la inversa de los cuadrados y Ley de iluminancia horizontal y vertical</i> . Feijó, J. 1994. Ed. U. de Valladolid.	17
Figura 6. <i>Eficacia luminosa</i> . Morente & García. 2012. U. Politécnica de Catalunya. https://grlum.dpe.upc.edu/manual/sistemasIluminacion-fuentesDeLuz.php	18
Figura 7. <i>Eficacia luminosa por tipo de lámpara</i> . Hofmann & Ganslandt. 1992. ERCO. https://download.erco.com/en/media/handbook	18
Figura 8. <i>Curva fotométrica</i> . IGUZZINI. 2021. https://www.iguzzini.com/es/p646/	19
Figura 9. <i>Radiación en el espectro continuo</i> . Blasco, P. 2016. U. Politécnica de Valencia.	20
Figura 10. <i>Radiación en el espectro discreto</i> . Blasco, P. 2016. U. Politécnica de Valencia	20
Figura 11. <i>Distribución espectral de iluminantes estándar</i> . ISO/CIE DIS 11664-2:2020(E).	21
Figura 12. <i>Biblioteca de libros raros y manuscritos de YALE</i> . Gordon Bunshaft. 1963. https://hmong.es/wiki/Beinecke_Library	22
Figura 13. <i>Tipos de reflexión: regular (A), difusa (B) y mixta (C)</i> . Monedero, J. 2015. UPC	23
Figura 14. <i>Tipos de transmisión: Regular (A), difusa (B) y mixta (C)</i> . Monedero, J. 2015. UPC	23
Figura 15. <i>Ondulaciones regulares que se perciben como una superficie tridimensional</i> . Marr. 1982. W.H. Freeman	24
Figura 16. <i>Capilla de las Capuchinas</i> . Luis Barragán, 1953. https://www.tlalpan.cdmx.gob.mx/capilla-de-las-capuchinas/	25
Figura 17. <i>Primer espectro de Newton: El factor de pureza p a diversas longitudes de onda dominante</i> . Bouma. 1949.	26
Figura 18. <i>Colores marginales del 1 al 10 en curva VB</i> . Bouma. 1949. NV Philips' Gloeilampenfabrieken.	26
Figura 19. <i>Superficies blancas y negras a través de un prisma de vidrio. Arriba se identifican los colores cálidos y fríos. Abajo el cian, magenta y amarillo, junto al rojo, verde y azul</i> . Pehr Sällström. 2017. www.astrofriend.eu	26
Figura 20. <i>Mezcla aditiva (izquierda) y mezcla sustractiva (derecha)</i> . Lima, A. 2010. Editora Ciência Moderna.	28
Figura 21. <i>Esfera de color</i> . Munsell. 1915. Wadsworth, Howland & Co., Inc	28
Figura 22. <i>Sección de la esfera con 20 tonos</i> . Munsell. 1915. Wadsworth, Howland & Co., Inc	28
Figura 23. <i>El primer diagrama de colores cálidos y fríos</i> . Hayter, C. 1813. http://www.handprint.com/HP/WCL/color12.html#colorlight	29
Figura 24. <i>Colores cálidos y fríos en el círculo cromáticos</i> . Bruce MacEvoy. 2021 http://www.handprint.com/HP/WCL/color12.html#colorlight	29
Figura 25. <i>El espacio cromático de la forma más simple (p.76)</i> . Bouma. 1949. NV Philips' Gloeilampenfabrieken.	30
Figura 26. <i>El espacio cromático tridimensional (p.93)</i> . Bouma. 1949. NV Philips' Gloeilampenfabrieken.	30
Figura 27. <i>Triángulos cromáticos deducidos del sistema XYZ: equilátero y rectángulos (p.95)</i> . Bouma. 1949. NV Philips' Gloeilampenfabrieken.	30
Figura 28. <i>Diagrama cromático CIE con curva de colores equivalentes a diferentes temperaturas de color de luz</i> . HiSoUR. 2021. https://www.hisour.com/es/cie-1931-color-space-24840/	31
Figura 29. <i>Songeuse devant la cheminée</i> . Marcel Rieder. 1932. https://en.wikipedia.org/wiki/Marcel_Rieder	32

Figura 30. <i>Seeing without seeing: Light in layers</i> Vol. 469 (p.285). Corie Lok. 2011. <i>Nature</i> .	33
Figura 31. Número de bastones y conos en la retina en relación al ángulo de visión. Hofmann & Ganslandt. 1992. ERCO. https://download.erco.com/en/media/handbook	34
Figura 32. Respuesta a la luz por tipo de receptor. Brandt, U. 2006. Birkhäuser.	35
Figura 33. Rangos de luminancias. Hofmann & Ganslandt. 1992. ERCO. https://download.erco.com/en/media/handbook	35
Figura 34. Curva de eficacia luminosa espectral de la visión escotópica y fotópica. Beaulieu, Olmo y Nave. 2010. <i>Hyperphysics</i> . http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/vision/bright.html	35
Figura 35. Los campos visuales de cada ojo. Gibson, J. 1974. Ediciones Infinito.	36
Figura 36. <i>Visual field in the visual world</i> . Michel, L. 1995. John Wiley.	36
Figura 37. Funciones del cristalino. Rahal. 2022 https://www.rahhal.com/cristalino-anatomia-funciones-afecciones/	37
Figura 38. Tiempo de adaptación a la luz. Boix. 2022. https://recursos.citcea.upc.edu/llum/luz_vision/p_visual.html	37
Figura 39. <i>Standard dark adaptation curve</i> . Wolfe & Ali. 2015. http://www.funjournal.org/wp-content/uploads/2015/09/june-13-59.pdf	37
Figura 40. Ley de proximidad, semejanza y dirección. Hothersall. 1997. https://viviendolasalud.com/psicologia/psicologia-gestalt-leyes	38
Figura 41. Perro. Hothersall. 1997. Mc Grau Hill. https://viviendolasalud.com/psicologia/psicologia-gestalt-leyes	39
Figura 42. Suegra/Esposa. Matlin & Foley. 1996. https://viviendolasalud.com/psicologia/psicologia-gestalt-leyes	39
Figura 43. <i>Comfort zone delimited by The Kruithof Curve</i> . Kruithof. 1941. <i>Philips Technical Review</i> .	40
Figura 44. Relación entre luminancia de adaptación y contraste. UDELAR. 2012. http://www.fadu.edu.uy/acondicionamiento-luminico/files/2012/02/TEO-12_S1-C02B_VISION_PERCEPCION.pdf	41
Figura 45. Mezquita - Catedral de Córdoba. Cabildo Catedral de Córdoba. 2022. https://mezquita-catedraldecordoba.es/descubre-el-monumento/el-edificio/mezquita-fundacional-de-abderraman-i/	42
Figura 46. <i>Luminance by contrast</i> . Lam. 1977. McGraw-Hill Book	44
Figura 47. <i>Background ambiguity</i> . Lam. 1977. McGraw-Hill Book	44
Figura 48. <i>Brightness, shadows and gradient</i> . IESNYC. 2022. http://www.rsltg.com	44
Figura 49. <i>Opponent Process Theory (Canales de decodificación de las señales nerviosas)</i> . <i>Visualexpert</i> . 2004 https://www.ukessays.com/essays/sciences/theories-colour-vision-5946.php	46
Figura 50. <i>Contraste simultáneo de colores (El gris cambia de tonalidad según el fondo en el que se encuentra)</i>	46
Figura 51. <i>Composition of colours, brightness and lines in eye task. (El par de la izquierda muestra el color blanco con diferente luminosidad dependiendo del entorno. El par de la derecha destaca la cruz por contraste de color)</i> . Kalff. 1971.	46
Figura 52. Arriba: Distribución espectral de un radiador térmico a diferentes temperaturas. Abajo: Curva de Planck en diagrama CIE, dividida en tres grupos: blanco cálido (ww), blanco neutro (nw) y blanco de luz diurna (dw). Hofmann & Ganslandt. 1992. ERCO.	47
Figura 53. Temperatura de color en grados Kelvin de diferentes fuentes luminosas. Beldeus. 2015. http://www.beldeus.com/blog/temperatura-de-color-de-la-luz-que-son-los-grados-kelvin/	47
Figura 54. Arriba: <i>Time in dark adaptation</i> . Abajo: <i>Cones & rods sensibility</i> . Hecht. 1945	49
Figura 55. Tiempo de adaptación a la oscuridad en función del estímulo a diferente longitud de onda. Bartlett. 1965.	49
Figura 56. Panteón de Roma. https://arteenparte.es/wp-content/uploads/2021/01/Arquitectura-romana_compressed.pdf	50

Figura 57. Calculation of the positioning of a luminaire for pictures on a wall. Lichttechnische Deutsche Gesellschaft (LiTG). 2000. _____	50
Figura 58. Tiempo de adaptación a la oscuridad en función del estímulo a diferente longitud de onda. LiTG. 2000. _____	51
Figura 59. Proyecto (izquierda) y ejecución (centro y derecha) del Museo Thyssen-Bornemisza. Rodríguez. 2014. _____	51
Figura 60. La luz como elemento capital: La capilla del Monasterio Benedictino de la Santísima Trinidad de Las Condes, diseñado y construido por los arquitectos Martín Correa Prieto y Gabriel Guarda en 1964. Pérez-Barros. 2016. Revista Digital ED. https://www.ed.cl/estilo-de-vida/articulos/la-luz-como-elemento-principal/ _____	52
Figura 61. Una biblioteca bajo el agua. Martí M. and Sarrà J. 1999. El País semanal, 1191 p: 49-54. Online: https://repositori.upf.edu/bitstream/handle/10230/20539/marti_biblioteca.pdf?sequence=1&isAllowed=y58	58
Figura 62. Museo de Badalona. Joan Mayné - ILM BCN. 2010. https://web.ilmbcn.com/exposicions-permanents _____	64
Figura 63. Museu de Badalona. Camil Pallàs i Arisa. 2010. Online: https://ajuntament.badalona.cat/noticies/el-museu-de-badalona-ajorna-la-16a-edicio-del-festival-roma-magna-celebratio/ _____	65
Figura 64. Planta sótano del Museo de Badalona _____	66
Figura 65. Recorridos en la planta del sótano _____	67
Figura 66. HDR en punto de medición A-7 _____	72
Figura 67. Imagen Falso color en punto de medición A-7 _____	72
Figura 68. HDR en punto de medición C-1 _____	73
Figura 69. Imagen Falso color en punto de medición C-1 _____	73
Figura 70. HDR en punto de medición C-21 _____	74
Figura 71. Imagen Falso color en punto de medición C-21 _____	74
Figura 72. HDR en punto de medición C-33 _____	75
Figura 73. Imagen Falso color en punto de medición C-33 _____	75
Figura 74. Aire Ancient Bath. Pegenaute, P. 2008. https://beaire.com/es/aire-ancient-baths-barcelona . _	76
Figura 75 Izquierda: el portón de ingreso. Derecha: la recepción. Pegenaute, P. 2008. https://www.pedropegenaute.es/ _____	77
Figura 76. Planta sótano. Alonso y Balaguer. 2008. https://abaa-arq.com/proyectos/aire-ancient-baths __	78
Figura 77. Planta baja Alonso y Balaguer. 2008. https://abaa-arq.com/proyectos/aire-ancient-baths _____	78
Figura 78. Planta entresuelo. Alonso y Balaguer. 2008. https://abaa-arq.com/proyectos/aire-ancient-baths _____	78
Figura 79. Interior de los baños termales. Pegenaute, P. 2008. https://www.pedropegenaute.es/ _____	79
Figura 80. Planta sótano con puntos de medición. _____	80
Figura 81. HDR en punto de medición 1 _____	85
Figura 82. Imagen Falso color en punto de medición 1 _____	85
Figura 83. HDR en punto de medición 2 _____	86
Figura 84. Imagen Falso color en punto de medición 2 _____	86
Figura 85. HDR en punto de medición 3 _____	87
Figura 86. Imagen Falso color en punto de medición 3 _____	87
Figura 87. HDR en punto de medición 4 _____	88
Figura 88. Imagen Falso color en punto de medición 4 _____	88
Figura 89. Exterior de Capilla Convento de los Ángeles. 2015. https://www.monestirs.cat/monst/bcn/bn02ange.htm _____	89
Figura 90. Planta de la Capilla. Archivos del Macba. 2021. _____	90
Figura 91. Interior de Capilla durante exposición: En tiempo real, la colección Rafael Tous de arte conceptual. _____	91

Figura 92. Puntos de medición en la capilla	92
Figura 93. HDR en punto de medición 1	97
Figura 94. Imagen Falso color en punto de medición 1	97
Figura 95. HDR en punto de medición 3.	98
Figura 96. Imagen Falso color en punto de medición 3.	98
Figura 97. HDR en punto de medición 4.	99
Figura 98. Imagen Falso color en punto de medición 4.	99
Figura 99. HDR en punto de medición 6.	100
Figura 100. Imagen Falso color en punto de medición 6.	100
Figura 101. Interior del restaurante - bar Feroz	101
Figura 102. Planta baja del restaurante-bar Feroz.	102
Figura 103. Izquierda: el ingreso al restaurante. Derecha: el salón grande de comedor.	103
Figura 104. Barra de bar. Pablo Peyra Studio. 2018. https://pablopeyrastudio.com/	103
Figura 105. Puntos de medición en restaurante Feroz	104
Figura 106. HDR en punto de medición 3.	109
Figura 107. Imagen Falso color en punto de medición 3.	109
Figura 108. HDR en punto de medición 5.	110
Figura 109. Imagen Falso color en punto de medición 5.	110
Figura 110. HDR en punto de medición 8.	111
Figura 111. Imagen Falso color en punto de medición 8.	111
Figura 112. HDR en punto de medición 10.	112
Figura 113. Imagen Falso color en punto de medición 10	112
Figura 114. Interior de sala de exposiciones. EUROPAPRESS. 2021. https://www.europapress.es/catalunya/noticia-cccb-explora-dialogo-especies-exposicion-ciencia-friccio-20210611150418.html	113
Figura 115. Planta de la Sala de exhibición del CCCB.	114
Figura 116. Interior de sala de exposición.	115
Figura 117. Puntos de medición en sala de exposición	116
Figura 118. HDR en punto de medición 1	121
Figura 119. Imagen Falso color en punto de medición 1.	121
Figura 120. HDR en punto de medición 3.	122
Figura 121. Imagen Falso color en punto de medición 3.	122
Figura 122. HDR en punto de medición 7	123
Figura 123. Imagen Falso color en punto de medición 7.	123
Figura 124. HDR en punto de medición 10.	124
Figura 125. Imagen Falso color en punto de medición 10.	124
Figura 126. El sol vuelve a acariciar el rostro de Ramsés II en el templo de Abu Simbel. La Vanguardia. 2019. https://www.lavanguardia.com/ocio/viajes/20190222/46598331643/abu-simbel-egipto-sol-22-de-febrero-ilumina-ramses-ii.html	126
Figura 127. Vista interior. Jeff Hu. La vanguardia. 2019.	126
Figura 128. Gráfica comparativa de luminancias en cuatro escenas de cinco casos de estudio.	133
Figura 129. Gráfica comparativa entre conjuntos de superficies, con distinta tarea visual, en los cinco casos de estudio.	134
Figura 130. Alpha Tunnel looking toward the East Portal at Roden Crater by James Turrell, an art installation in the northern Arizona desert. Klaus Obermeyer. 2019. https://archithese.ch/index.php/ansicht/sesam-oeffne-dich.html?page_g45032=4	136

Characterization of library lighting design:

A study of dynamic and static space

EDUARDO ESPINOZA CATERIANO¹ HELENA COCH ROURA¹ ISABEL CRESPO CABILLO¹

¹ Architecture, Energy & Environment. School of Architecture of Barcelona. UPC., Barcelona, Spain.

ABSTRACT: The use of space is a fundamental variable in the creative process, so it is included in the lighting design. This paper presents a key to characterize the lighting space, to be used in the initial stages of architectural design. It aims to highlight the role of quantitative and qualitative lighting values of space. To carry on this study, two very different libraries have been analysed in Barcelona. The first case study corresponds to a university library whose function is reading and mainly individual study. The second case study, the community library, has a more participatory character with society, i.e. it includes reading spaces, meeting spaces, learning spaces for children and a conference hall. This research compares two library lighting design in terms of spatial configuration. Analysing false colour images reveals that there are different lighting intentions. The first case study shows that the difference between the luminance of the work area and the general environment is ten times greater. The second case study shows that the luminance in the work area is ten times less than the background. Therefore, it is suggested that the lighting design of those two libraries corresponds to the static and dynamic use of space.

KEYWORDS: Lighting design, library lighting, luminance value, false-colour image.

1. INTRODUCTION

Today, libraries have transformed the use of studying space [1,2,3,4,5]. In the past, the architectural typology was configured to keep the knowledge acquired by civilizations. Subsequently, the function of the library included elite education, among which were religious groups. Monasteries, in particular, were characterized by introspection and self-learning. Throughout history, studies have been developed to analyse the impact of lighting in reading activities. Among them, the research of Arnau, Muñoz, and Gibson stand out due to the depth of their conclusions and the relevance to the subject of this study.

According to Arnau [6], colour and light play a primary role in the creation of space for worship. The binomial, subject-object, sustains its relationship in the inhabited space. Muñoz [7] shares Arnau's point of view, the sacredness of religious spaces is associated with libraries through light and silence. The user of libraries has multiple lighting needs. Lighting to focus on the main activity and environmental lighting to visualize the space limits [8]. Directional lighting tends to exclude distractions from reading. Meanwhile, diffuse lighting leans towards including another type of activities such as spatial orientation, social interaction and more. Artificial directional lighting enables concentration in user activity so long as there is light directed to work plane and there is less light reflected

in other surfaces. Natural diffuse lighting allows different activities at the same time in the libraries.

Thus, the primary activity in the old libraries was concentrated solely on reading; while, at present, the flexibility in the use of this type of space allows greater participation of society with culture. Finally, regarding visual perception, Gibson [9] clarifies the difference between the visual field (static use of space) and the visual world (dynamic use of space). Despite the differences in approach, the authors reach similar conclusions regarding the undeniable role of lighting in the construction of spaces dedicated to learning activities. Libraries spaces are therefore fundamentally concerned with the creation of an environment between the subject, the activity, and the light.

2. METHODOLOGY

The libraries chosen are typologically different, both stand out for their light qualities in terms of visual comfort [10]. It seeks to examine the relationship between the activities of the subject and the type of lighting of the objects. For this study, it has been chosen to analyse the libraries with digital pictures in High Dynamic Range (HDR). Each image corresponds to different scenes subjected to software that reveals luminance (L) value. To generate HDR images and false colour images, the website <https://www.jaloxa.eu> has been used in 2015, which is currently not in service. The

quantitative information of the scenes allows us to evaluate the luminance contrast in the visual field [11].

3. CASE STUDIES

The first case, owned by the Pompeu Fabra University since 1992, is the Dipòsit d'Aigües library. It is located opposite the Ciutadella park, in the Sant Martí district of Barcelona. Constructed in 1874 by Josep Fontserè as a water tank to feed the waterfall fountain inside the park, the old water tank was later refurbished as a library by Lluís Clotet and Ignacio Paricio [12]. The library is formed by eleven parallel arches of 14 meters high, which intersect by another eleven arches rows and extend along 65 meters. This generates that inside we find passages modified by a forest of high red brick columns on a grey carpeted floor, natural wood furniture and white metal luminaires.

Naturally lit from an overhead opening in the centre of the building and vertical windows in the perimeter. All photographs were taken on the same day, on June 16th, but at different hours. Three pictures were selected, as mentioned before, because is relevant to focus on reading activity and search book activity. At 14:00h the sky was partially clear. The library was illuminated by diffuse natural light through windows. Due to the distance of high-level windows from work plane, the artificial light plays a central role in the scenes studied. The lamp model used was fluorescents Philips Master TL5 HE 21W/830 SLV/40 on the furniture.

Because users are related to university studies, the lighting intention focuses on the reading activity. The floor plan (Fig. 1) shows three analysis scenes: collective reading, individual reading and corridors (Fig. 2-3-4).

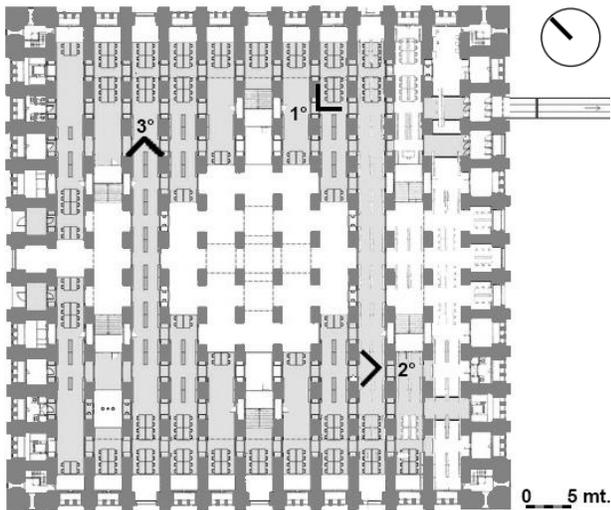


Figure 1: First floor plan Pompeu Fabra Library.



Figure 2: First HDR photo of group reading place.

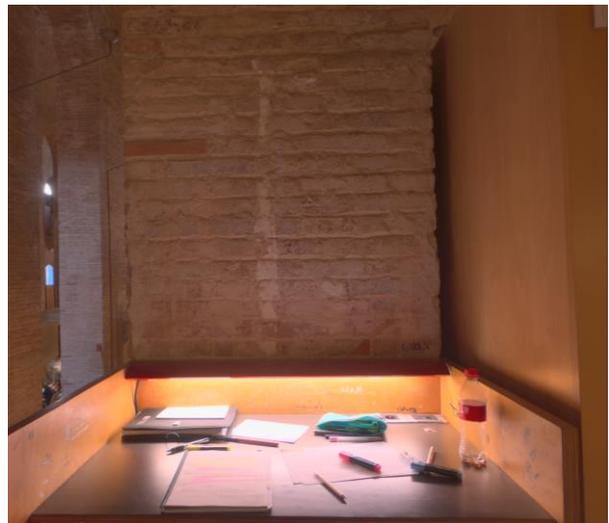


Figure 3: Second HDR photo of individual reading place.



Figure 4: Third HDR photo of corridors facing window.

The second case is the Agustí Centelles library, which opened in 2010. It is located in the Eixample district of Barcelona. The architects Rahola and Vidal had to group different uses and users in one building: a civic centre, an auditorium, a nursery school and a library [13].

The library starts from the third floor and occupies 4 levels, the double heights allow good views to the outside and diffuse light into the interiors (Fig. 5-6). The vertical surfaces are mostly white and are made up of the columns, the perimeter walls, the metal profiles that support the glazed facade and the shelves that delimit the reading areas of the circulation area. The horizontal surfaces are basically white for the ceiling of acoustic tiles and gray for the floor. As for the tables they are white except those of black color that are in front of the north-east glazed façade.

The interiors are illuminated by natural light through the north-east and south-west facing facade. These photographs were completed at 11:00h, on June 22nd, when the sky was partially clear. The artificial light comes from fluorescents Philips Master TL-D 58W/840 on the ceiling and Philips Tornado T2 8W WW E14 220-240V 1PF/6 on the table lamp.

The lighting design seeks to place the major activities next to the facades to allow the greatest entry of light from the outside. The choice of each HDR photo follows the same criteria as before: a place of shared reading, individual reading, and corridors (Fig. 7-8-9).

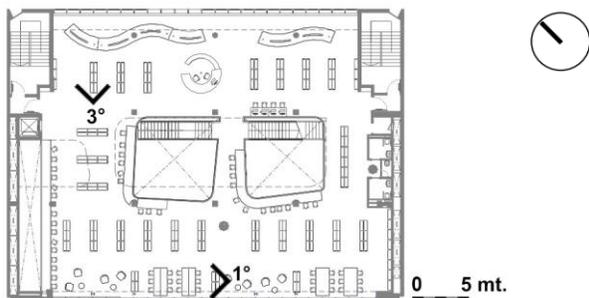


Figure 5: Fifth floor plan Agustí Centelles Library.

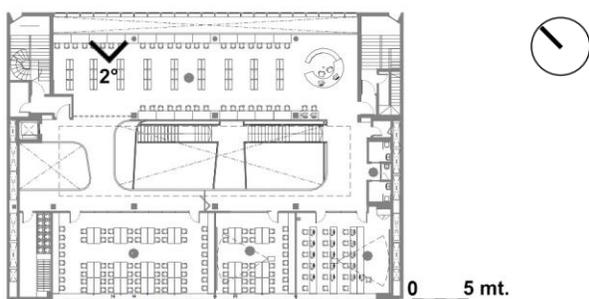


Figure 6: Sixth floor plan Agustí Centelles Library.



Figure 7: First HDR photo of group reading place.



Figure 8: Second HDR photo of individual reading place.



Figure 9: Third HDR photo of individual reading place.

4. RESULTS

The results in the university library (Figure 10-11), show that the luminance levels at the work plane are greater than the luminance levels in the environment. Also, in Figure 12, the luminance level on the bookshelves is higher than luminance level in other surfaces. The luminance values on the desk of group and individual reading place are between 10 cd/m² to 317 cd/m², but primarily near 100 cd/m², while the luminance values in the surrounding surfaces are mainly 10 cd/m². The luminance ratio of the environment and the work plane in this university library is near 1:10.

The false-colour photos in the community library (Figure 13-14), reveal that the luminance levels in the work plane of reading zone are lower than the luminance levels that surroundings. Figure 15 shows that luminance level in the interior is lower than the exterior, except from the artificial light source. The luminance values on the work plane are between 10 cd/m² and 317 cd/m², but mostly 100 cd/m². The luminance levels of surfaces from the exterior is between 317 cd/m² and 1000 cd/m², but primarily 1000 cd/m² when is facing window. The luminance ratio of the environment and the work plane in this community library is near 10:1.

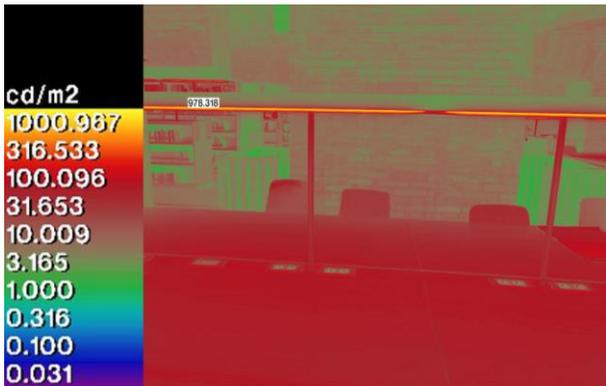


Figure 10: False colour photo of group reading place.

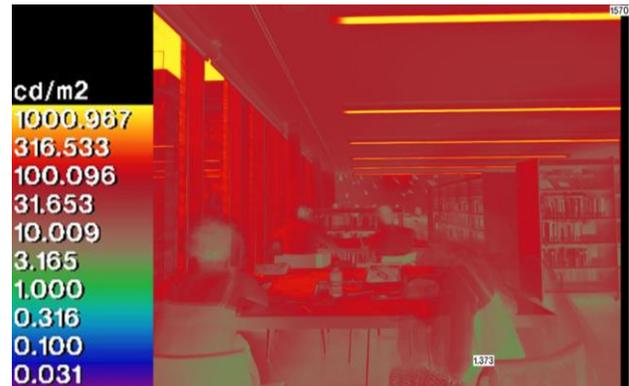


Figure 13: False colour photo of group reading place.

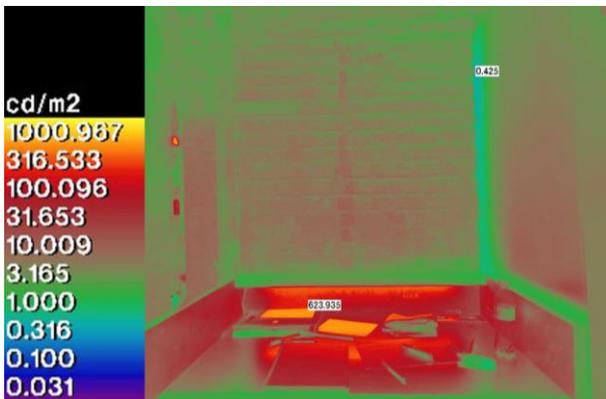


Figure 11: False colour photo of individual reading place.

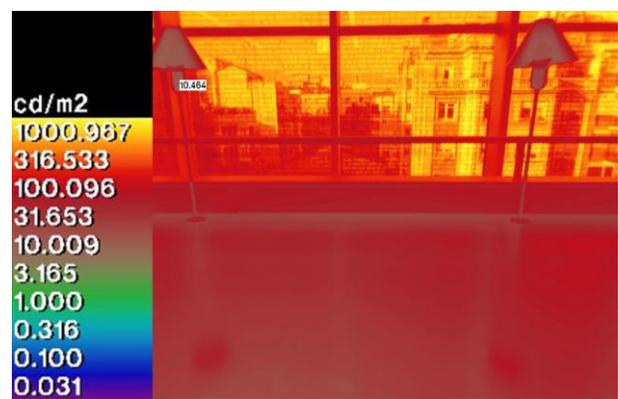


Figure 14: False colour photo of individual reading place.

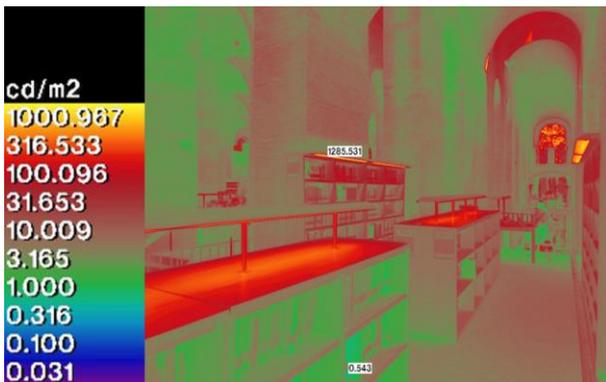


Figure 12: False colour photo of corridors facing window.

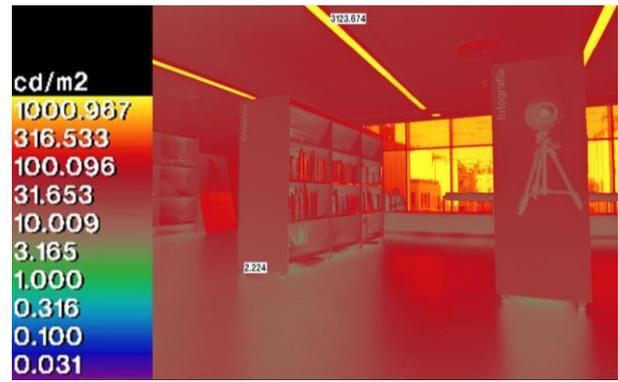


Figure 15: False colour photo of corridors facing window.

5. DISCUSSION

The analysis of false colour images mainly reveals that current library lighting regulations focus on the level of illumination on the work plane [14-15-16]. In both libraries, it was found that the work plane is sufficiently illuminated to carry out the reading activity, according to the UNE-EN 12464-1 standard [17]. The luminance value on the work plane is approximately 100 cd/m², which corresponds to an illuminance of approximately 500 lux depending on the reflection coefficient of the materials. Although it was not found a recommendation of specific luminance ratio for libraries, this work has adopted the proposed by the IRAM- AADL STANDARD J-20-06 [18], applicable to work areas or visual task, which are summarized in table 1.

Table 1: Maximum ratio between the Background Luminance (BL) and the Visual task (Vt).

Visual Field	Ratio BL:Vt
Central vision (30° cone opening)	3:1
Peripheral vision (90° cone opening)	10:1
Maximum L point of the visual field	40:1

It should be noted that all cases studied are under the ranges proposed in the table above. Considering any point of the work plane (100 cd/m²) and the maximum luminance point of the visual field, both cases studies are under the ratio of 40:1. In the first case, the university library, the maximum luminance point is 1285 cd/m², so the ratio is 13:1. In the second case, the community library, the maximum luminance point is 3123 cd/m², so the ratio is 31:1. The results obtained in this analysis show that these values are taken into account so as not to exceed the recommendations in the regulations.

However, we observed a great difference in the luminance contrast between the environment that surrounds the user of both libraries and the work plane. In the first case study, the ratio is shown to be 1:10, where the average luminance of the space limits is 10 cd/m² and the luminance on the reading activity is 100 cd/m². In the second case study, the ratio of the luminance contrast is reversed, with the ratio of 10:1, where the average luminance of the surfaces outside the building is 1000 cd/m² and the luminance of the work plane remains as 100 cd/m². The inversely proportional change between both libraries is the most noticeable light factor that the user experiences through the two buildings. The change of ratio corresponds to the change of the use of the space in each library. The first one is exclusively to reading activity while the second one has spaces for another activities besides reading books, such as children’s area

to play and learn, meeting spaces to read newspapers, living rooms to play music with earphones and a conference hall. The luminance contrast in the university library is strongly ruled by the use of artificial source light, while the influence of natural light through windows in the community library is undeniable.

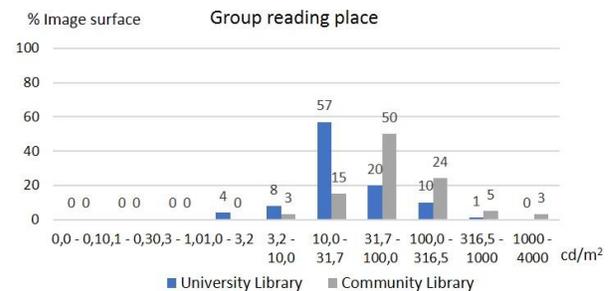


Figure 16: Luminance distribution of group reading

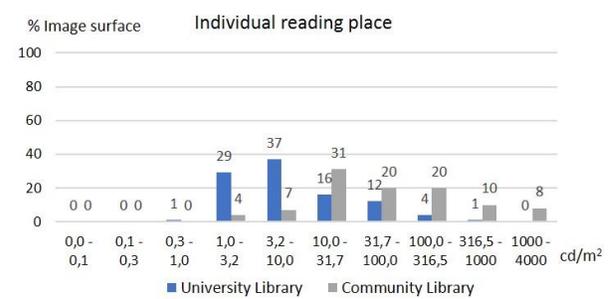


Figure 17: Luminance distribution of individual reading

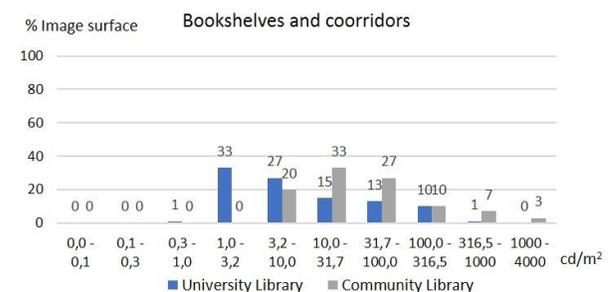


Figure 18: Luminance distribution of corridors and bookshelves

We can see (Fig 16-17-18) that the light distribution is more uniform in the community library than the university library. Also, the graphics show the percentage of light distribution is higher in the group reading place than the individual reading place. The luminance predominant in group reading place in the university library has 57% of luminance between 10 cd/m² and 32 cd/m², while the luminance predominant in individual reading place in the community library has 50% of luminance between 32 cd/m² and 100 cd/m². The comparison of each scene study between both libraries serves to conclude that the light distribution tends to be more uniform in a group reading place than an individual reading place.

6. CONCLUSION

The evaluation of the lighting design of these two libraries allows us to quantify the luminance in spaces with different lighting intentions. Group and individual reading spaces have been examined, as well as corridors with bookshelves. Due to the differences in the average illuminance in each library, an analysis of the luminance contrast between the work plane and the background has been carried out [19]. Both case studies present the same luminance in the task level, but the luminance of the surrounding surfaces is completely different. Current normative likely specify to lighting designer the illuminance in the work plane, however, the regulations are more flexible on how to illuminate other surfaces [20]. The chance is left to the lighting designer to choose how to light the rest of the surfaces taking into account the user's activities [21].

In the university library, the ratio between the luminance of the background and the work plane is 1:10, while in the community library the ratio is 10: 1. This inversely proportional change is perhaps due to the change in space usage of both libraries. In the first case study, it was found that all the spaces are conditioned solely for the study of university students. The university library, has directional lighting which helps to focus on reading activity, so it has mainly a static use of space. In the second case study, it was observed that there are a wide variety of activities in addition to reading, such as learning for children, meeting people for reading newspapers, searching for videos and music, among others. The community library, has diffuse lighting connecting the interior with the exterior visually, so it has mainly a dynamic use of space.

According to the results obtained, it seems that for spaces intended solely for reading, it is preferred to focus the highest luminosity on the work plane. In spaces that require multiple activities, there is a preference for putting more light intensity on the surfaces that define the space. Although it is evident that each activity requires a different lighting design, the present work reveals that the uniform light distribution allows the development of a greater number of activities simultaneously. The opportunity to carry out evaluations of different lighting environments could improve the specificity of the current regulation.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research has been supported by the PRONABEC (RJ 4296-2018) and by the Spanish Ministry of Economy under the MOET project, code BIA2016-7765-R.

REFERENCES

1. Applegate, R., (2009). The library is for studying. *The Journal of Academic Librarianship*, 35(4): p.341-346.

2. Appel, J. and James J. M., (1975). How much light do we really need? *Building Systems Design* p. 27-31
3. CIBSE, (1991). Lighting Guide 5: The visual environment in lecture, teaching and conference rooms. London.
4. SLL, (2003). Addendum to CIBSE Lighting Guide 5 The visual environment in lecture, teaching and conference rooms. London, SLL.
5. Ramasoot, T. and Fotios, S. (2008). Acceptability of screen reflections: lighting strategies for improving quality of the visual environment in the Classrooms of the Future. In *25th Conference on Passive and Low Energy Architecture*. Dublin October 22-24
6. Arnau, J. (2014). El espacio, la luz y lo santo. Albacete: *UNO editorial*.
7. Muñoz, O. (2012). Luces y sombras: museos contemporáneos españoles. Sevilla: *University of Sevilla. Secretariado de Publicaciones*.
8. Kuliga, S. Dalton, R. and Holscher, C. (2013) Aesthetic and Emotional Appraisal of The Seattle Public Library and its Relation to Spatial Configuration. In *Proceedings of the 9th International Space Syntax Symposium*. Seoul: Sejong University.
9. Gibson, J. (1974). La percepción del mundo visual. Buenos Aires: *Infinito*
10. Espinoza, E. (2015). La iluminación para el culto: reflexiones del confort visual en la penumbra. [Online], Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/101100> [15 April 2020].
11. Jacobs, A. (2007). High Dynamic Range Imaging and its Application in Building Research. *Advances in Building Energy Research*, 1 (1): p 177-202.
12. Martí M. and Sarrà J., (1999). Una biblioteca bajo el agua. *El País semanal*, 1191 p: 49-54, [Online], Available: https://repositori.upf.edu/bitstream/handle/10230/20539/marti_biblioteca.pdf?sequence=1&isAllowed=y [15 April 2020].
13. Biblioteca Esquerra de l'Eixample Agustí Centelles [Online], Available: <https://bibliotecavirtual.diba.cat/documents/442130/0/BARCELONA+EIXAMPLE-biblioteca+Esquerra+de+L%C2%B4Eixample-Agust%C3%AD%20Centelles.pdf> [15 April 2020].
14. IESNA (2000). IES Lighting Handbook (9th edition). *Illumination Engineering Society*.
15. Standard Specifications, Layouts and Dimensions. (2007). Lighting System in Schools. *DCSF Publications*.
16. Martín, F. (2005) Manual Práctico de Iluminación. *AMV Ediciones*.
17. Iluminación. Iluminación de los lugares de trabajo. Parte 1: Lugares de trabajo en interiores. [Online], Available: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0048898> [15 April 2020].
18. Iluminación artificial de interiores. [Online], Available: <http://www.aadl.com.ar/normas-iram-aadl/> [15 April 2020].
19. Bean, A. R., & Hopkins, A. G. (1980). Task and background lighting. *Lighting Research & Technology*, 12(3): p. 135–139.
20. Kwong, Q. (2020). Light level, visual comfort and lighting energy savings potential in a green-certified high-rise building. *Journal of Building Engineering*, 29: p. 101198.
21. Costanzo, V.; Evola, G.; Marletta, L. (2017). A Review of Daylighting Strategies in Schools: State of the Art and Expected Future Trends. *Buildings*, 7: p. 41.

ANEXO 2: SEB 2021

¡Atención!

Este anexo que contiene el trabajo

Espinoza Cateriano, E., Lopez-Besora, J., Alonso-Montolio, C., Coch Roura, H., Crespo Cabillo, I., (2022) ***The value of the colour temperature in a low light intensity design***. En: Littlewood, J.R., Howlett, R.J., Jain, L.C. (eds) Sustainability in energy buildings 2021, Smart innovation systems and technologies, vol 236. Springer, Singapore

puede consultarse en la web del editor

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-6269-0_12

(UPC.SBPA)

ANEXO 3: SEB 2020

¡Atención!

Este anexo que contiene el trabajo

Espinoza Cateriano, E., Lopez-Besora, J., Isalgue Buxeda, A., Coch Roura, H., Crespo Cabillo, I., (2021). ***Evaluation of three lighting software in the use of different light intensity spaces***. En: Littlewood, J.R., Howlett, R.J., Jain, L.C. (eds) Sustainability in energy and buildings 2020, Smart innovation systems and technologies, vol 203. Springer, Singapore

puede consultarse en la web del editor

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-8783-2_35

(UPC.SBPA)

El anexo 4 reúne las imágenes en HDR y falso color procesadas para todos los puntos de medición dentro del museo de Badalona. El análisis de las imágenes permite reconocer el color de las superficies iluminadas y determinar el valor mínimo, medio y máximo de luminancias en cada una de las escenas. En total se definieron cien puntos de medición los cuales fueron divididos en tres bloques debido al cambio en la forma de presentar la información museográfica. El bloque A cuenta con 31 puntos de medición, el bloque B con 29 y el bloque C tiene 40. La escala de luminancias ha sido fijada entre 0 cd/m^2 y 11 cd/m^2 en todos los casos y se ha escogido la medida logarítmica ya que permite ver con mayor precisión el valor de las bajas luminancias.

Es así que en el recorrido del museo de Badalona se pueden distinguir 3 partes. La primera parte, el bloque A que corresponde con la inmersión en el museo, empieza en un hall de acceso al nivel de la calle, continua por unas escaleras que conducen a la planta del sótano y una vez allí tomamos la ruta definida por una pasarela metálica sobre las ruinas romanas. El tiempo necesario para recorrer la primera parte del museo permite adecuarnos al bajo nivel de luz. Sin embargo, en la segunda parte del recorrido, el bloque B, observamos un incremento en el nivel de luz debido que se requiere ver con detalle determinados objetos museográficos en las vitrinas de exhibición. La tercera parte de recorrido, el bloque C, vuelve a conducirnos mediante la pasarela metálica hacia la ciudad romana. El nivel de luz es bajo y esta vez el trayecto es más largo; por tanto, el tiempo para recorrerlo y adaptarnos a la oscuridad es mayor.

En la tabla 1 se organizan todos los datos obtenidos de las imágenes analizadas. Las luminancias mínimas, medias y máximas de los cien puntos de medición están ordenados en tres bloques que corresponden con los tres tipos de recorridos descritos en el párrafo anterior. El eje de las abscisas indica el valor de la luminancia en escala logarítmica dentro del rango de visión del ser humano.

En primer lugar, se observa que los valores de luminancia en los tres primeros puntos de medición del bloque A son muy diferentes al resto. El cambio en el rango de luminancias mínima, media y máxima obedece a que pertenecen a espacios de alta intensidad lumínica. Los tres puntos de medición mencionados se encuentran en el hall de ingreso de la primera planta, en donde la luz natural ingresa a través de las ventanas. En segundo lugar, se analizan los datos de valores mínimos, medios y máximos. Es notorio que los valores mínimos de luminancias están en 0.01 cd/m^2 en casi todas las escenas, esto se debe a que los instrumentos de medición, luminancímetro y software, empiezan a dar información a partir de esta cifra. No se descarta que haya valores mínimos más bajos antes de llegar a cero absoluto. Los valores medios de luminancias están entre 0.1 cd/m^2 y 1 cd/m^2 en los bloques A y C; mientras que, en el bloque B se incrementan y pasan al rango entre 1 cd/m^2 y 10 cd/m^2 . El cambio notorio de luminancias medias entre el bloque central y los extremos se debe al aumento del nivel de luz para ver los detalles de la exposición. Los valores de luminancias máximos en los tres bloques oscilan entre los 10 cd/m^2 y 100 cd/m^2 . En todos los casos los valores máximos corresponden con la luminancia de una fuente de luz o su reflejo sobre una superficie especular. Los resultados en los bloques A y C son variados, pero en el bloque B los valores son constantes. La diferencia entre estos dos tipos de resultados es que en los bloques de los extremos las escenas se fotografiaron con diferentes puntos de vista, mientras que, en el bloque central el observador se sitúa siempre frente a la vitrina de exposición. Por último, podemos observar que el valor medio de las luminancias se mantiene en los márgenes de 0.1 cd/m^2 y 10 cd/m^2 , por tanto, el tipo de visión que rige la percepción visual en este museo es la mesópica.

ANEXO 4

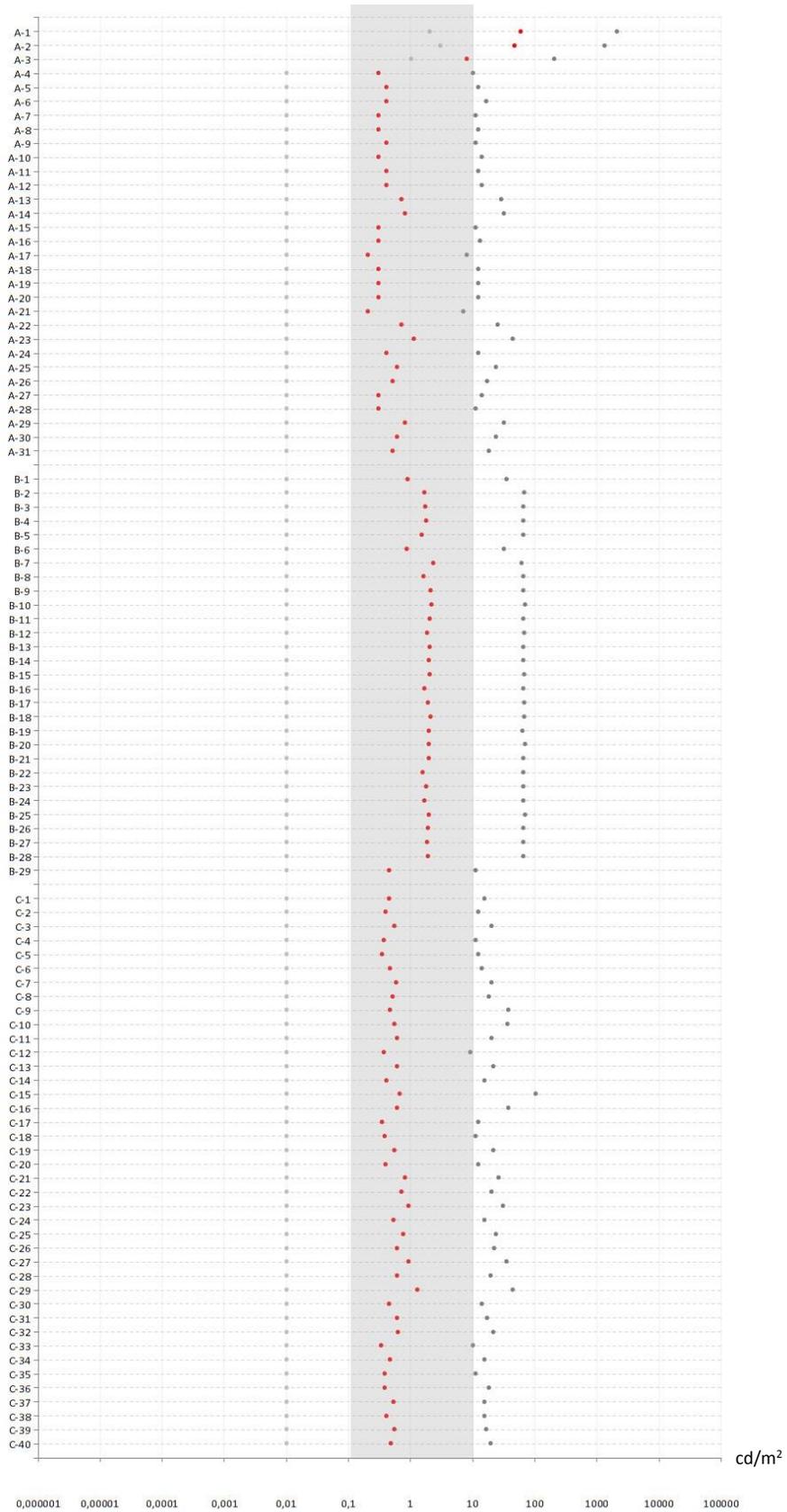


Tabla 1. Valores de luminancia mínimo, medio y máximo en los cien puntos de medición.

BLOQUE A

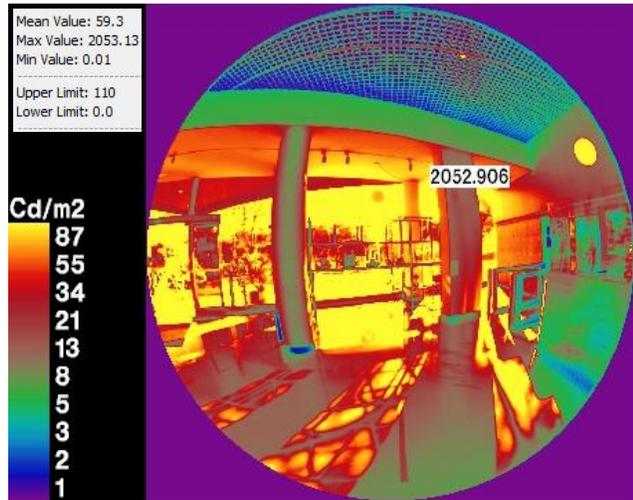


Figura 01. HDR y falso color en punto de medición A-1



Figura 02. HDR y falso color en punto de medición A-2

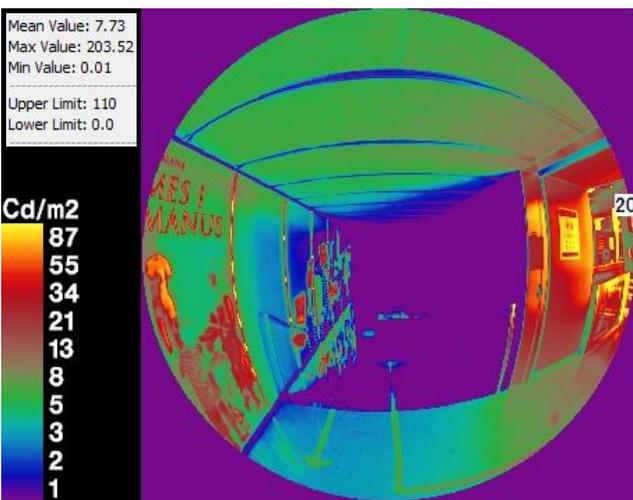


Figura 03. HDR y falso color en punto de medición A-3

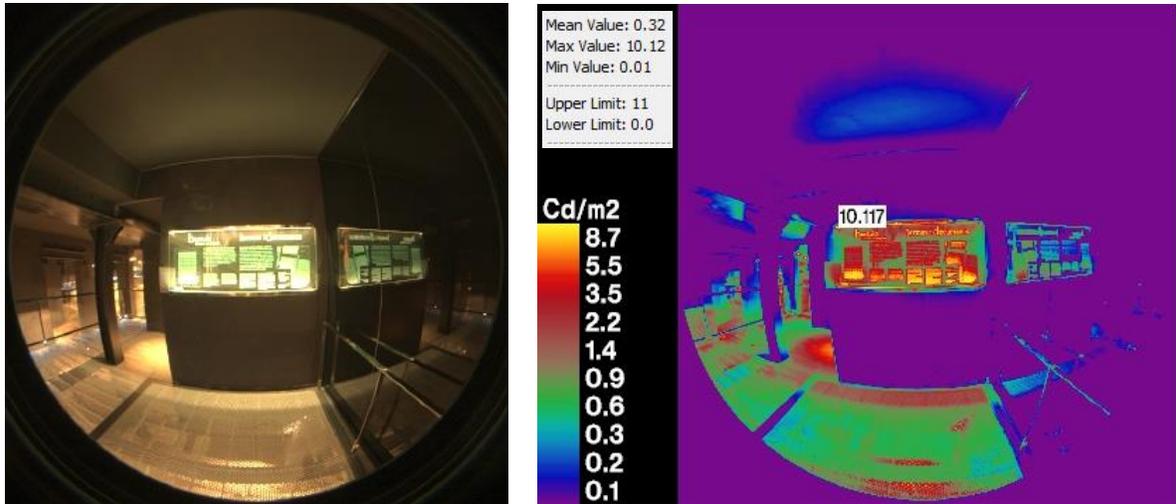


Figura 04. HDR y falso color en punto de medición A-4

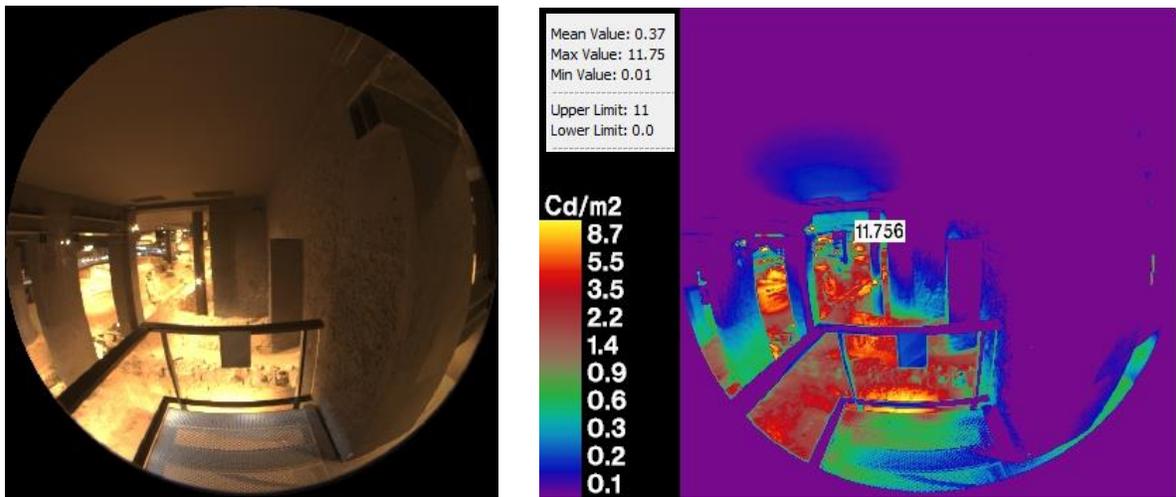


Figura 05. HDR y falso color en punto de medición A-5

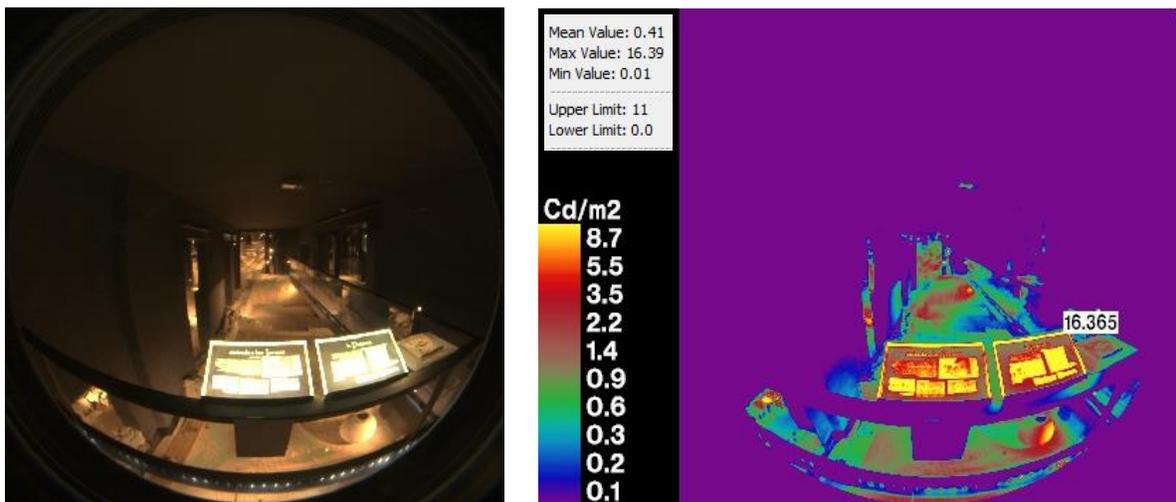


Figura 06. HDR y falso color en punto de medición A-6

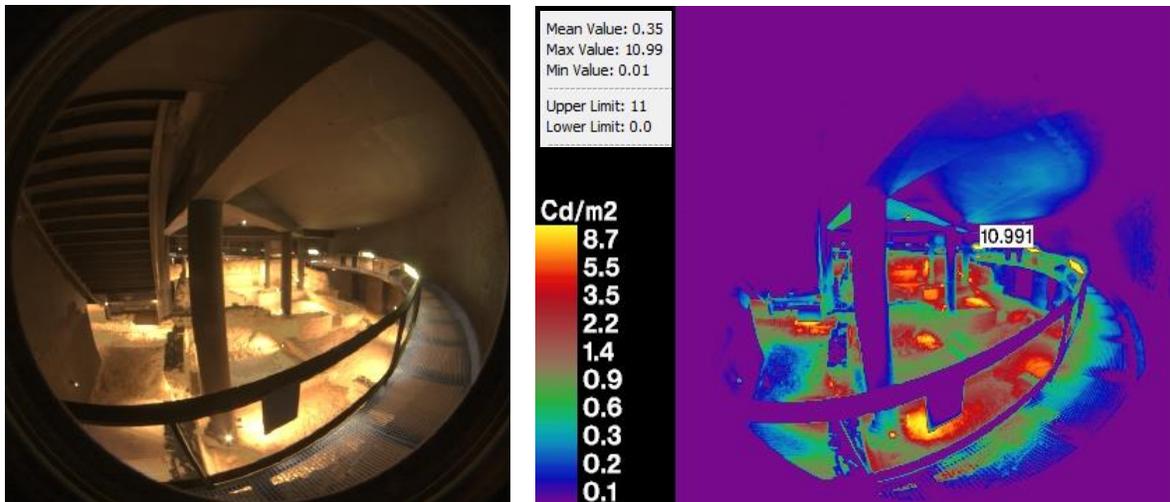


Figura 07. HDR y falso color en punto de medición A-7

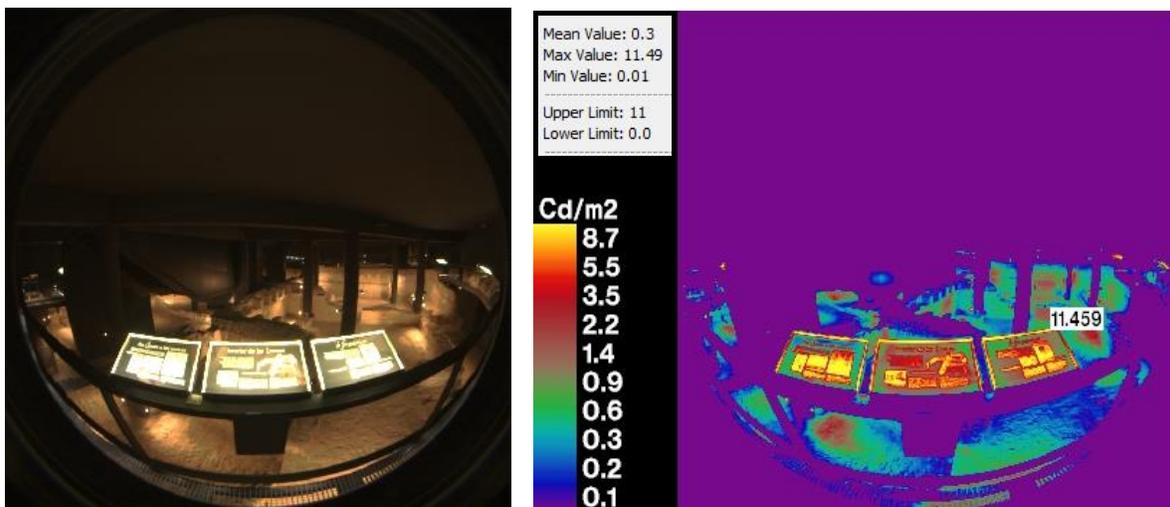


Figura 08. HDR y falso color en punto de medición A-8

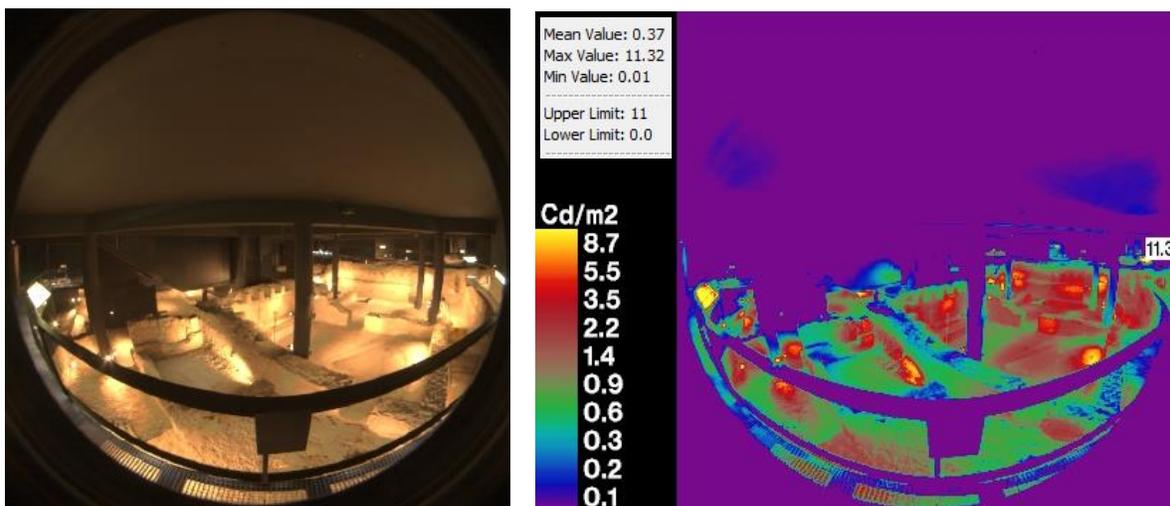


Figura 09. HDR y falso color en punto de medición A-9

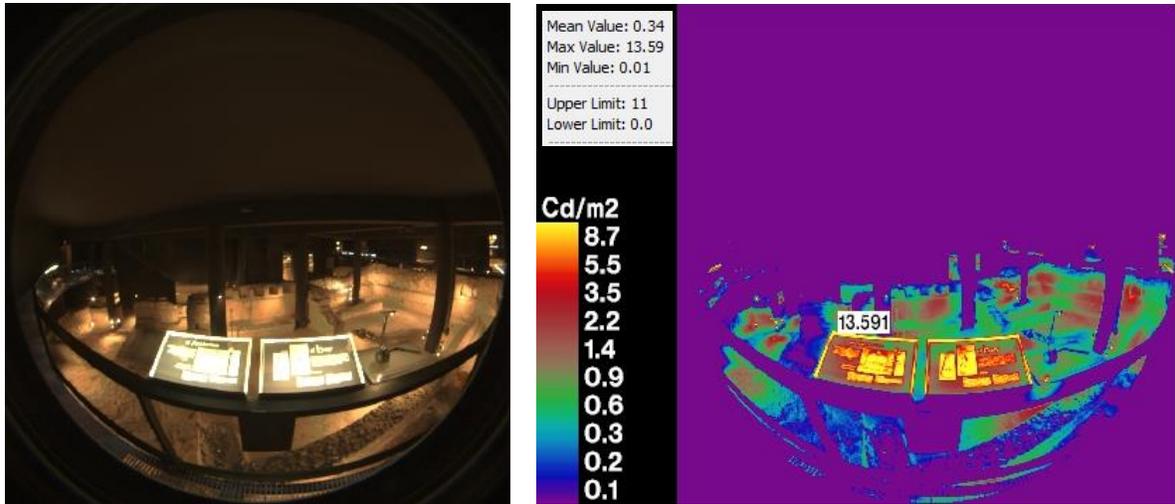


Figura 10. HDR y falso color en punto de medición A-10

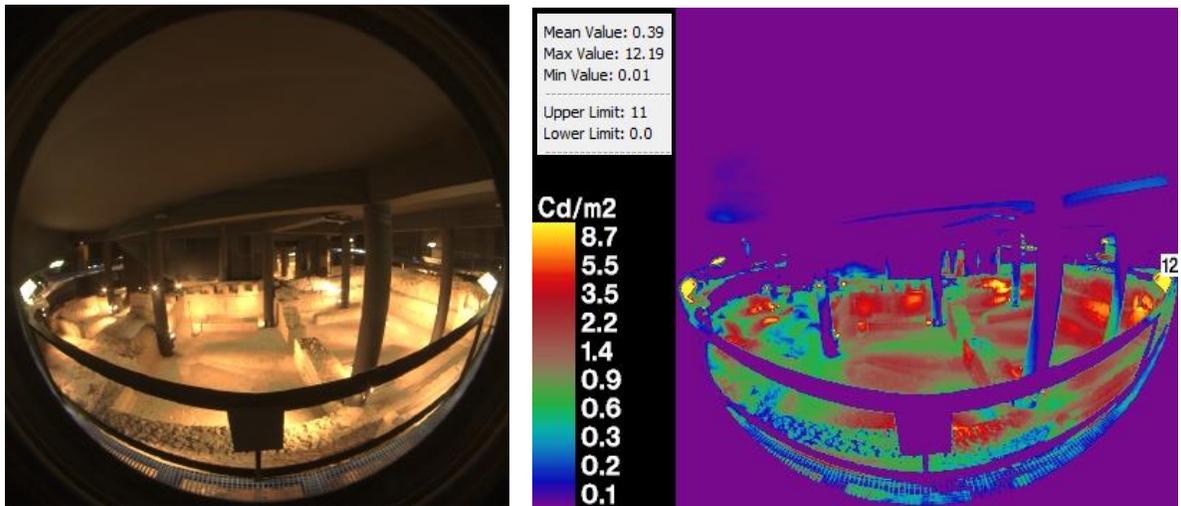


Figura 11. HDR y falso color en punto de medición A-11

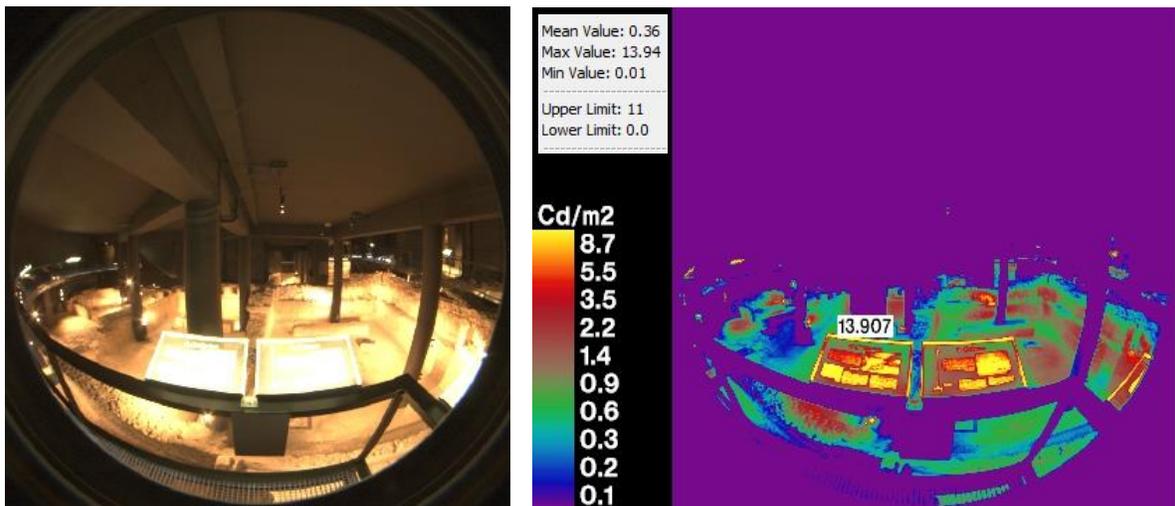


Figura 12. HDR y falso color en punto de medición A-12

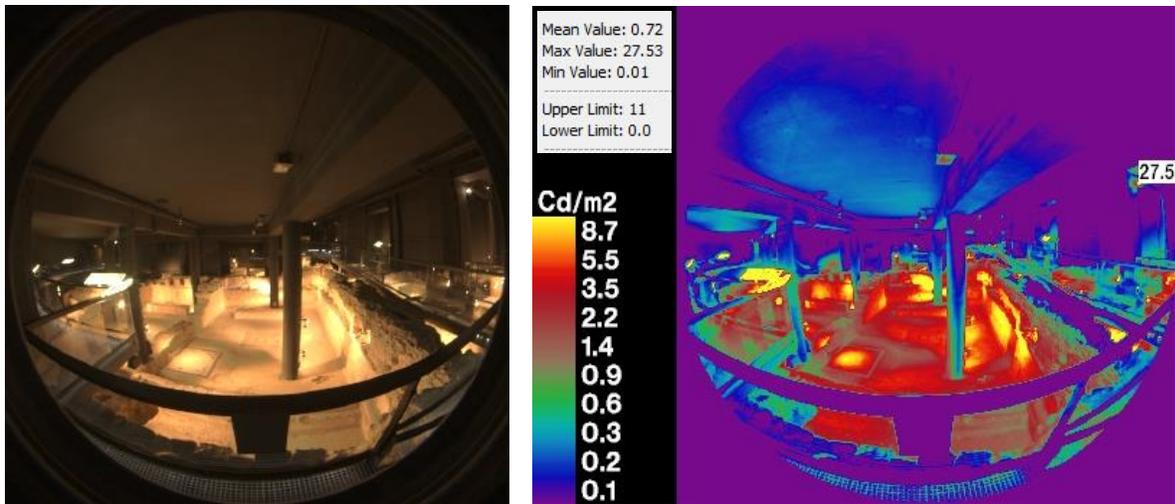


Figura 13. HDR y falso color en punto de medición A-13

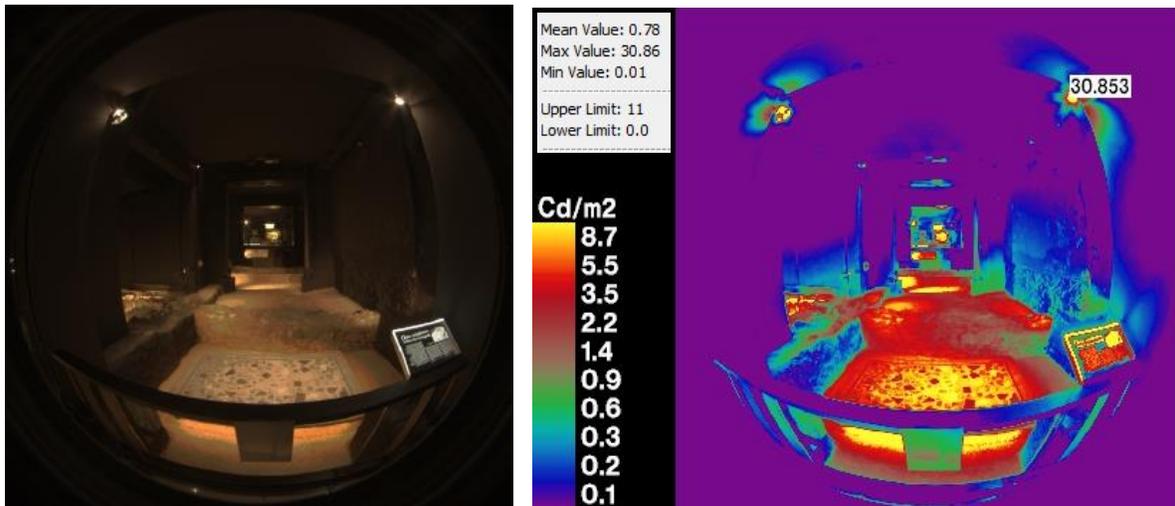


Figura 14. HDR y falso color en punto de medición A-14

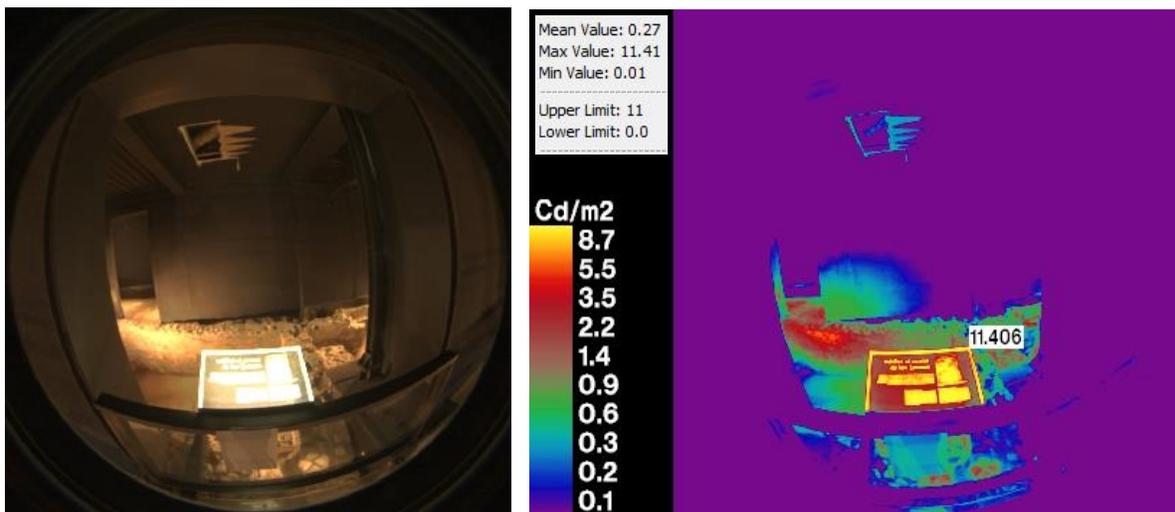


Figura 15. HDR y falso color en punto de medición A-15

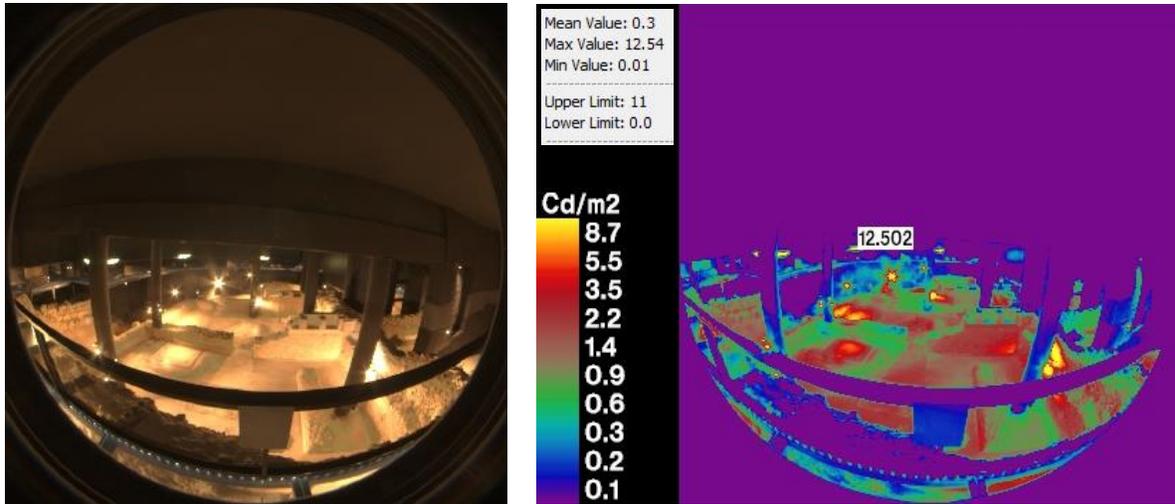


Figura 16. HDR y falso color en punto de medición A-16

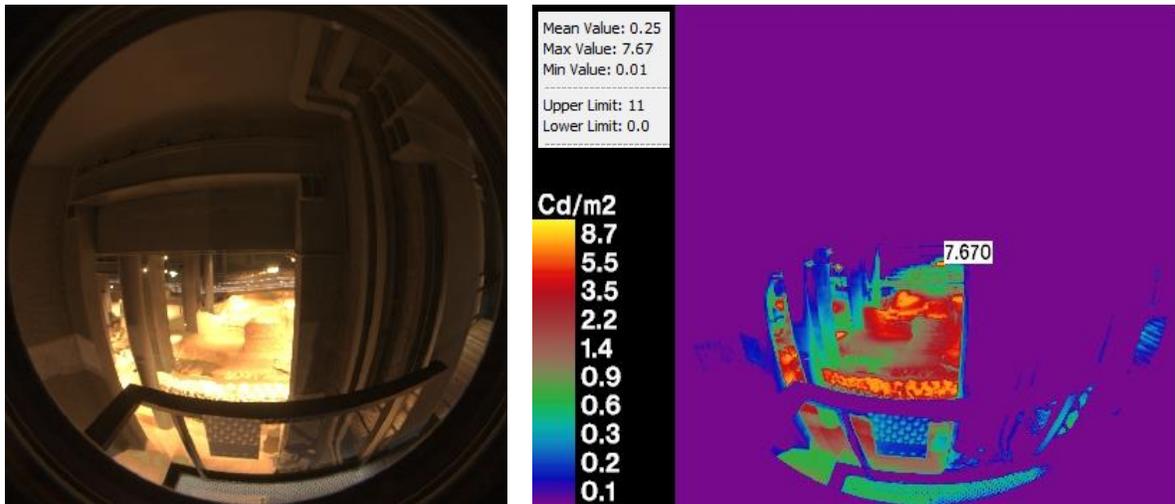


Figura 17. HDR y falso color en punto de medición A-17

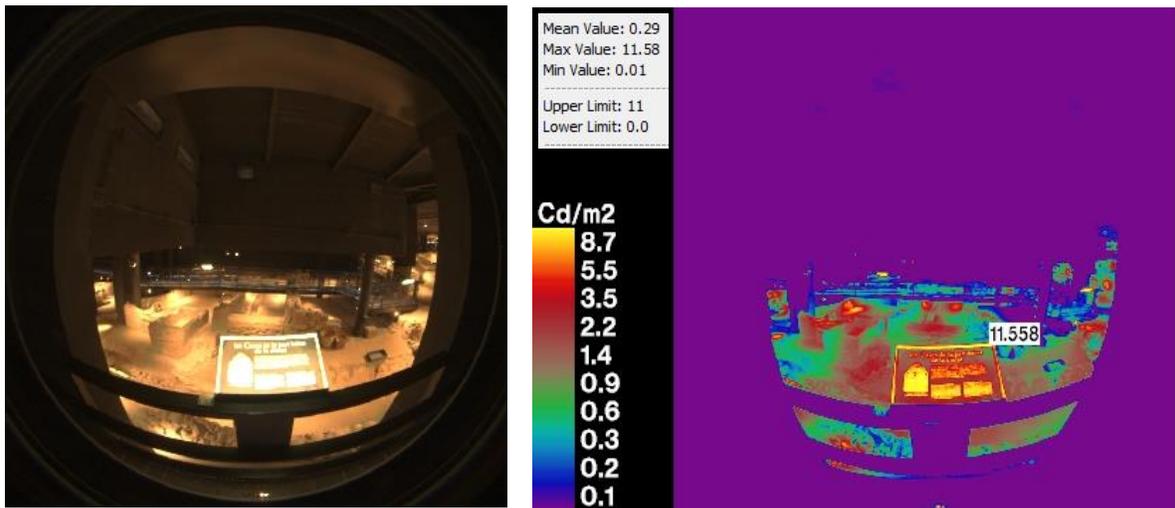


Figura 18. HDR y falso color en punto de medición A-18

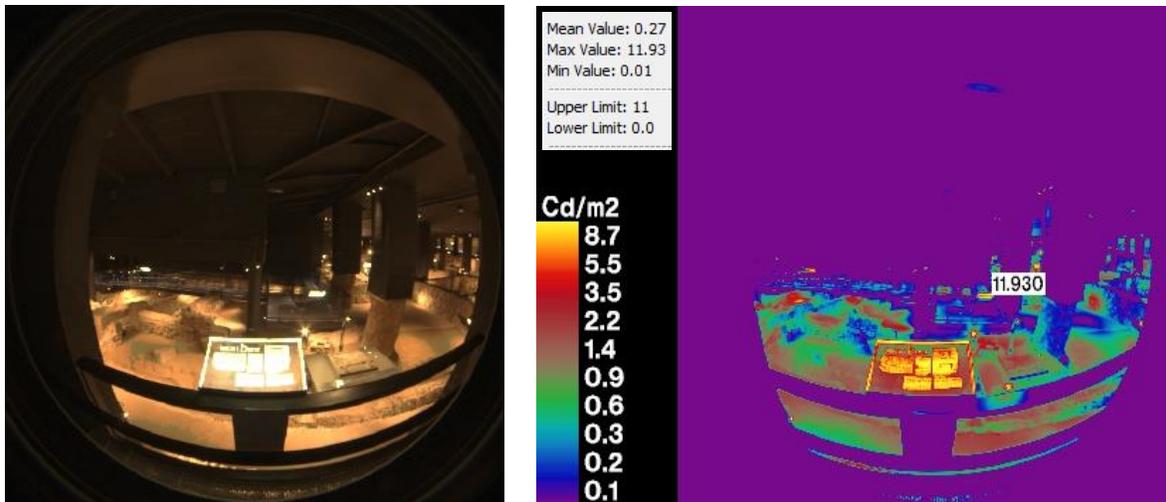


Figura 19. HDR y falso color en punto de medición A-19

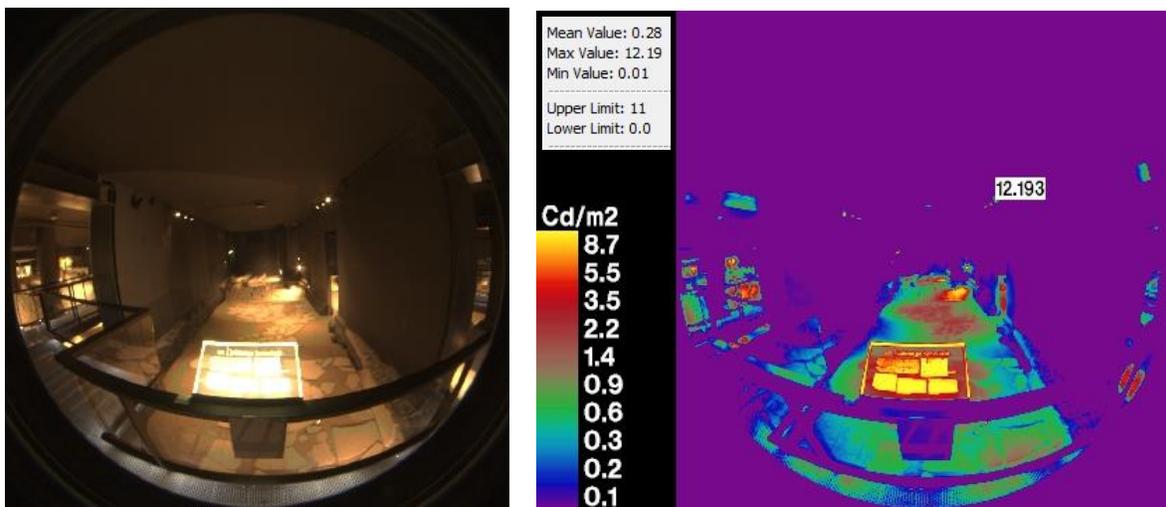


Figura 20. HDR y falso color en punto de medición A-20

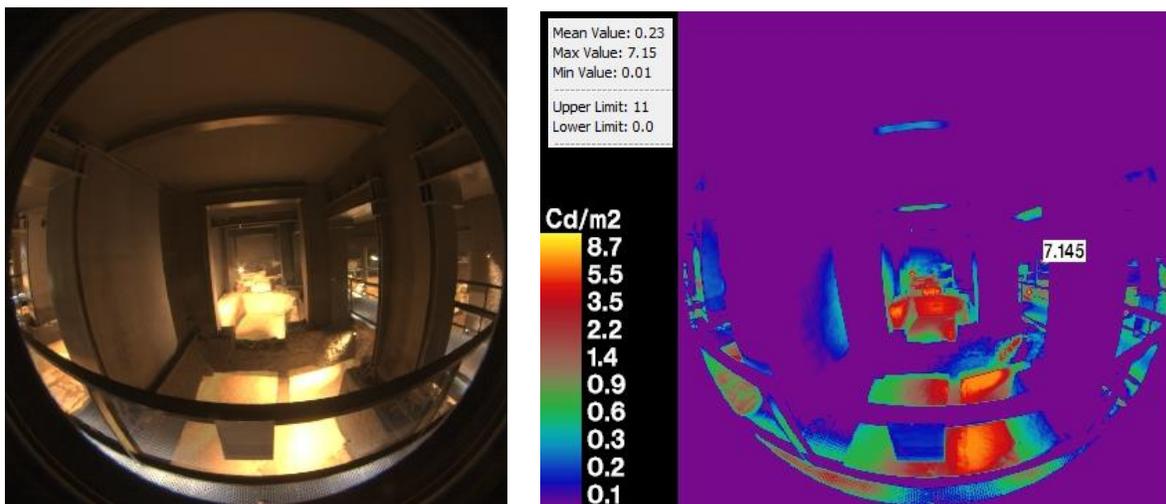


Figura 21. HDR y falso color en punto de medición A-21

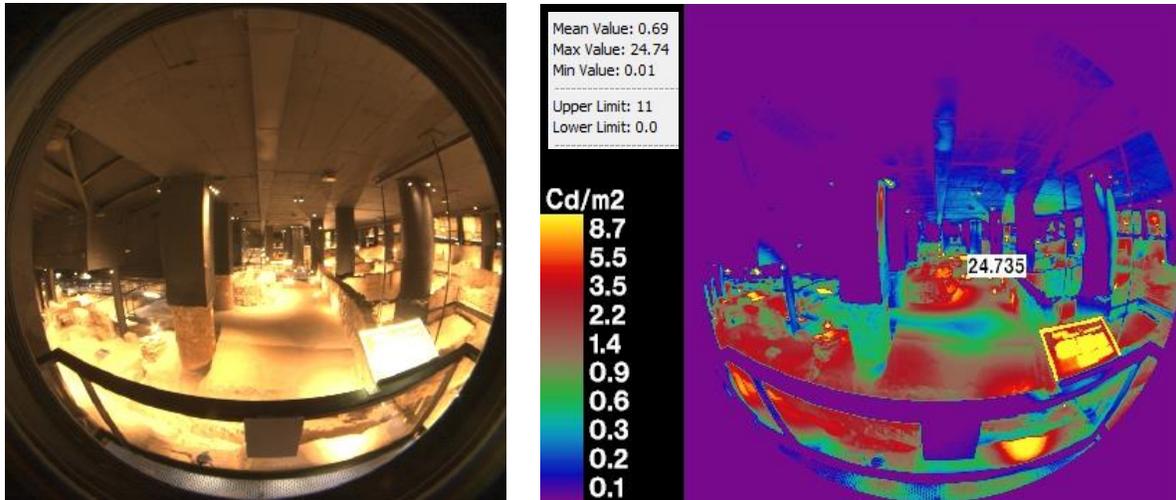


Figura 22. HDR y falso color en punto de medición A-22

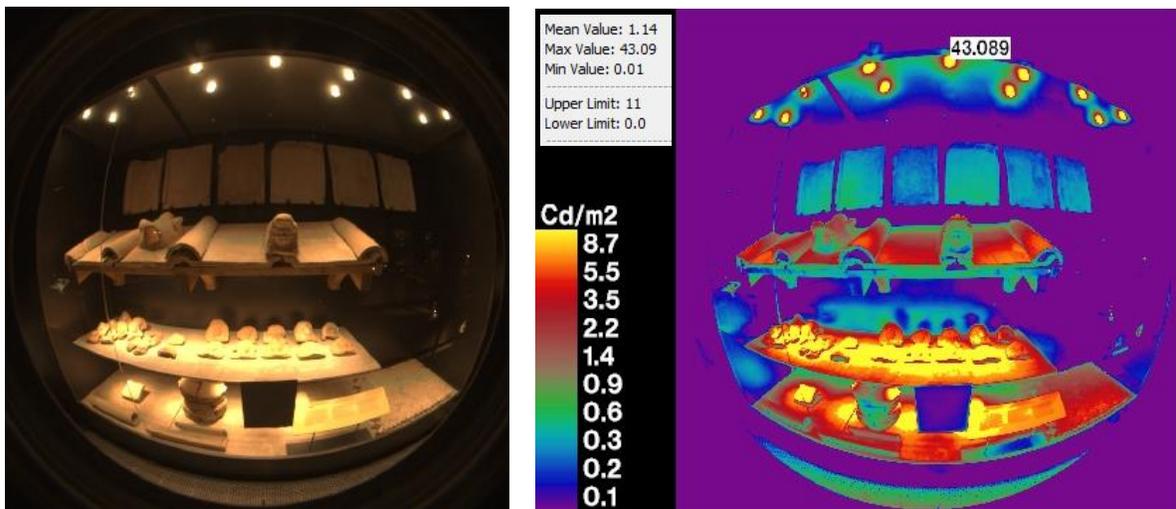


Figura 23. HDR y falso color en punto de medición A-23

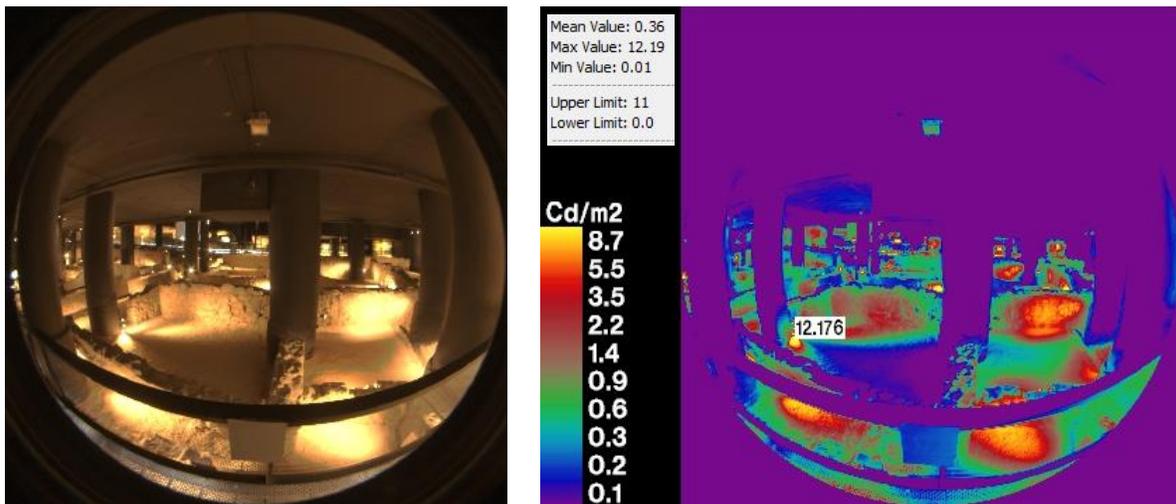


Figura 24. HDR y falso color en punto de medición A-24

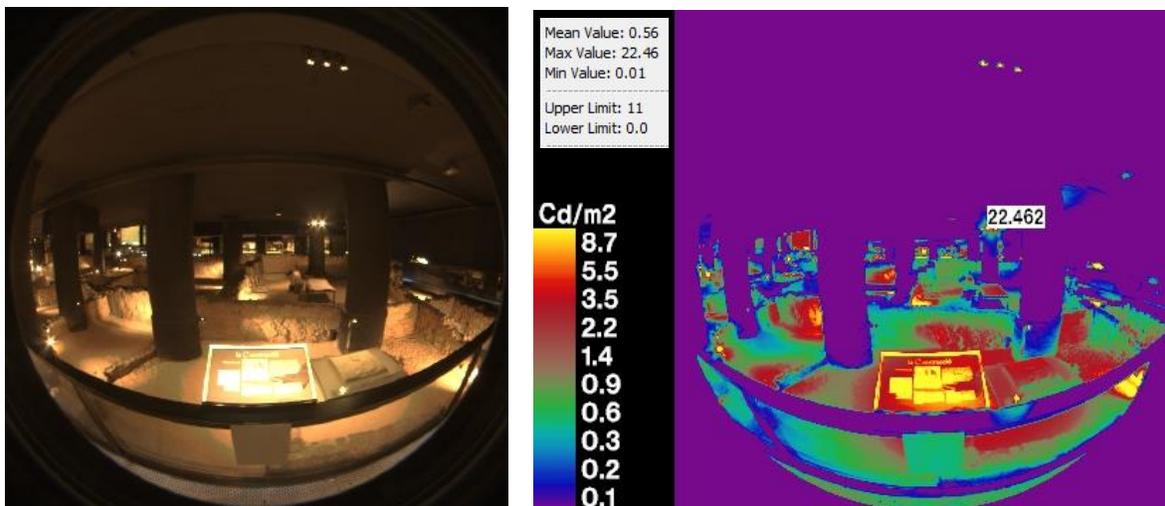


Figura 25. HDR y falso color en punto de medición A-25

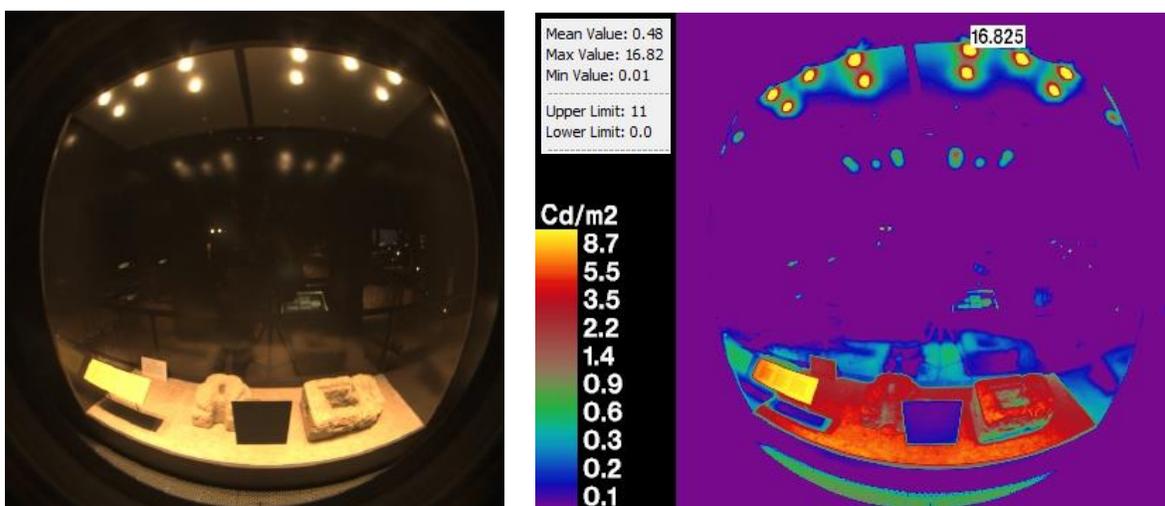


Figura 26. HDR y falso color en punto de medición A-26

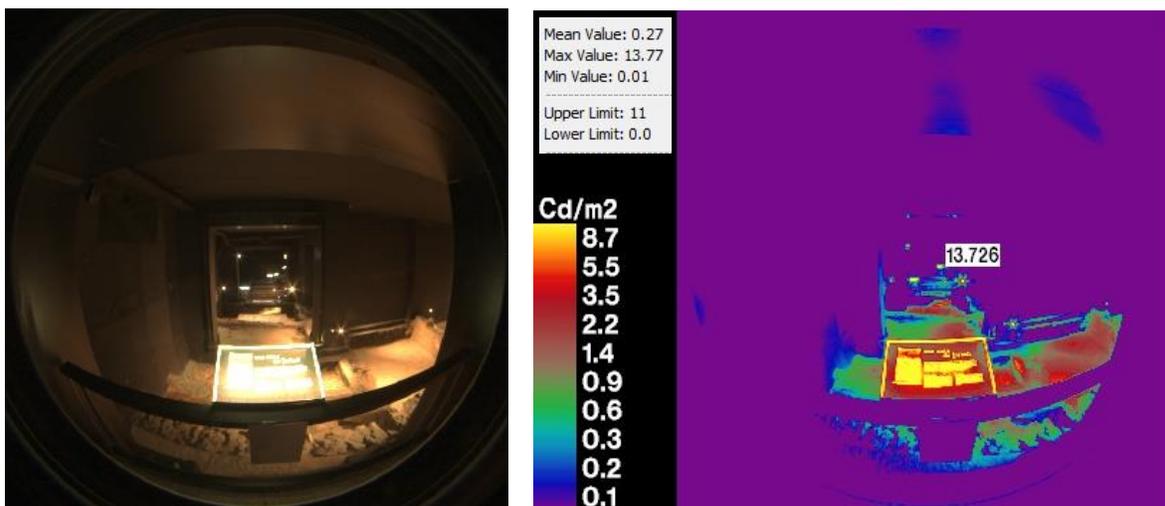


Figura 27. HDR y falso color en punto de medición A-27

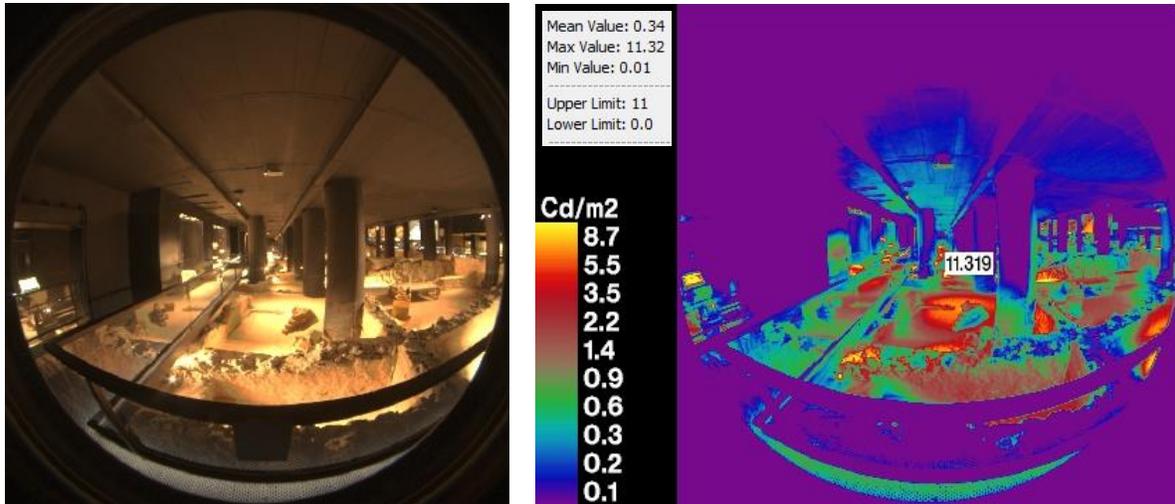


Figura 28. HDR y falso color en punto de medición A-28

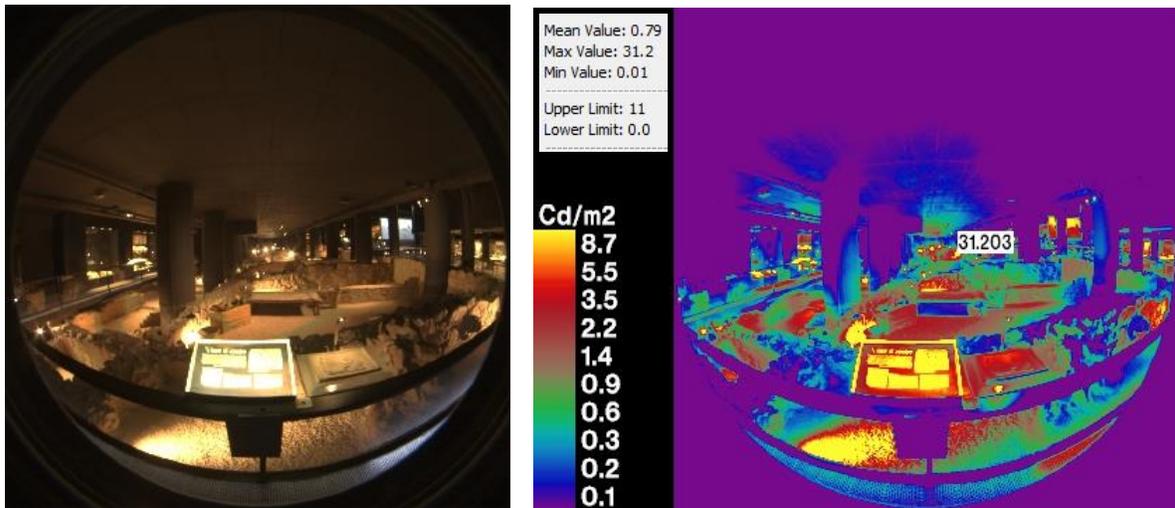


Figura 29. HDR y falso color en punto de medición A-29

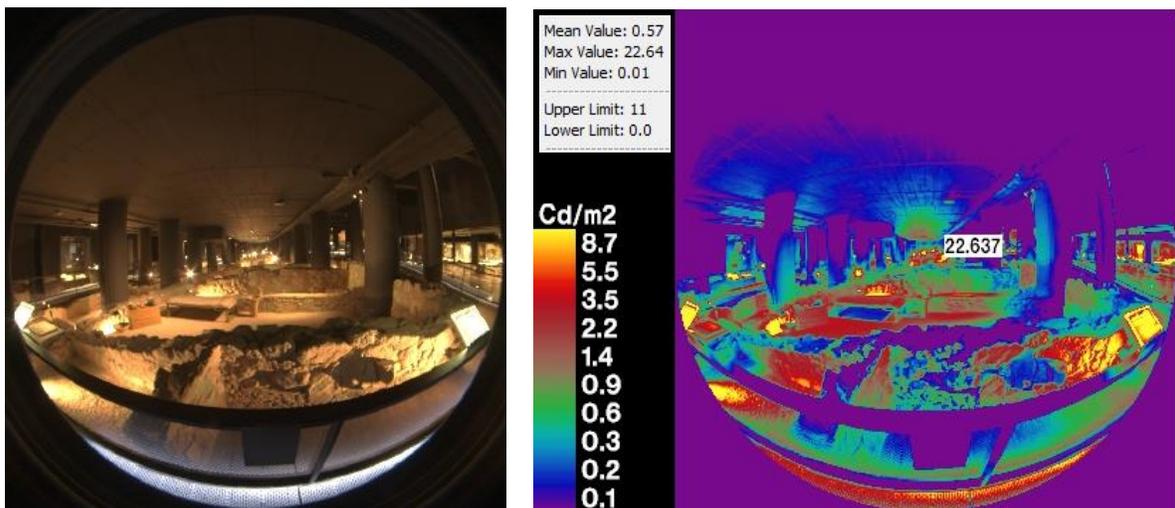


Figura 30. HDR y falso color en punto de medición A-30

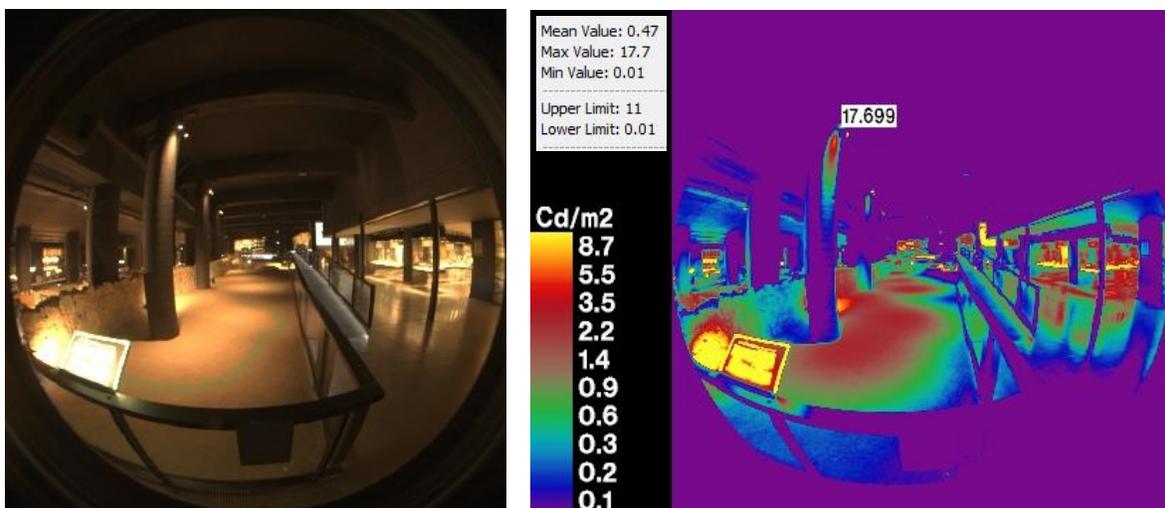


Figura 31. HDR y falso color en punto de medición A-31

BLOQUE B

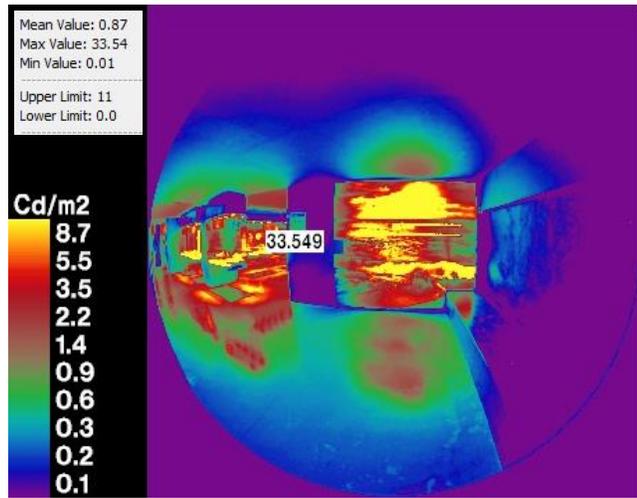
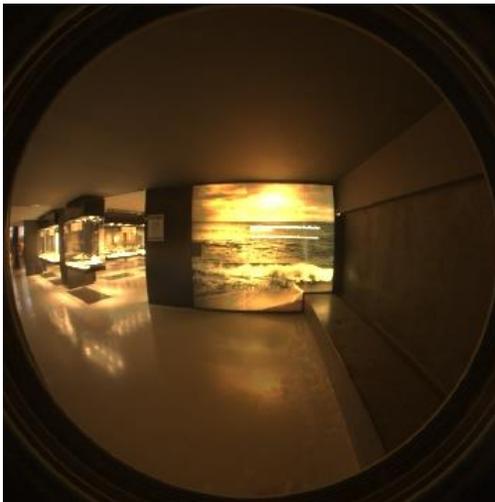


Figura 32. HDR y falso color en punto de medición B-1

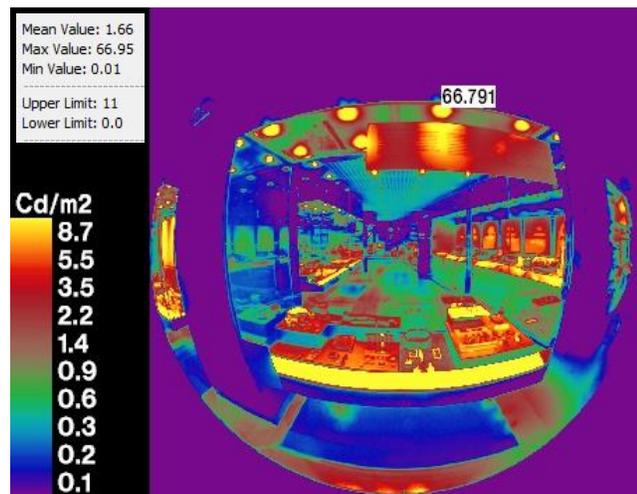


Figura 33. HDR y falso color en punto de medición B-2

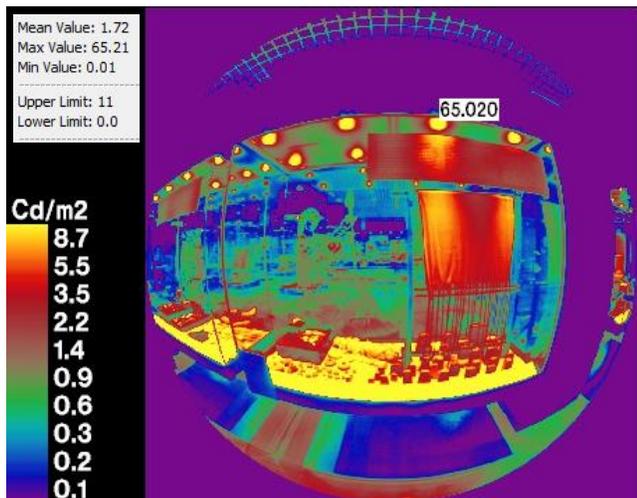


Figura 34. HDR y falso color en punto de medición B-3

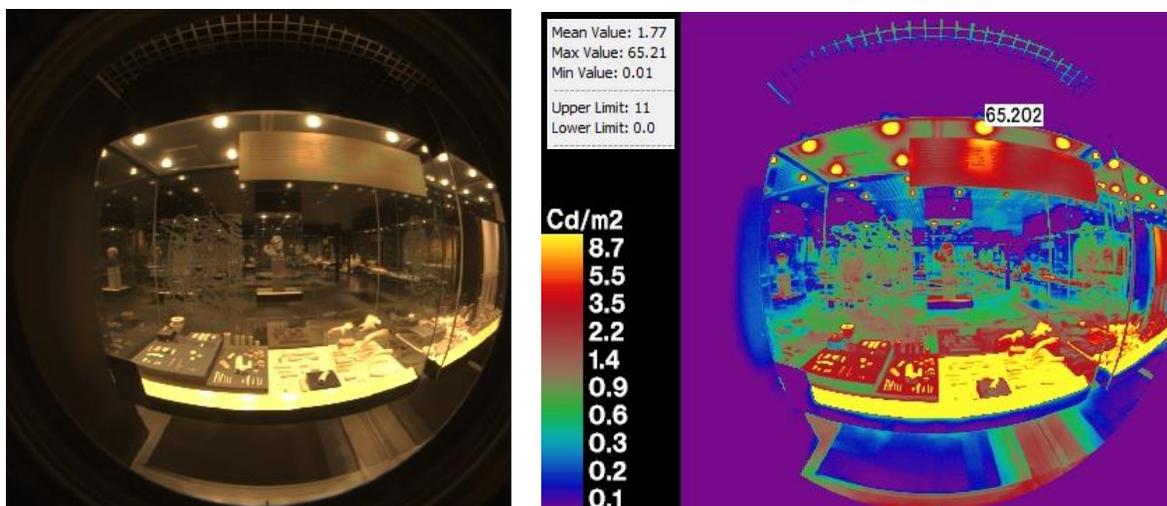


Figura 35. HDR y falso color en punto de medición B-4

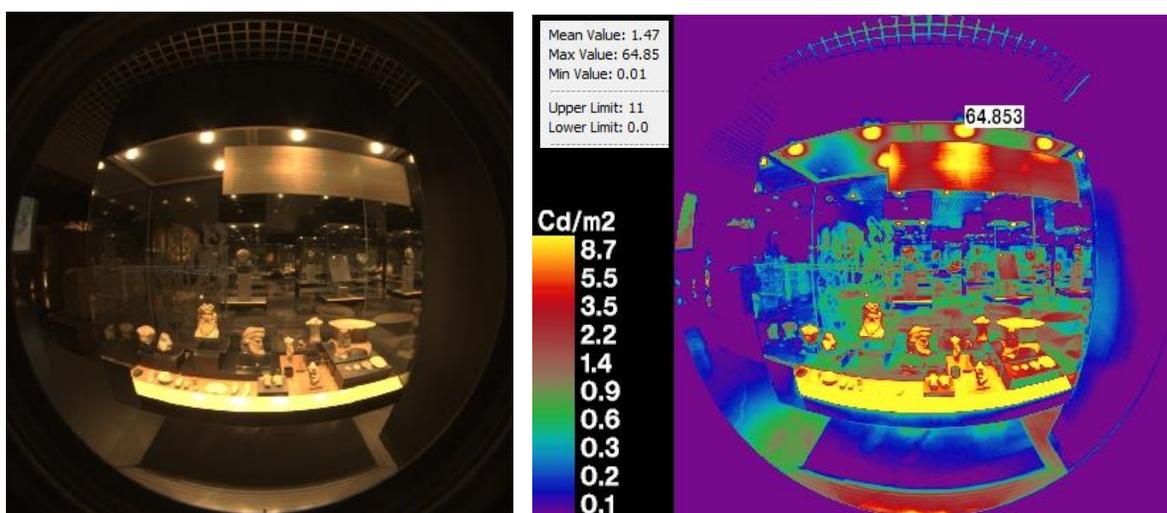


Figura 36. HDR y falso color en punto de medición B-5

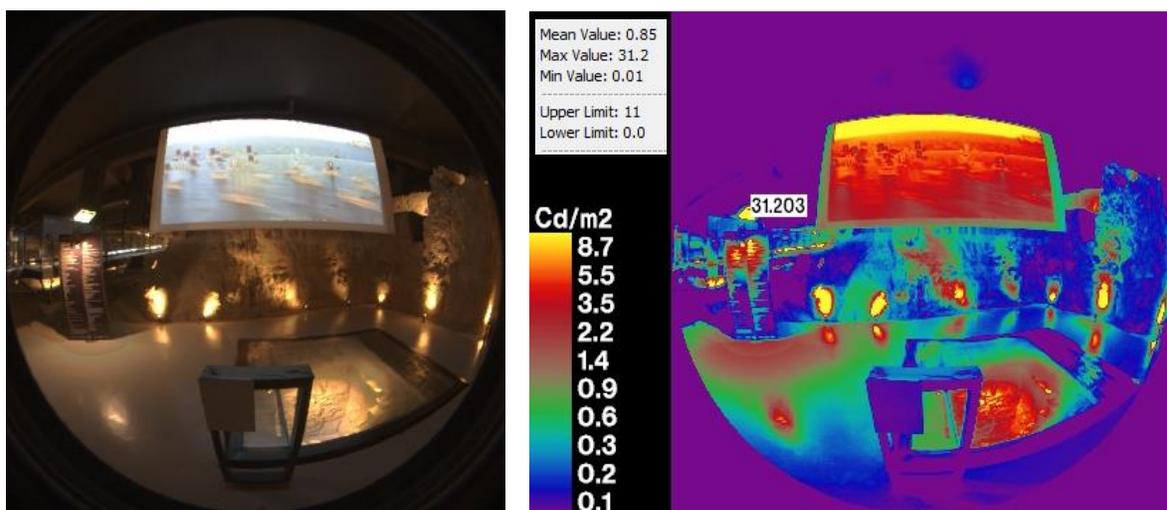


Figura 37. HDR y falso color en punto de medición B-6

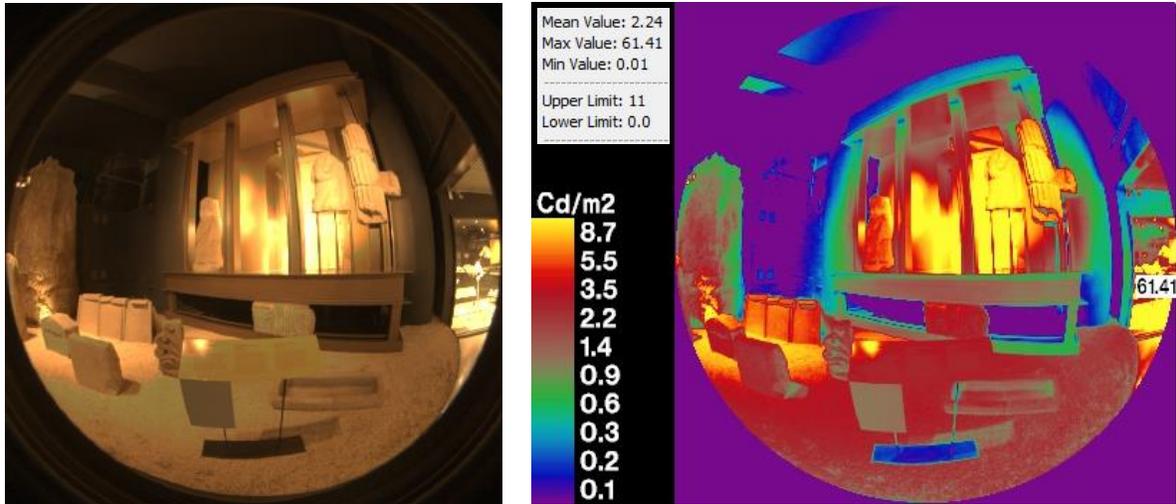


Figura 38. HDR y falso color en punto de medición B-7

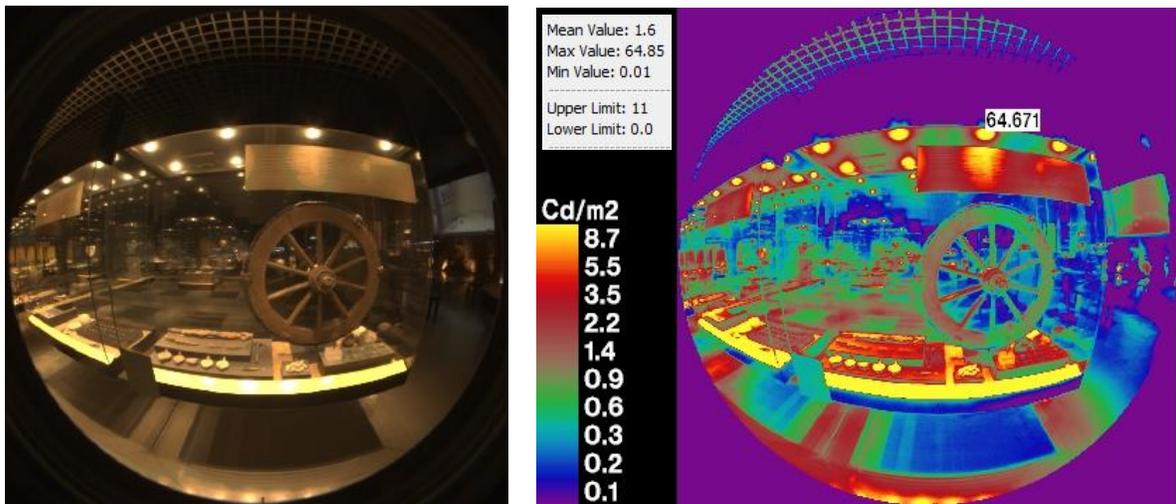


Figura 39. HDR y falso color en punto de medición B-8

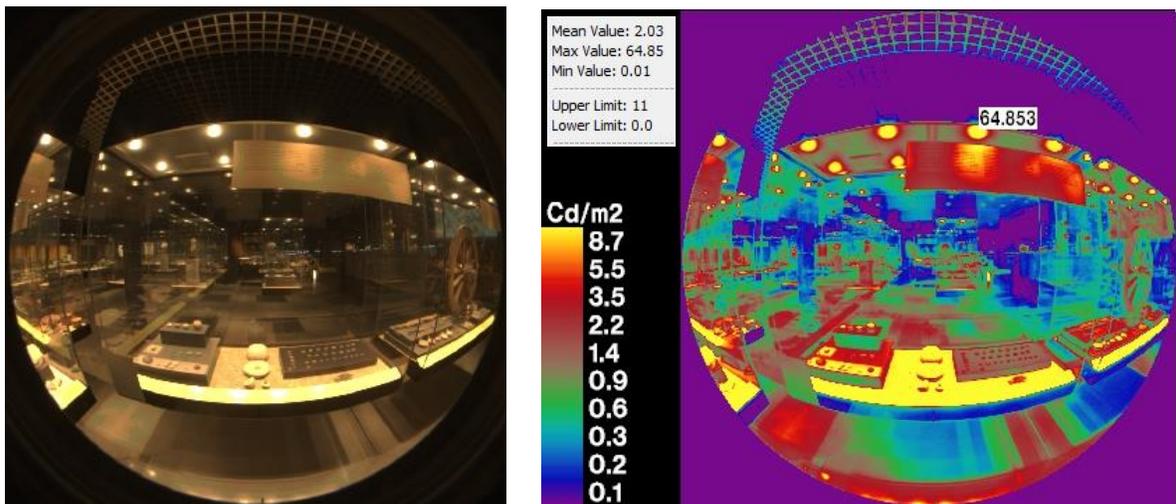


Figura 40. HDR y falso color en punto de medición B-9

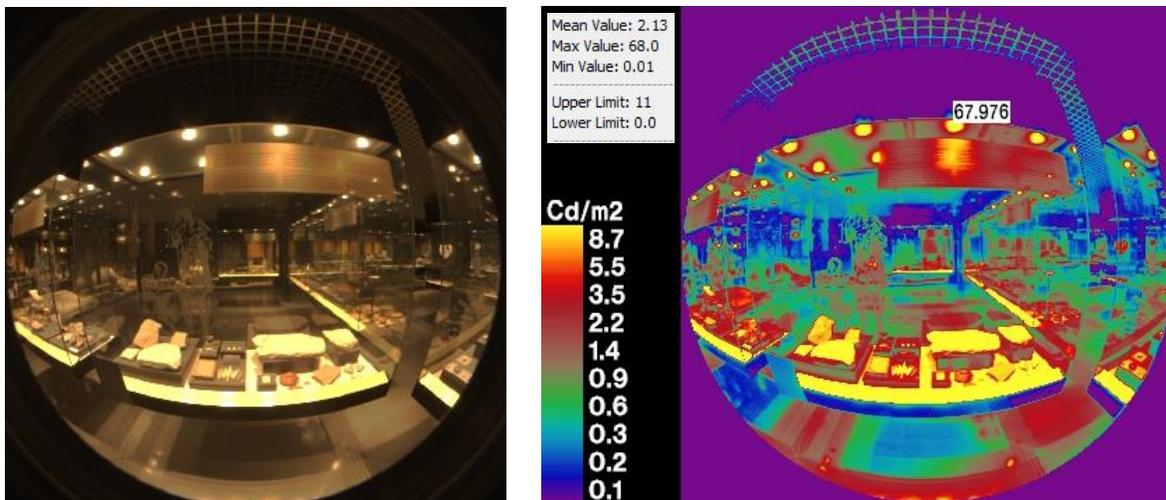


Figura 41. HDR y falso color en punto de medición B-10

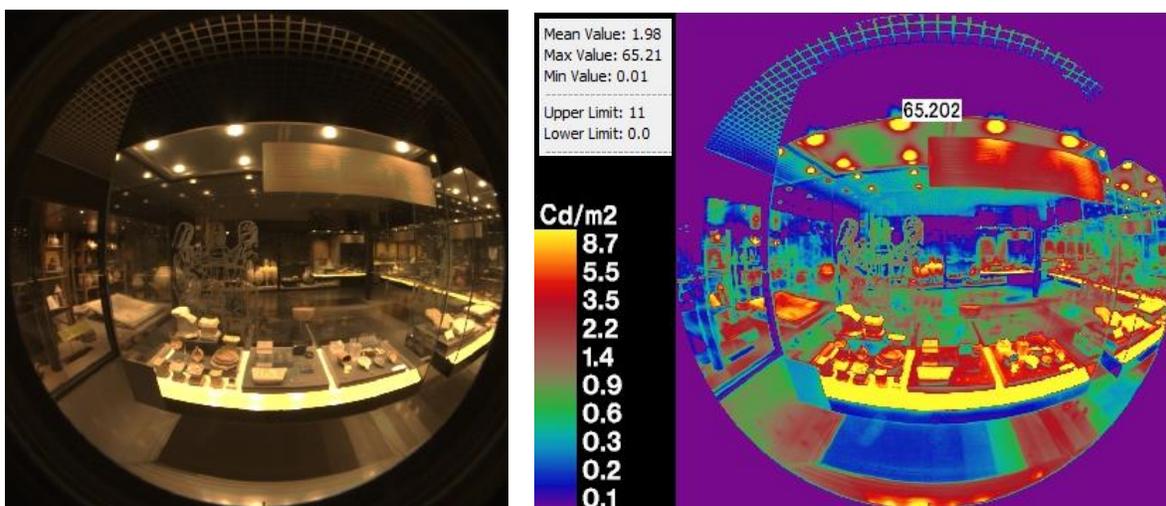


Figura 42. HDR y falso color en punto de medición B-11

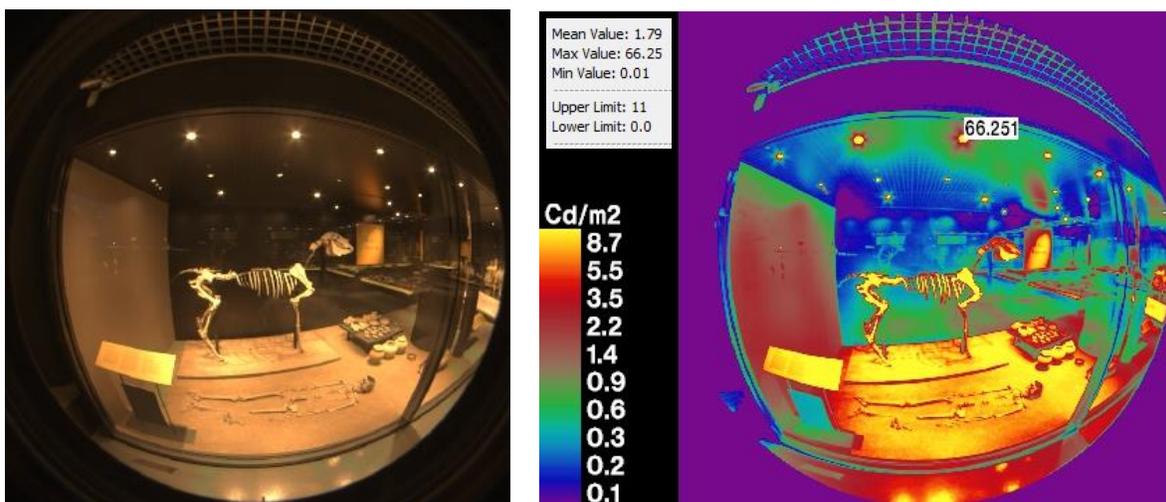


Figura 43. HDR y falso color en punto de medición B-12

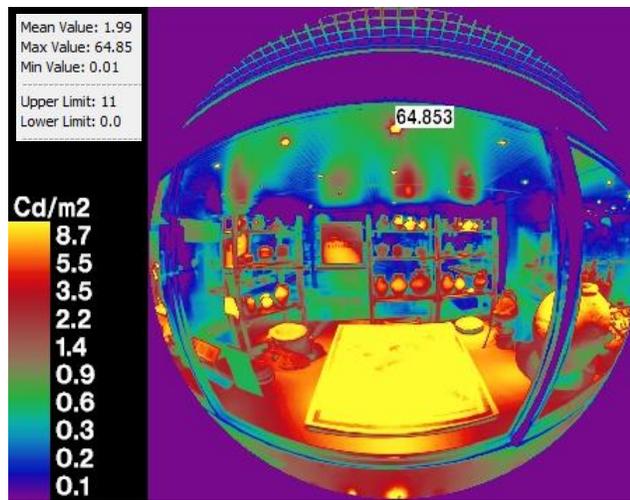


Figura 44. HDR y falso color en punto de medición B-13

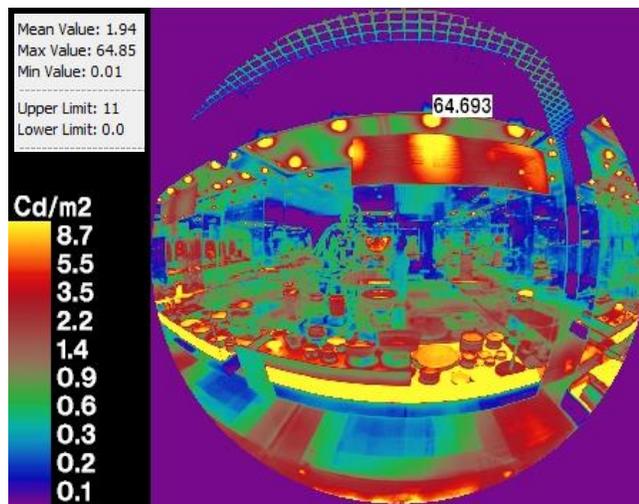


Figura 45. HDR y falso color en punto de medición B-14

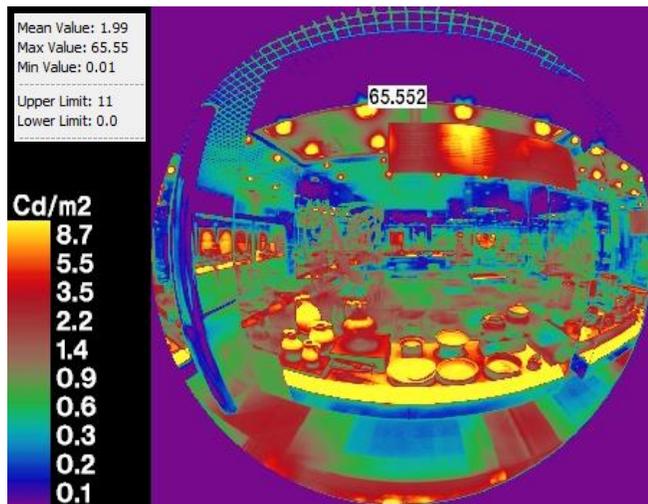


Figura 46. HDR y falso color en punto de medición B-15

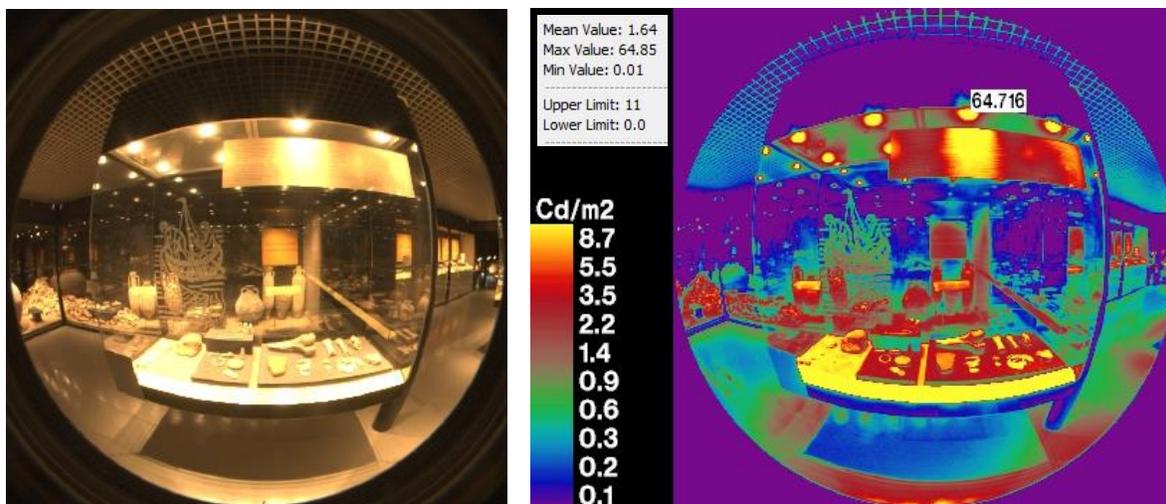


Figura 47. HDR y falso color en punto de medición B-16

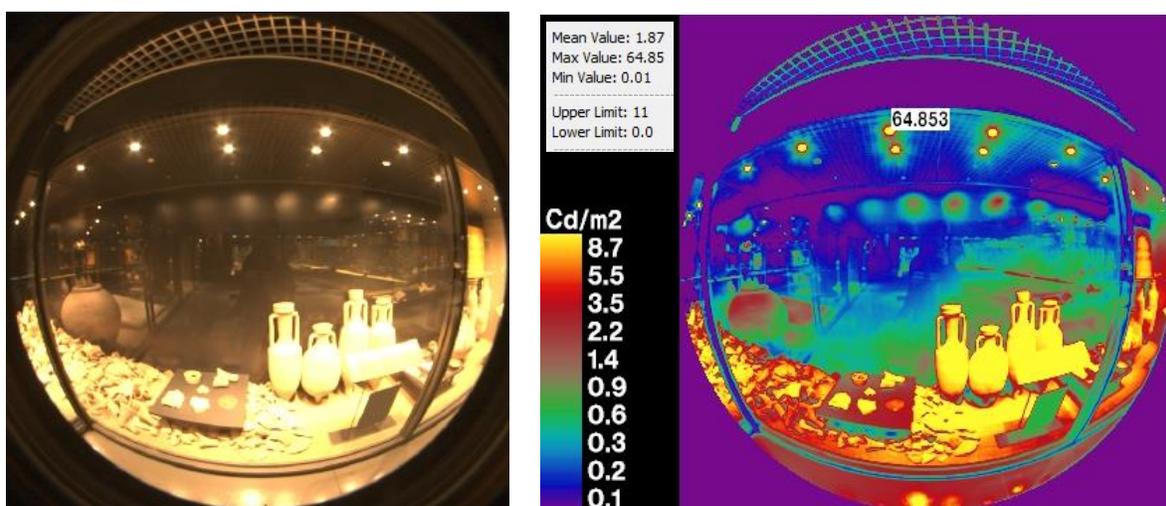


Figura 48. HDR y falso color en punto de medición B-17

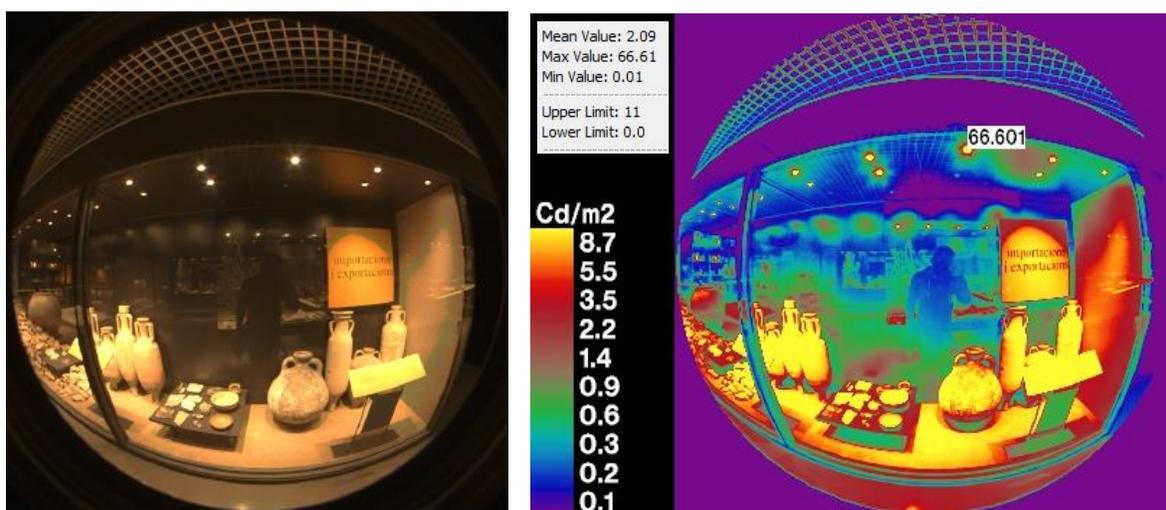


Figura 49. HDR y falso color en punto de medición B-18

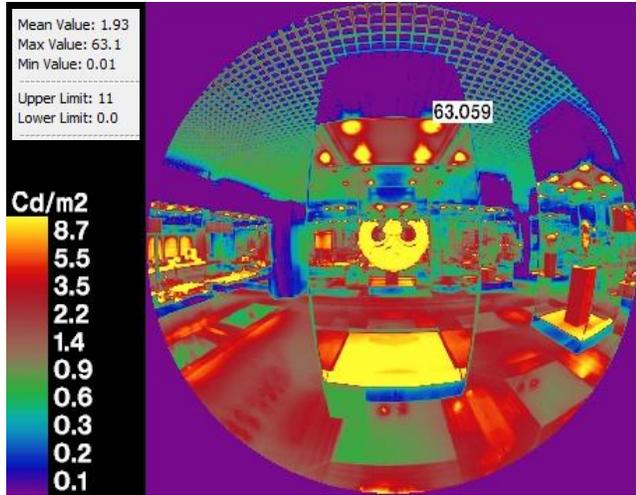


Figura 50. HDR y falso color en punto de medición B-19

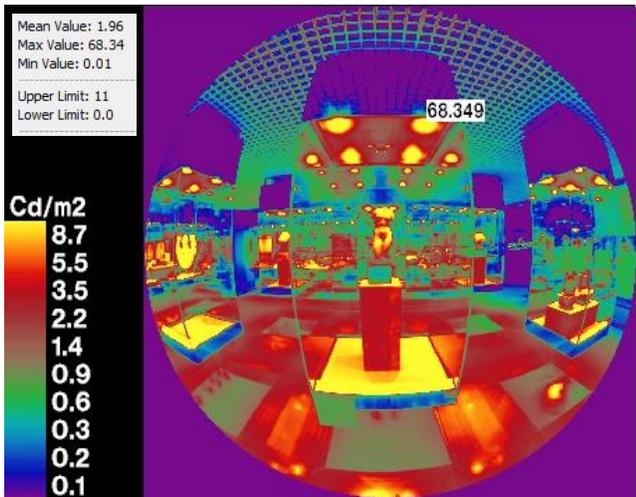


Figura 51. HDR y falso color en punto de medición B-20

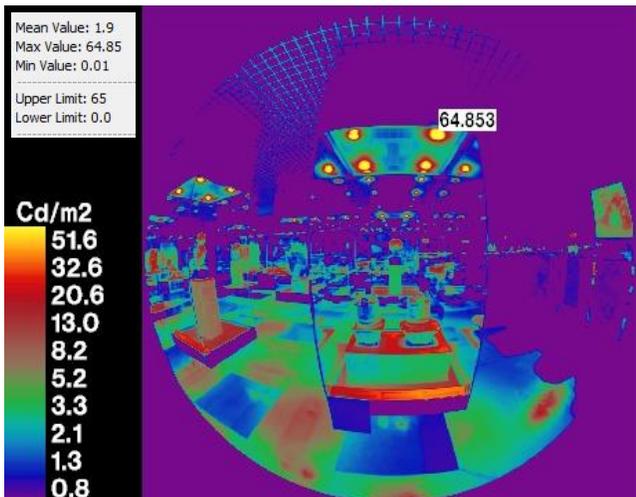


Figura 52. HDR y falso color en punto de medición B-21

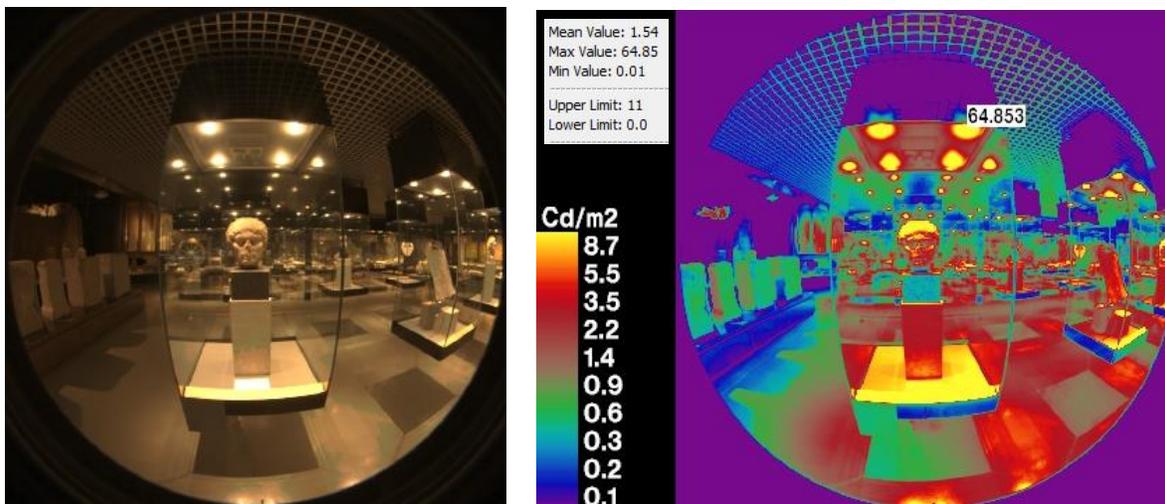


Figura 53. HDR y falso color en punto de medición B-22

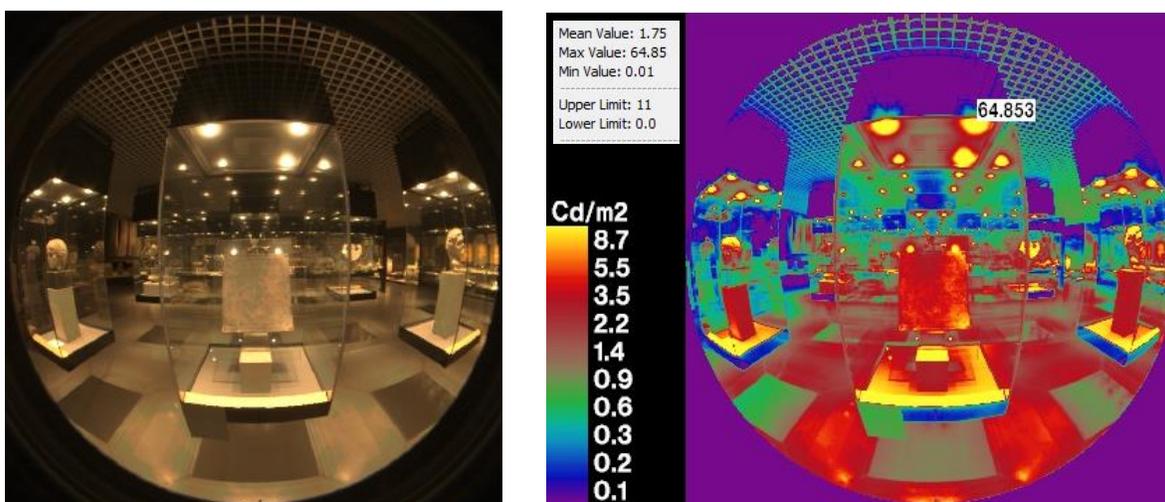


Figura 54. HDR y falso color en punto de medición B-23

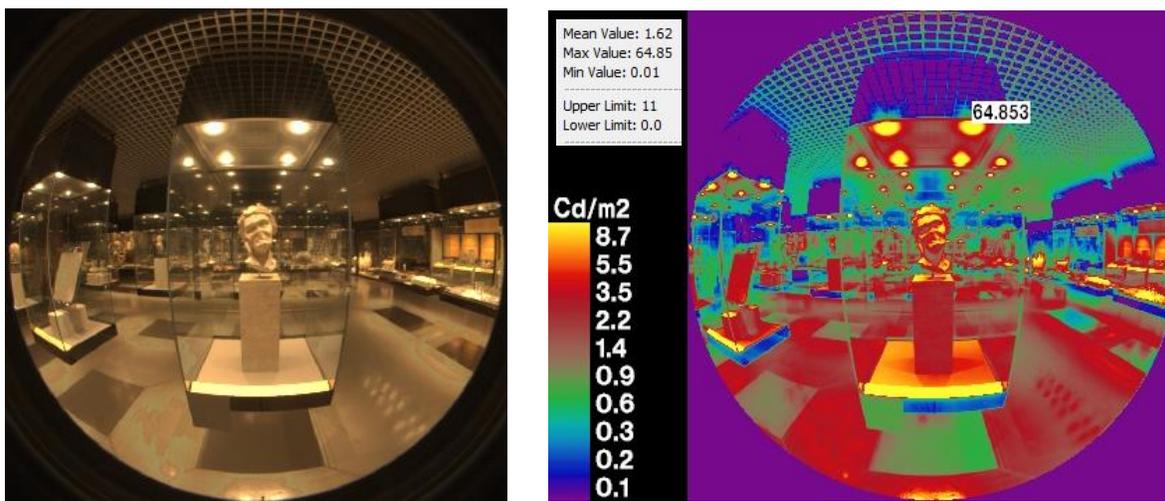


Figura 55. HDR y falso color en punto de medición B-24

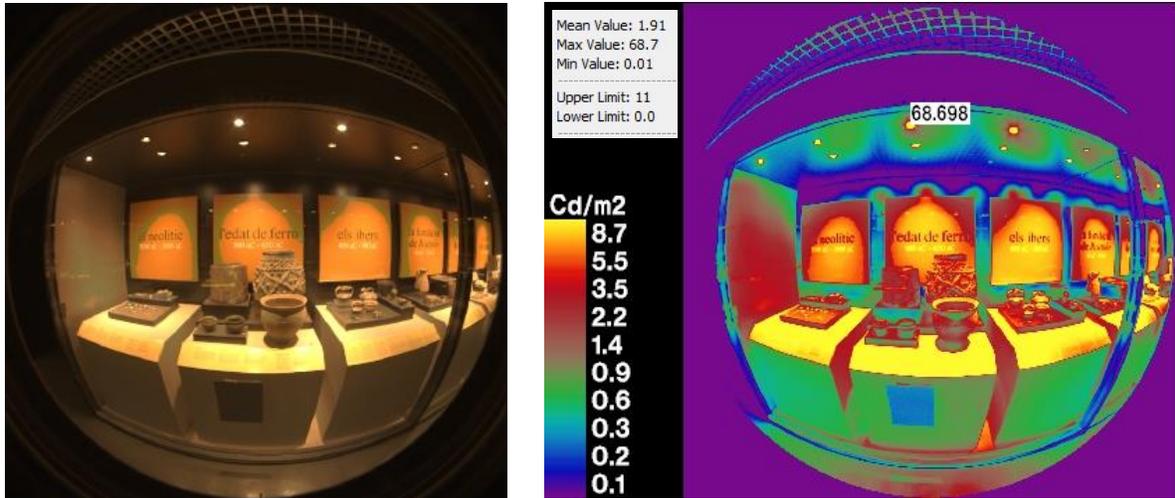


Figura 56. HDR y falso color en punto de medición B-25

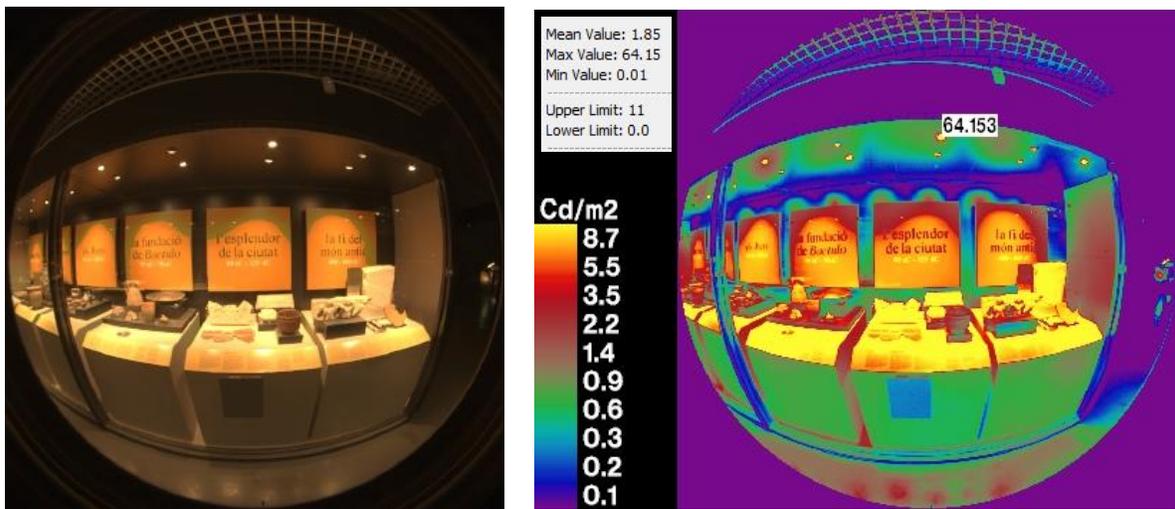


Figura 57. HDR y falso color en punto de medición B-26

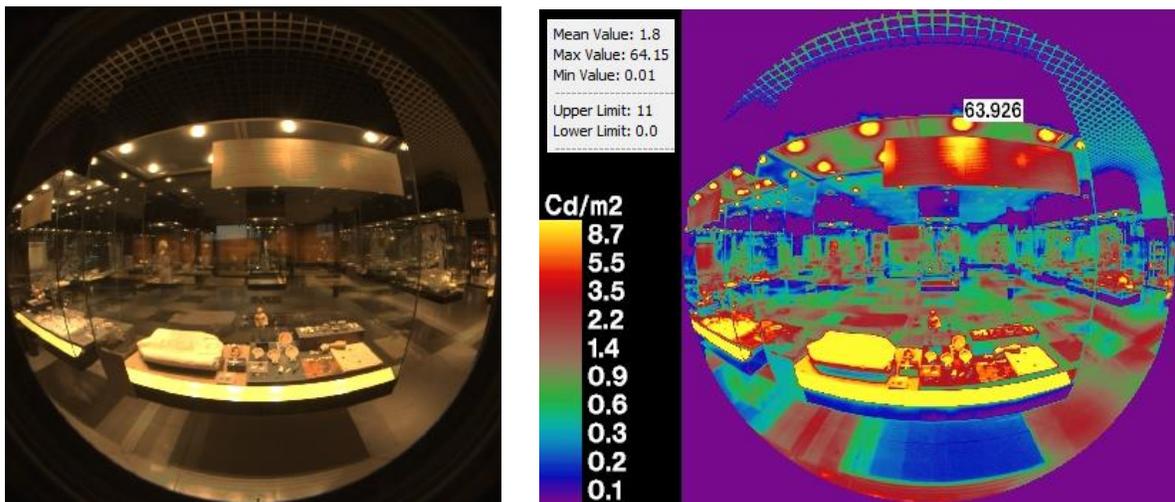


Figura 58. HDR y falso color en punto de medición B-27

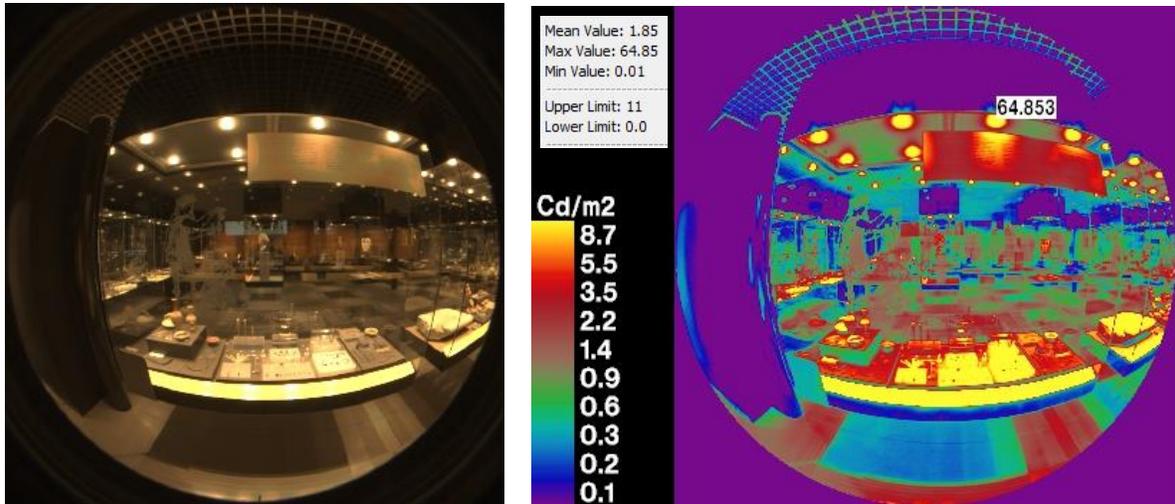


Figura 59. HDR y falso color en punto de medición B-28

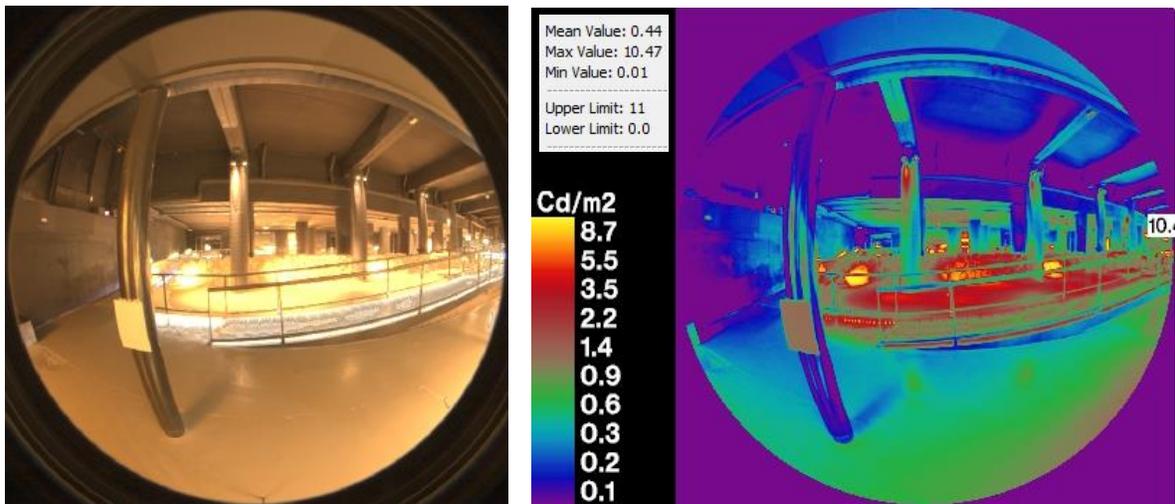


Figura 60. HDR y falso color en punto de medición B-29

BLOQUE C

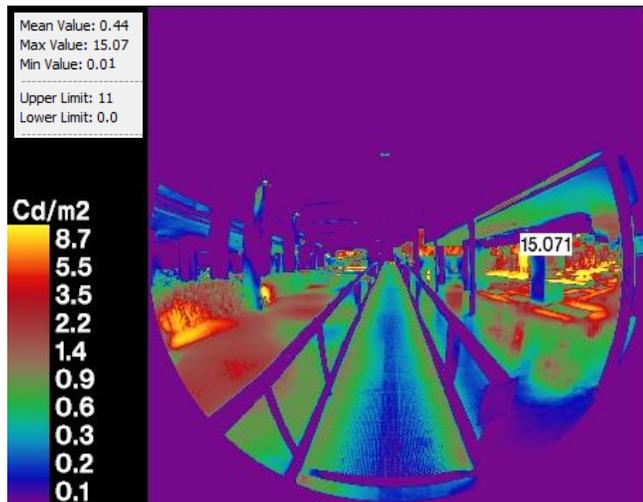


Figura 61. HDR y falso color en punto de medición C-1

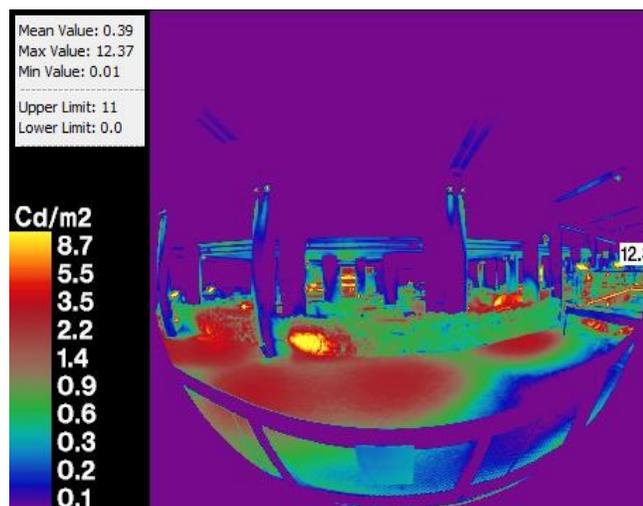


Figura 62. HDR y falso color en punto de medición C-2

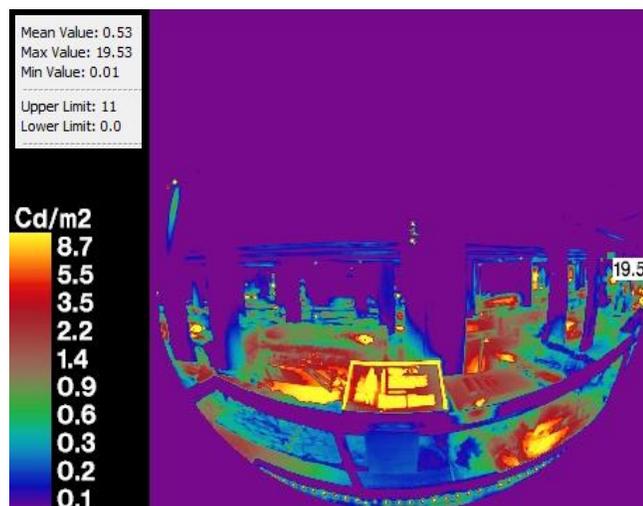


Figura 63. HDR y falso color en punto de medición C-3

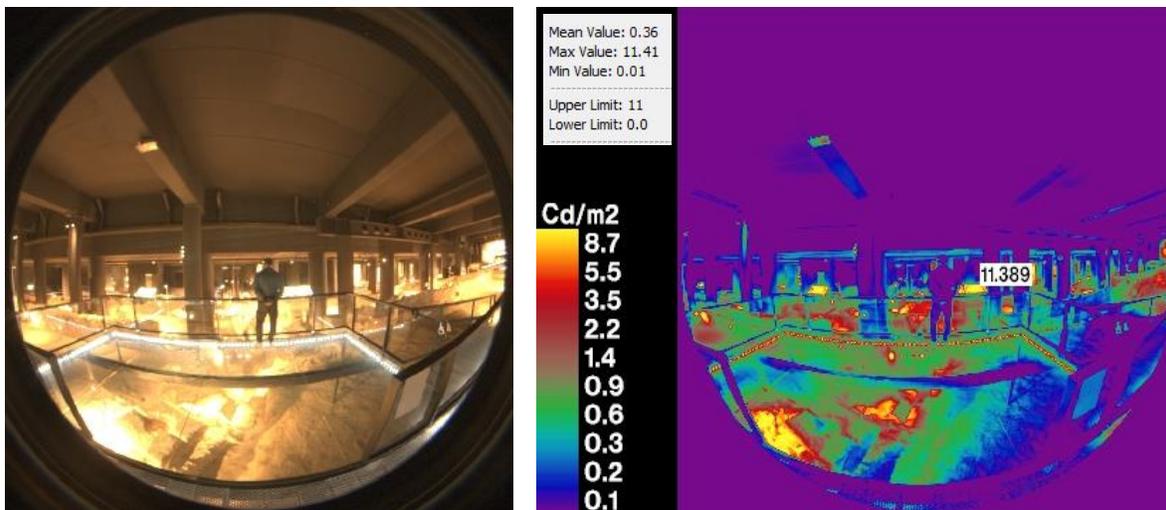


Figura 64. HDR y falso color en punto de medición C-4

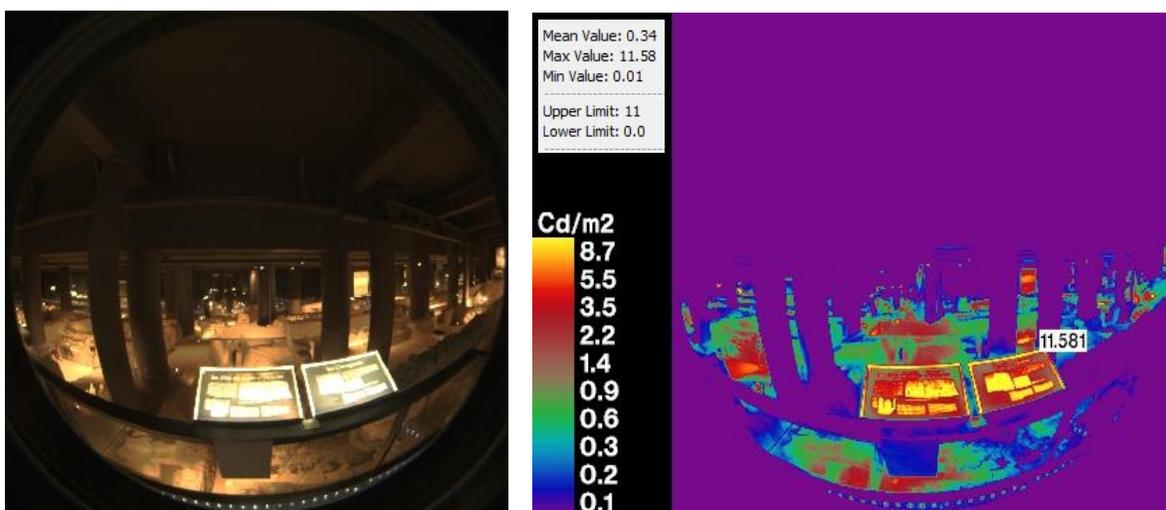


Figura 65. HDR y falso color en punto de medición C-5

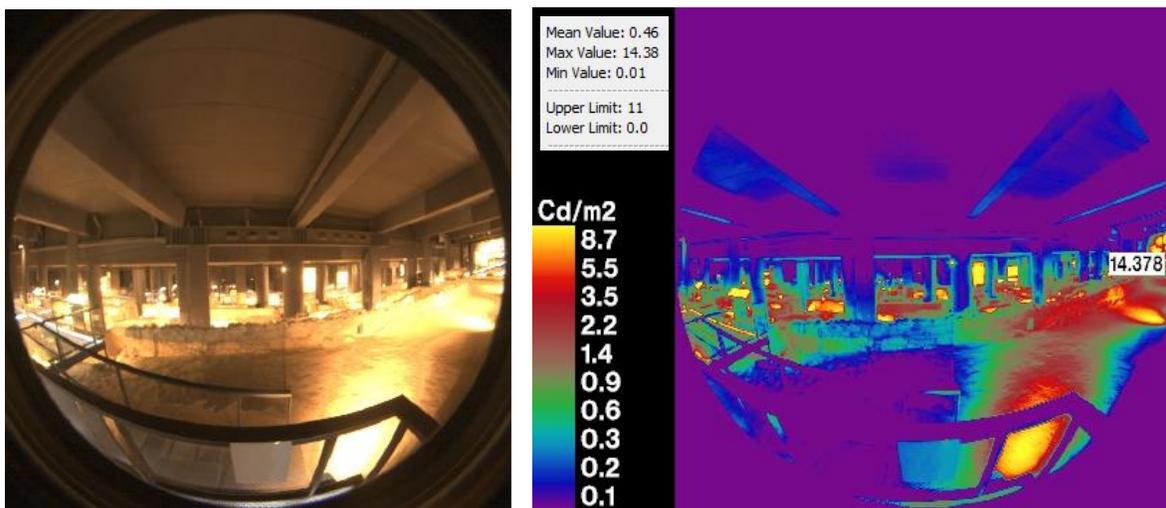


Figura 66. HDR y falso color en punto de medición C-6

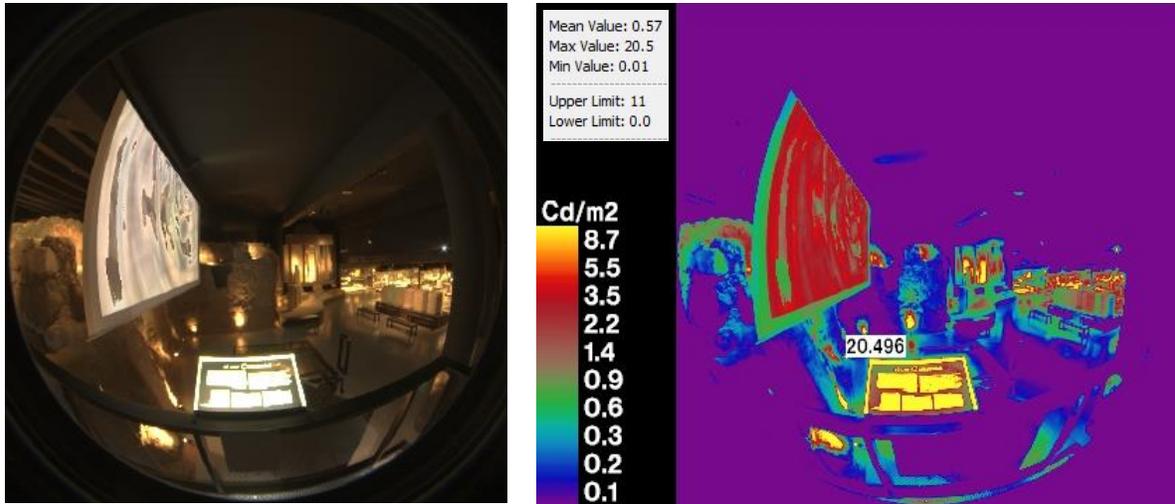


Figura 67. HDR y falso color en punto de medición C-7

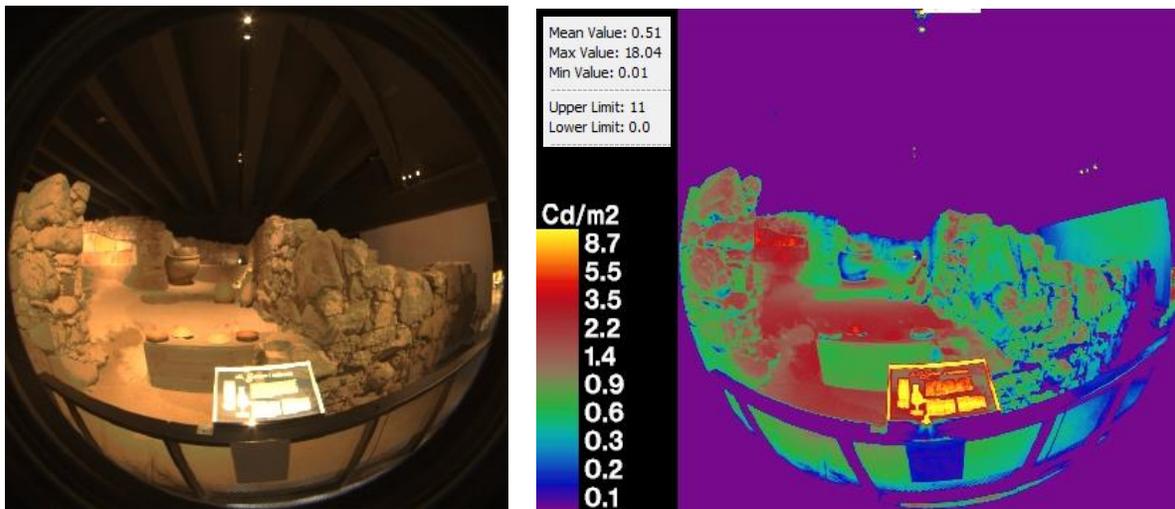


Figura 68. HDR y falso color en punto de medición C-8

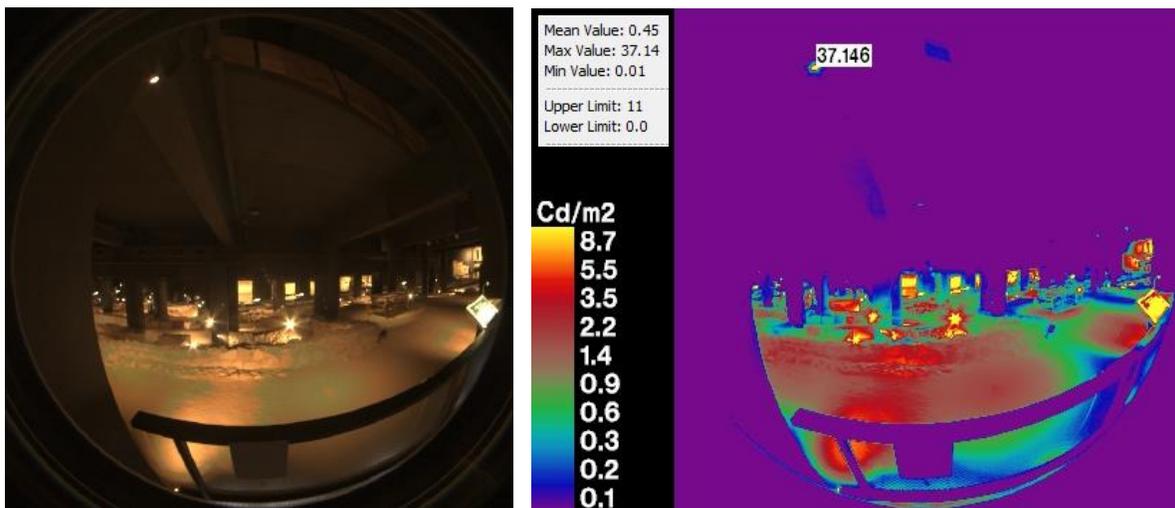


Figura 69. HDR y falso color en punto de medición C-9

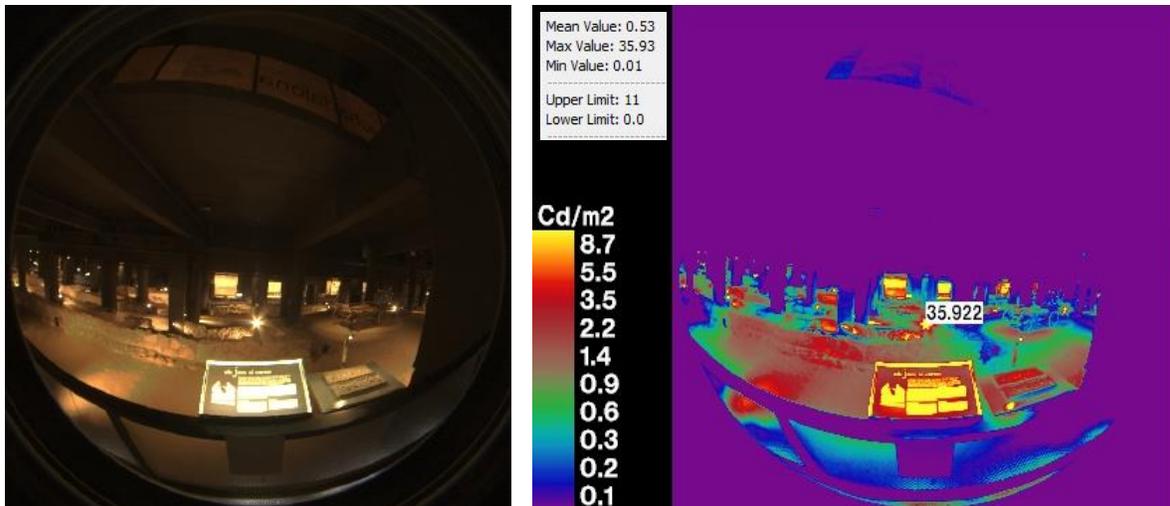


Figura 70. HDR y falso color en punto de medición C-10

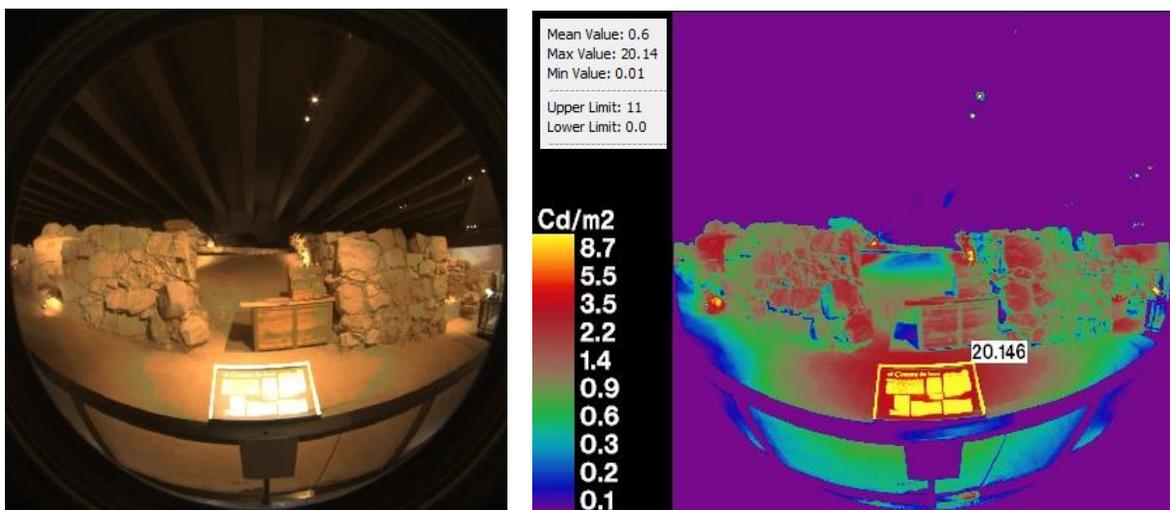


Figura 71. HDR y falso color en punto de medición C-11

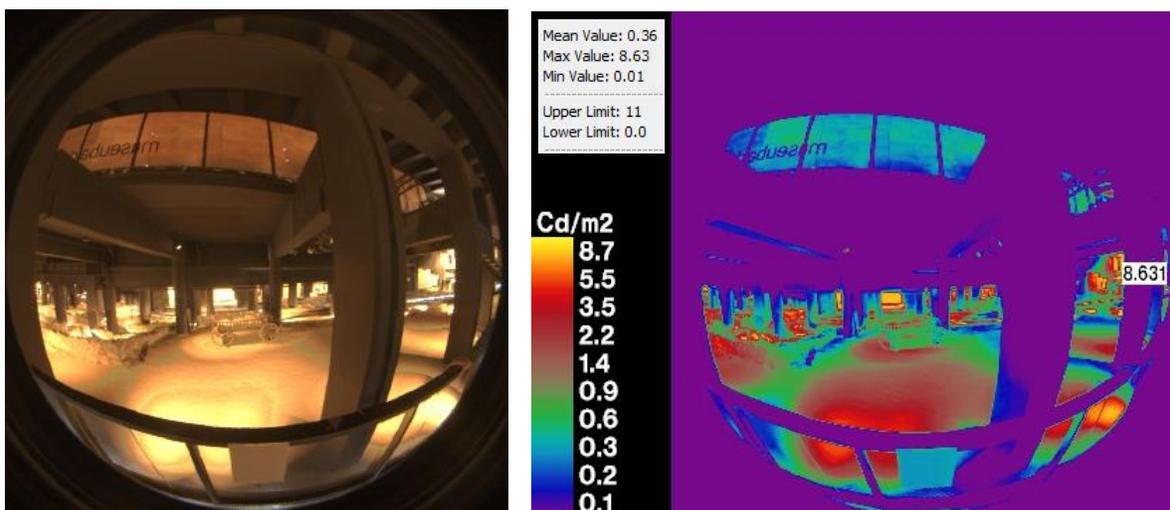


Figura 72. HDR y falso color en punto de medición C-12

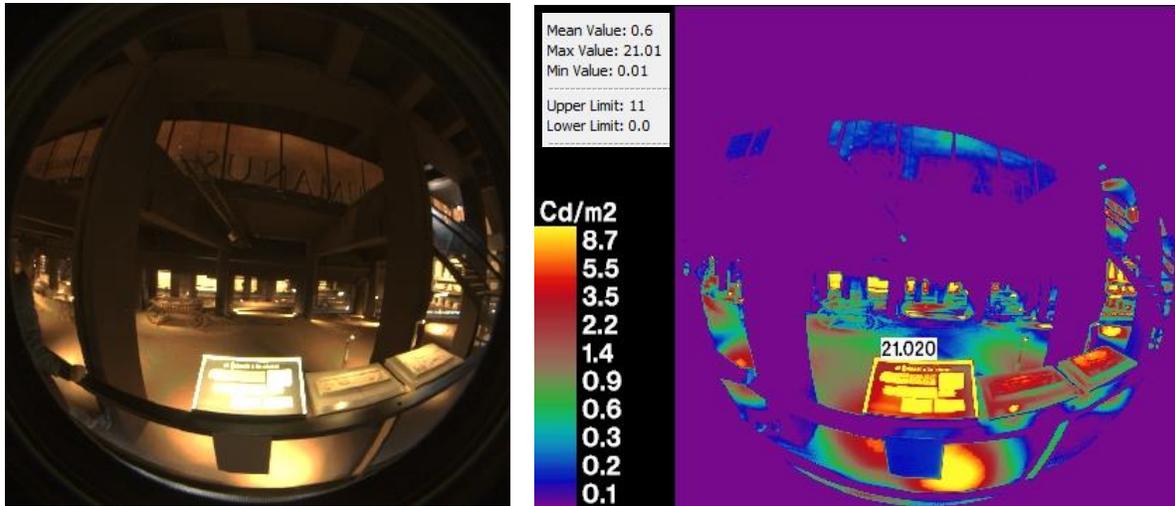


Figura 73. HDR y falso color en punto de medición C-13

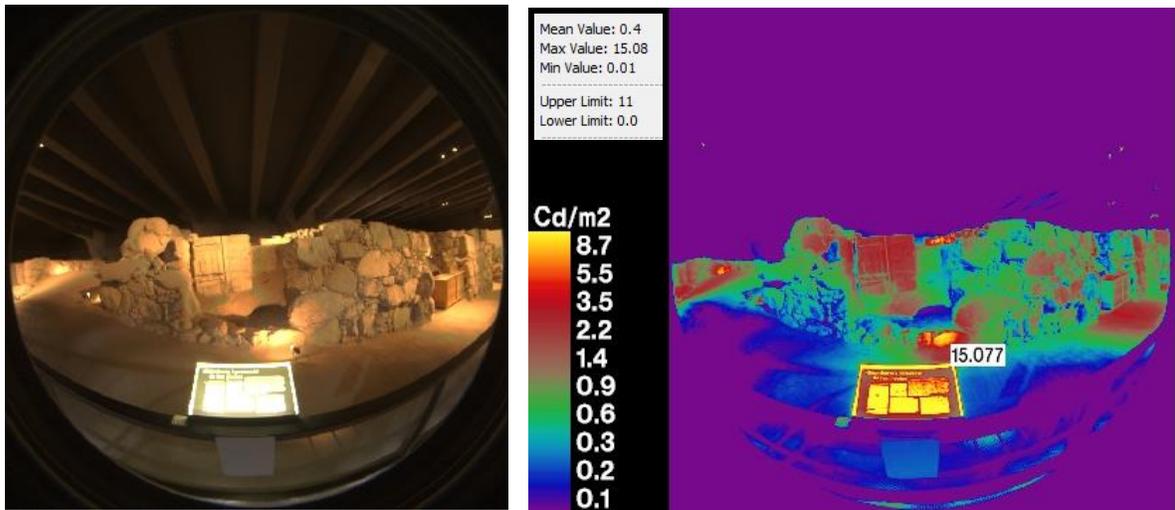


Figura 74. HDR y falso color en punto de medición C-14

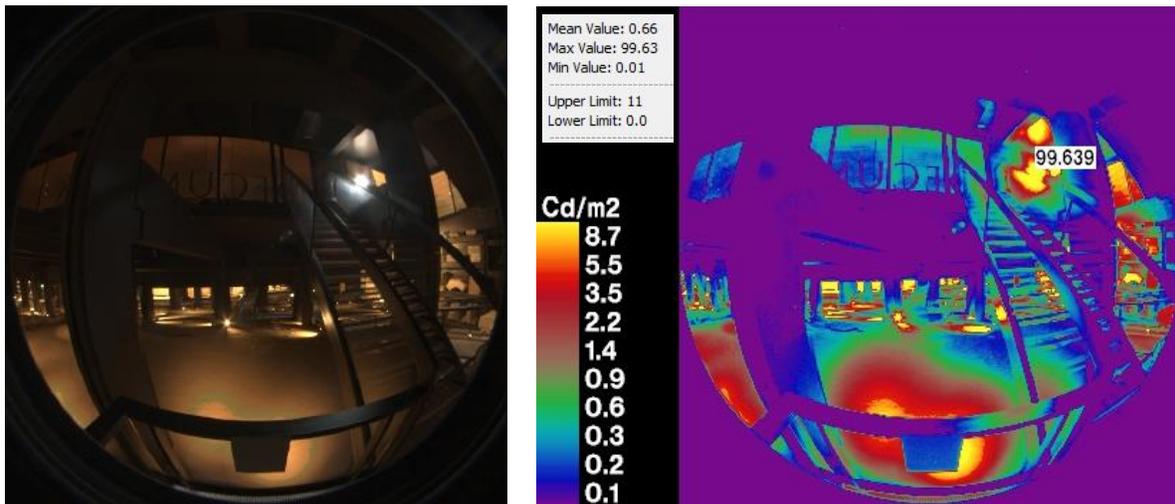


Figura 75. HDR y falso color en punto de medición C-15

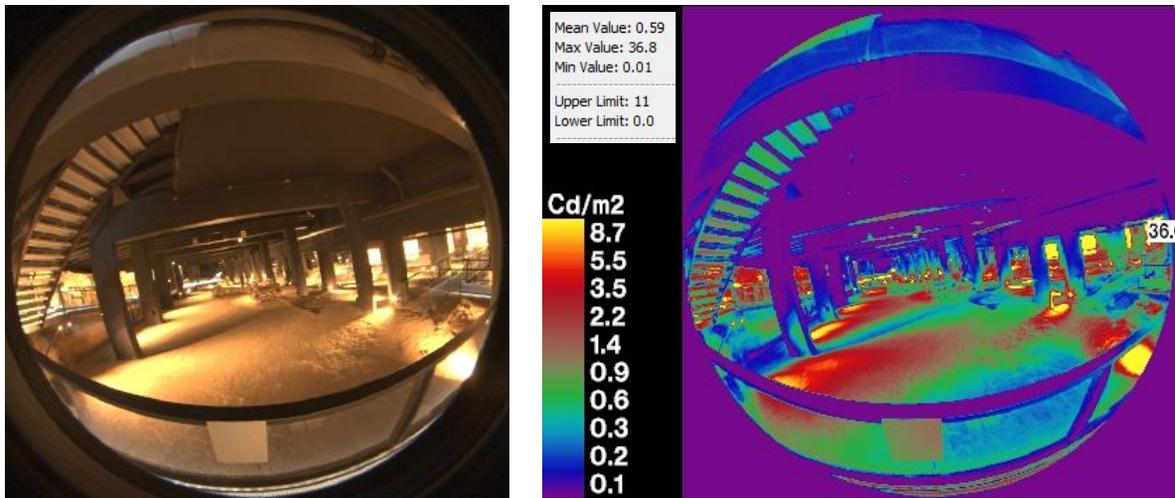


Figura 76. HDR y falso color en punto de medición C-16

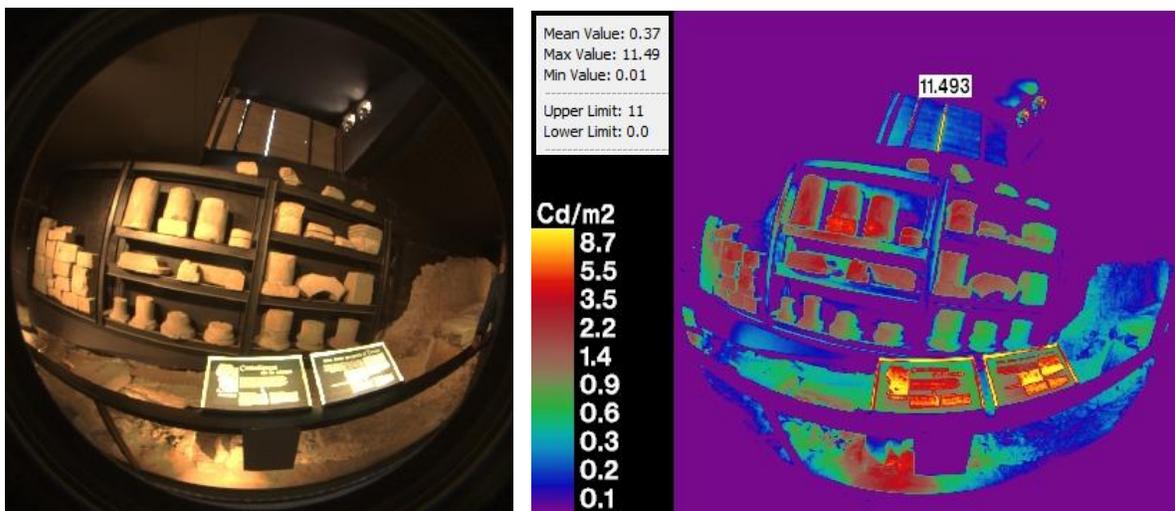


Figura 77. HDR y falso color en punto de medición C-17

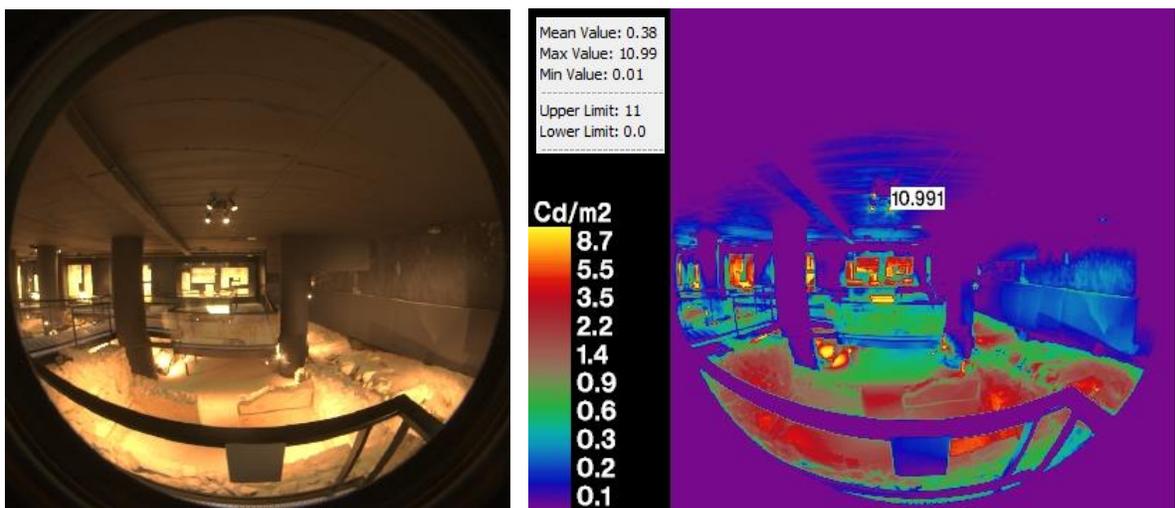


Figura 78. HDR y falso color en punto de medición C-18

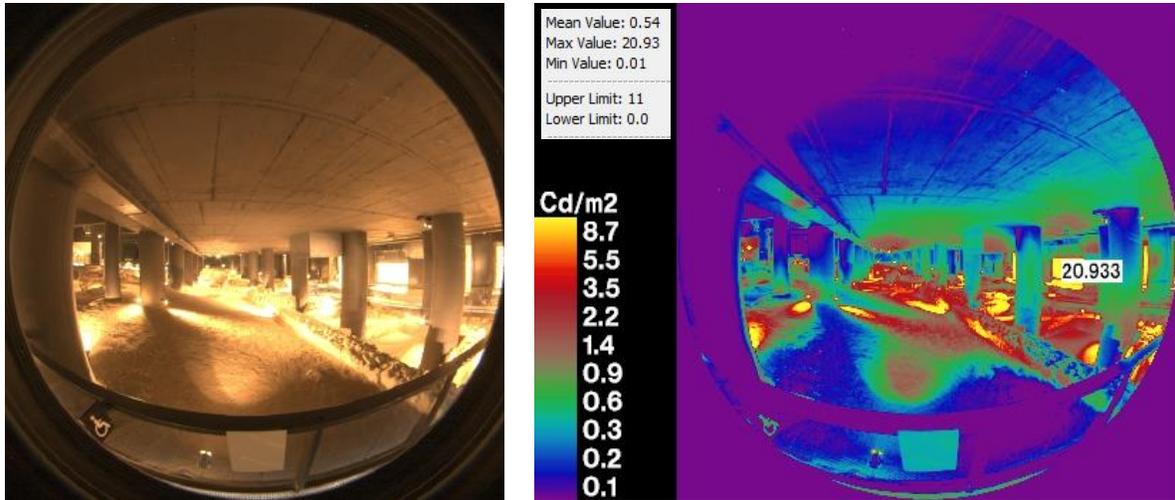


Figura 79. HDR y falso color en punto de medición C-19

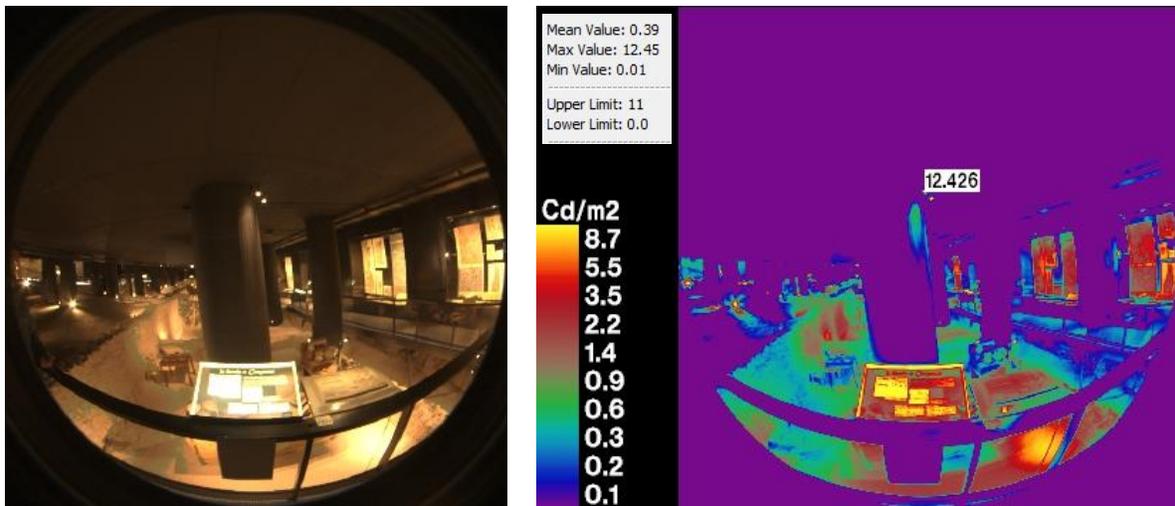


Figura 80. HDR y falso color en punto de medición C-20

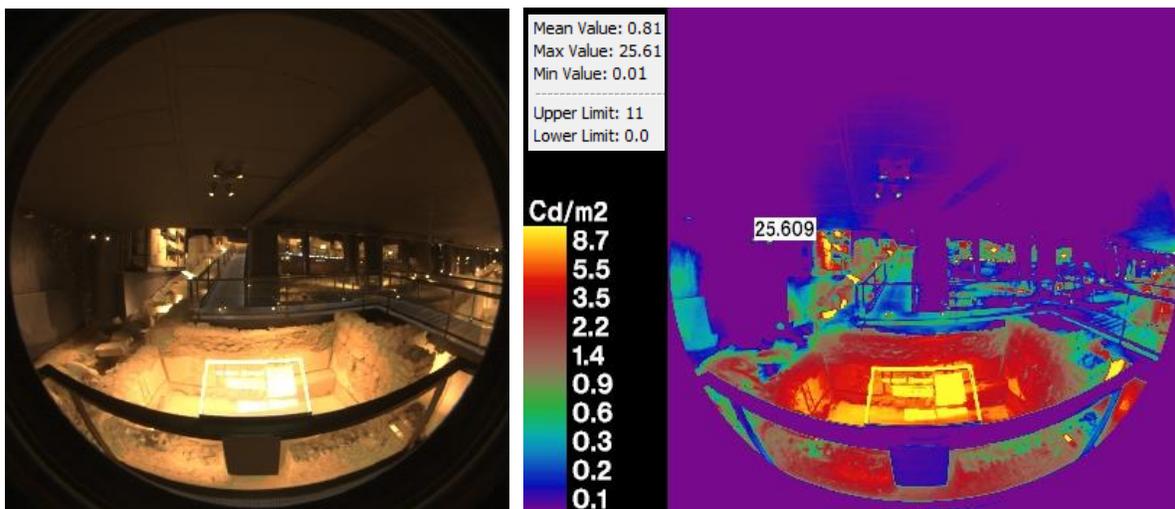


Figura 81. HDR y falso color en punto de medición C-21

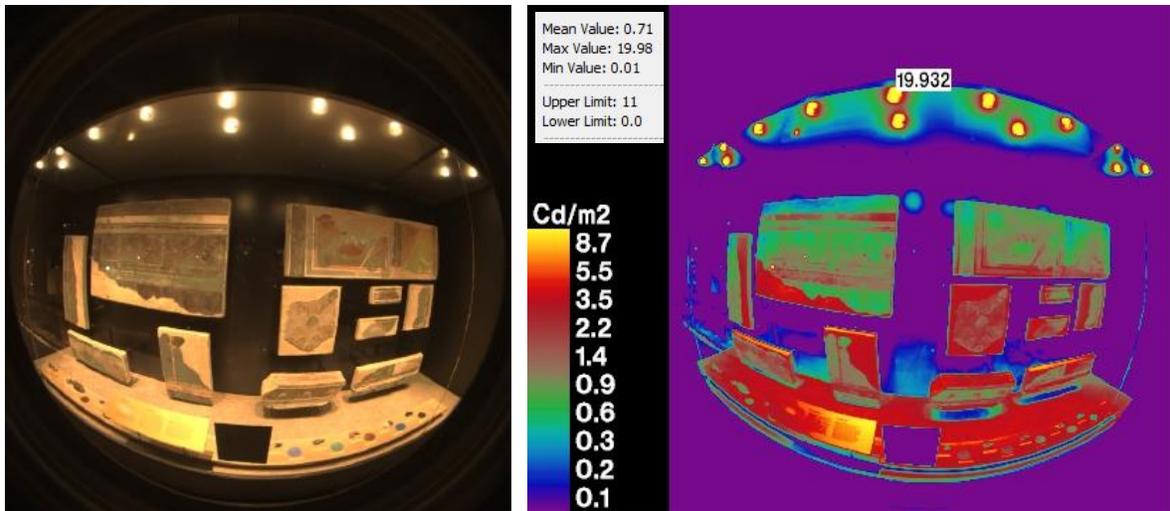


Figura 82. HDR y falso color en punto de medición C-22

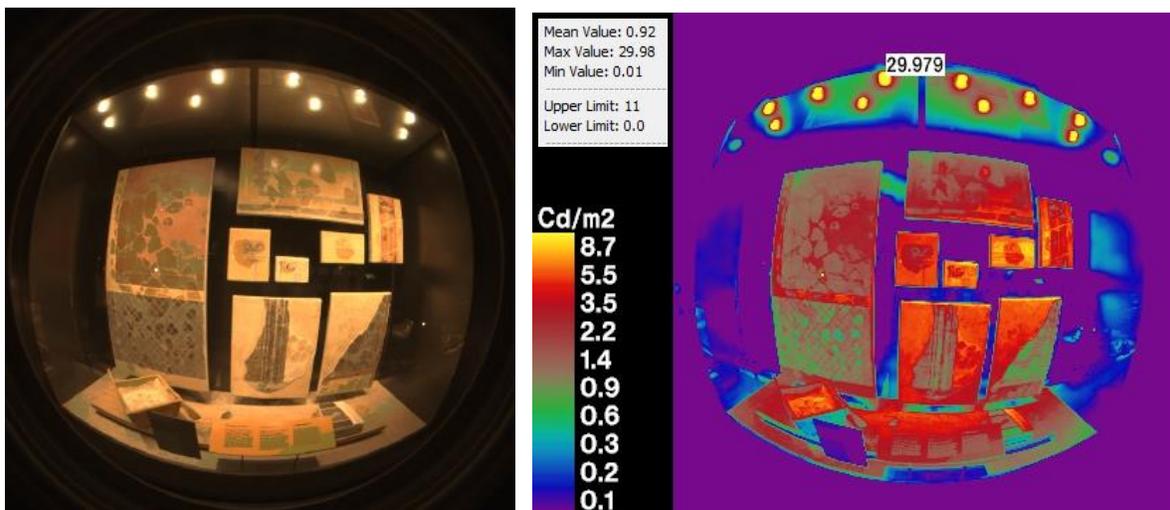


Figura 83. HDR y falso color en punto de medición C-23

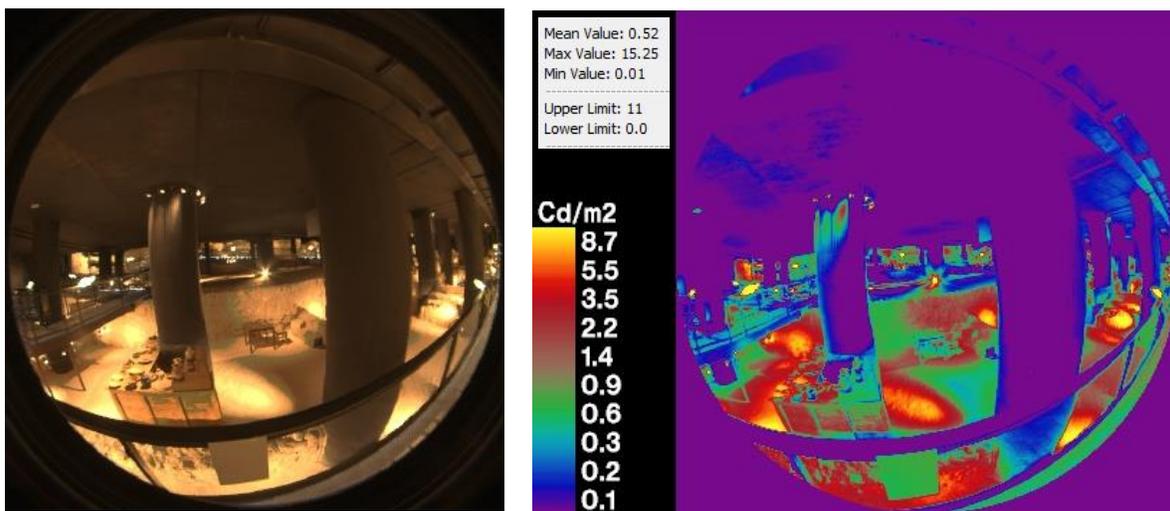


Figura 84. HDR y falso color en punto de medición C-24

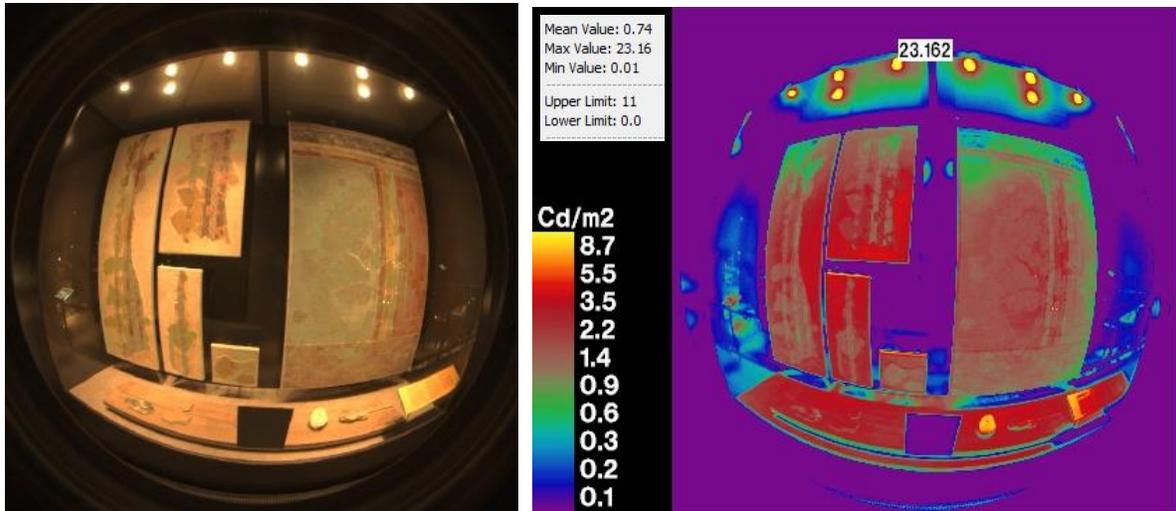


Figura 85. HDR y falso color en punto de medición C-25

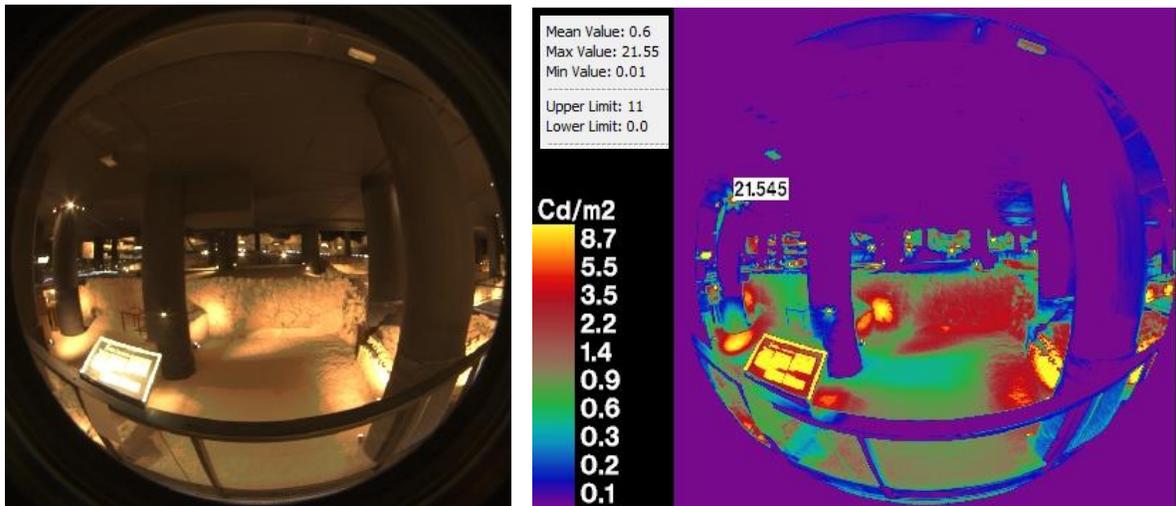


Figura 86. HDR y falso color en punto de medición C-26

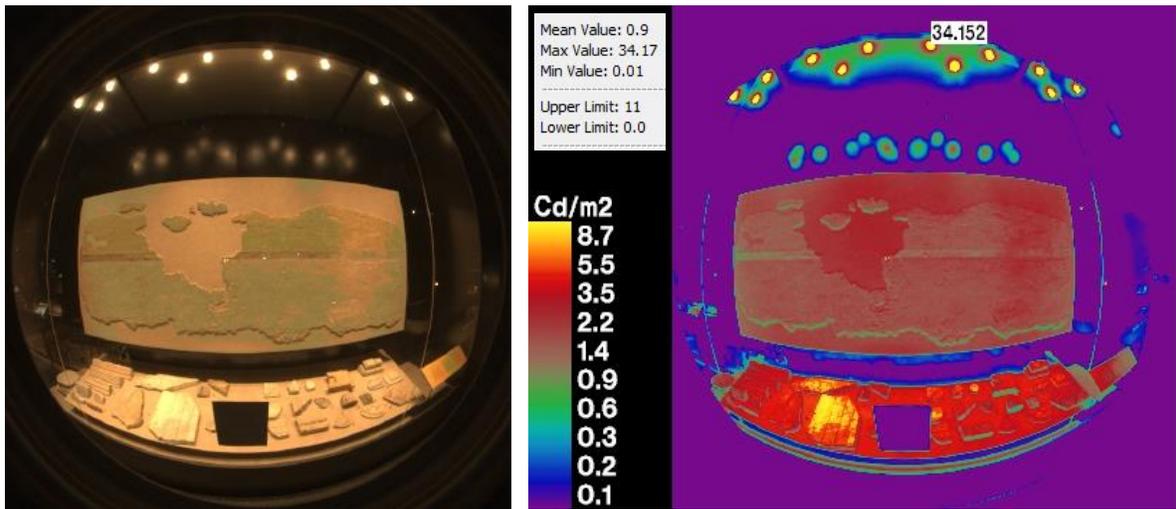


Figura 87. HDR y falso color en punto de medición C-27

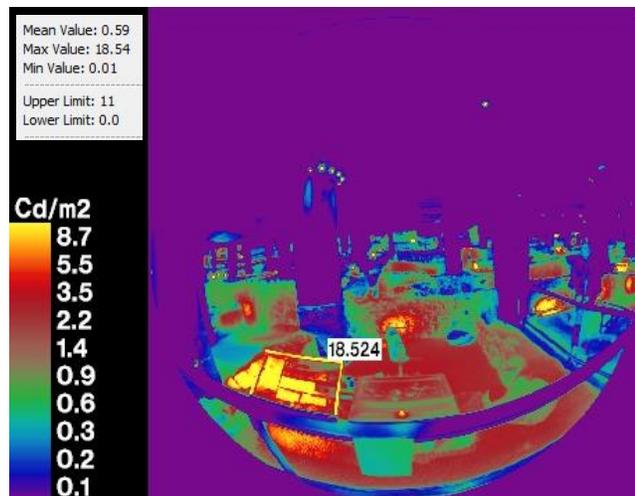


Figura 88. HDR y falso color en punto de medición C-28

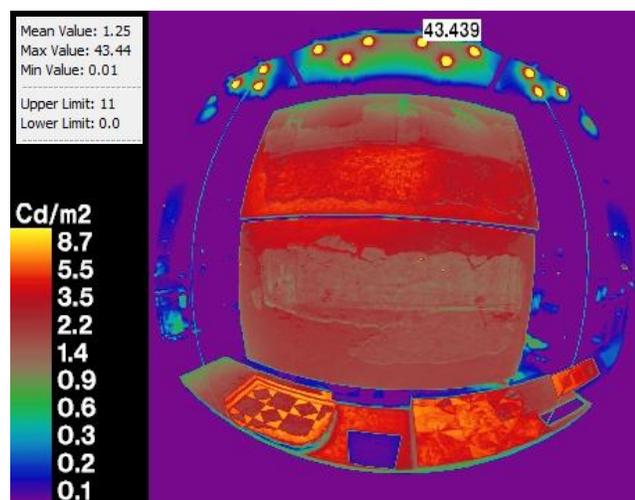
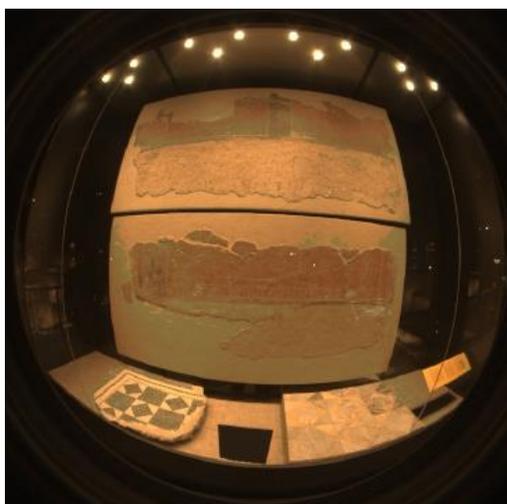


Figura 89. HDR y falso color en punto de medición C-29

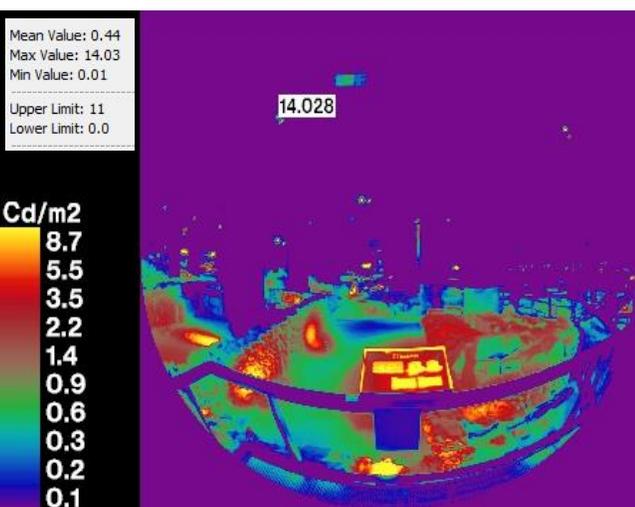


Figura 90. HDR y falso color en punto de medición C-30

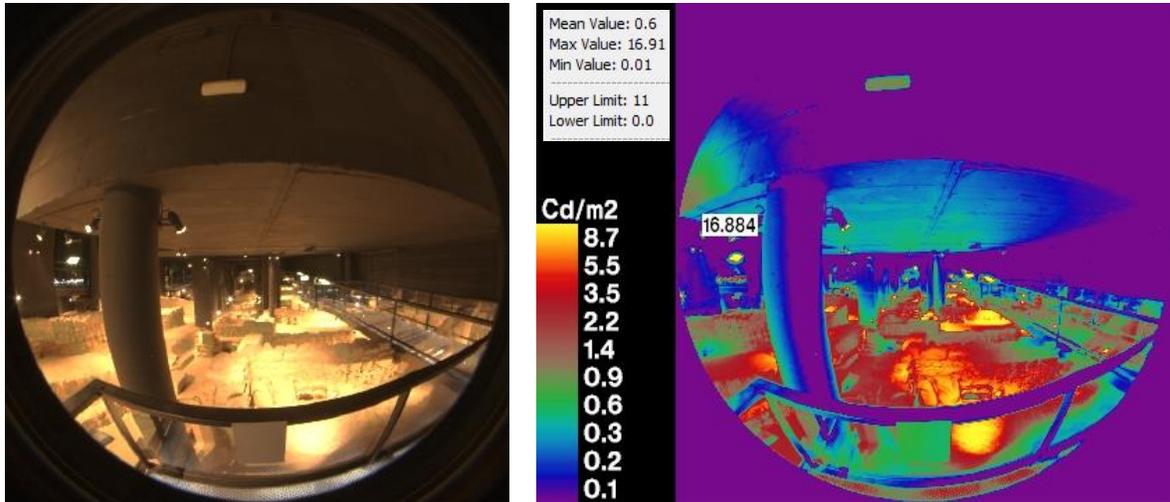


Figura 91. HDR y falso color en punto de medición C-31

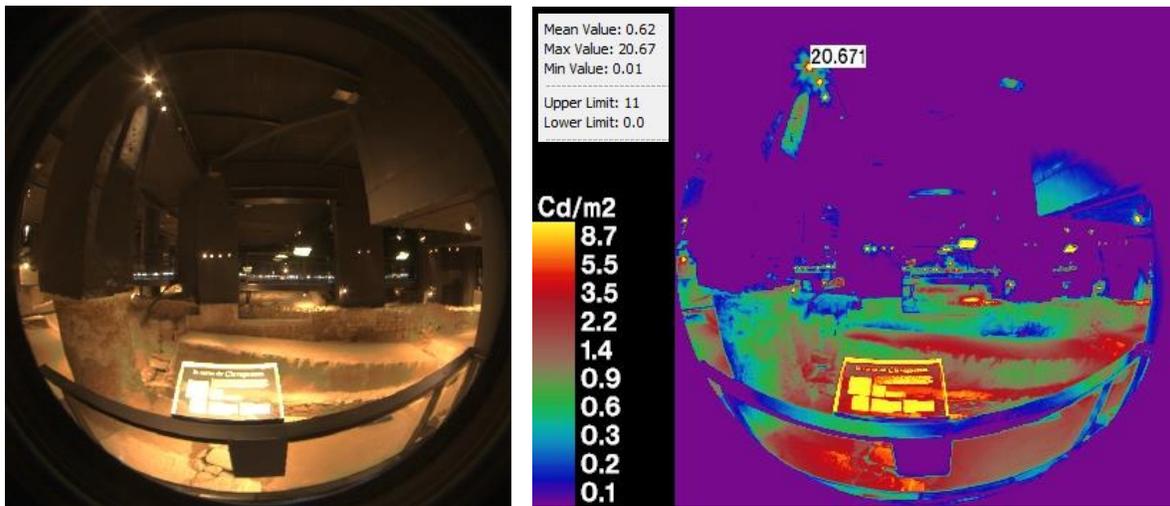


Figura 92. HDR y falso color en punto de medición C-32

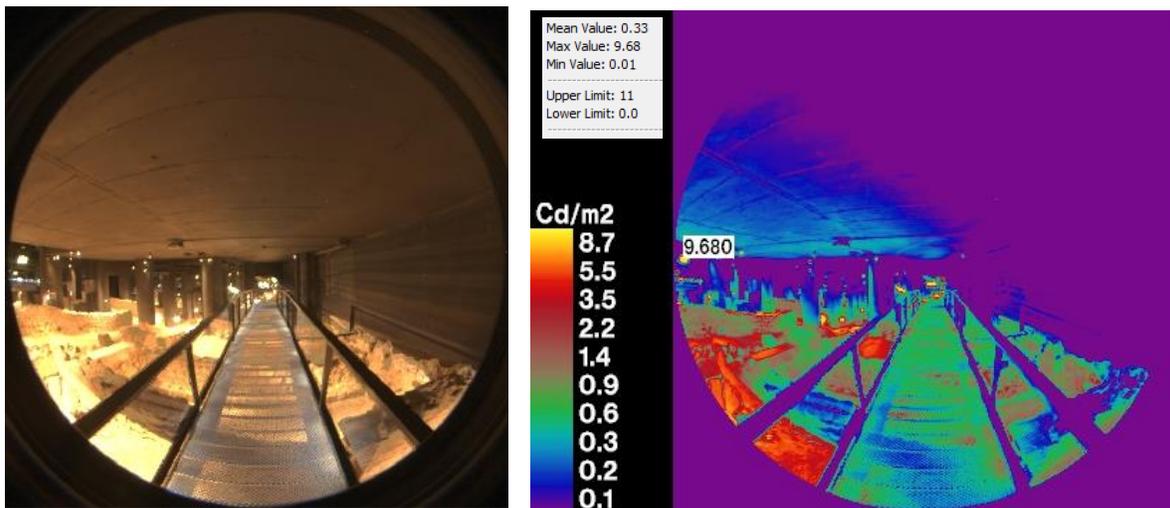


Figura 93. HDR y falso color en punto de medición C-33

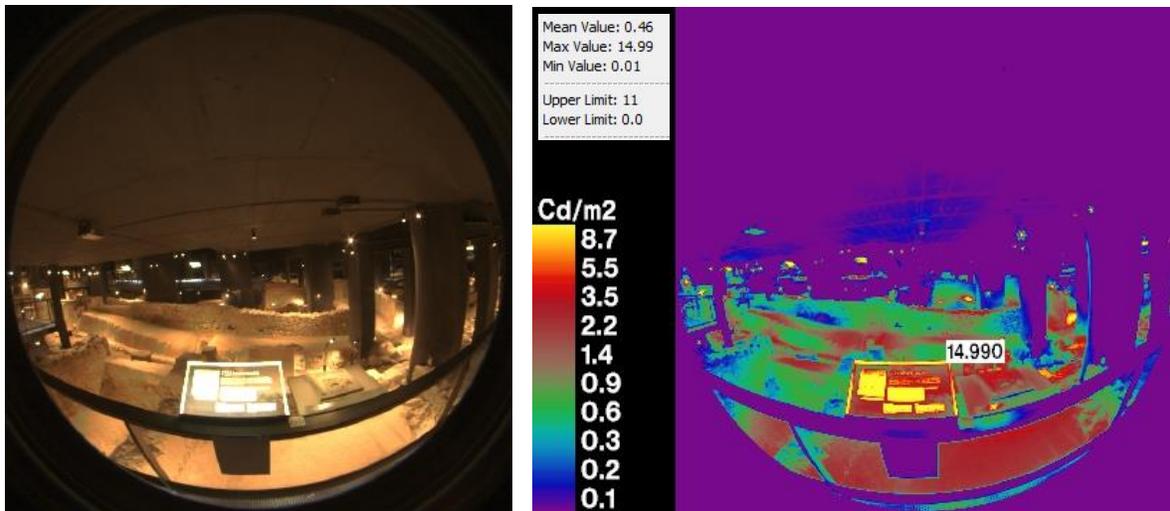


Figura 94. HDR y falso color en punto de medición C-34

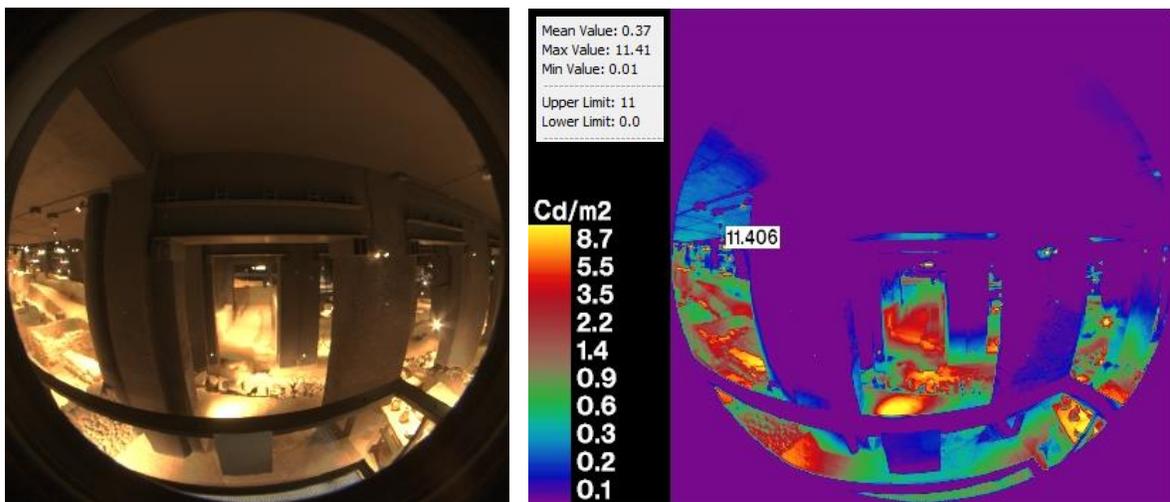


Figura 95. HDR y falso color en punto de medición C-35

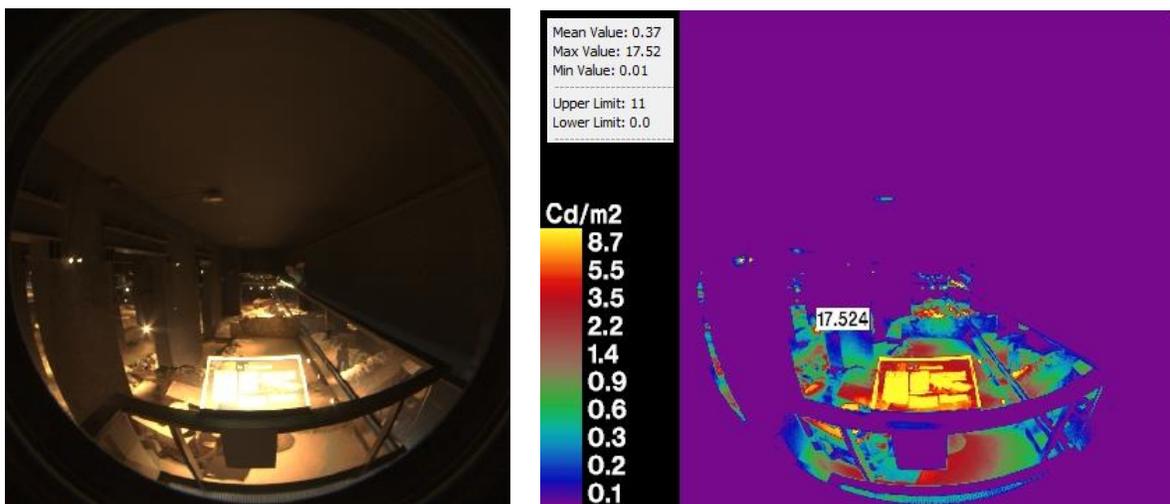


Figura 96. HDR y falso color en punto de medición C-36

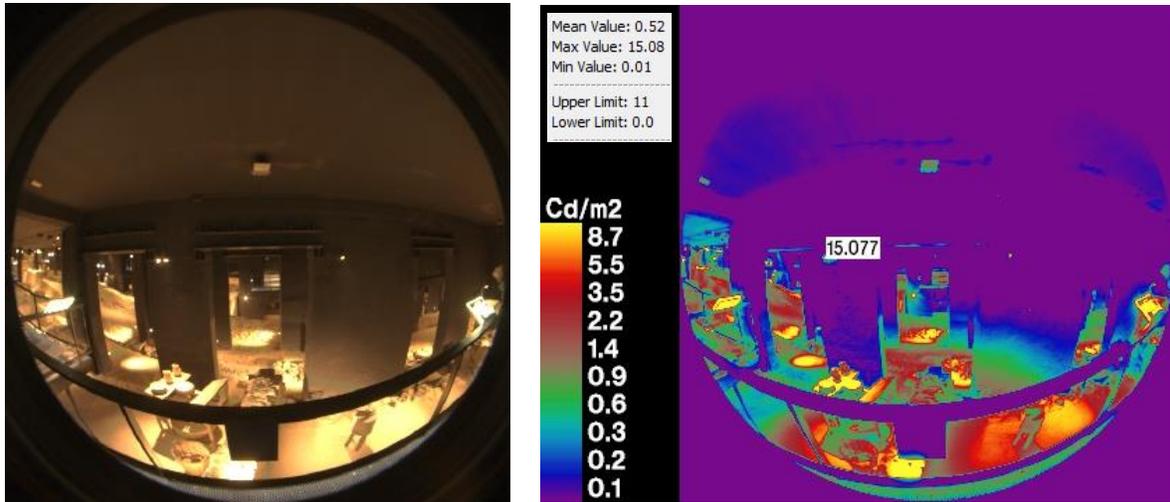


Figura 97. HDR y falso color en punto de medición C-37

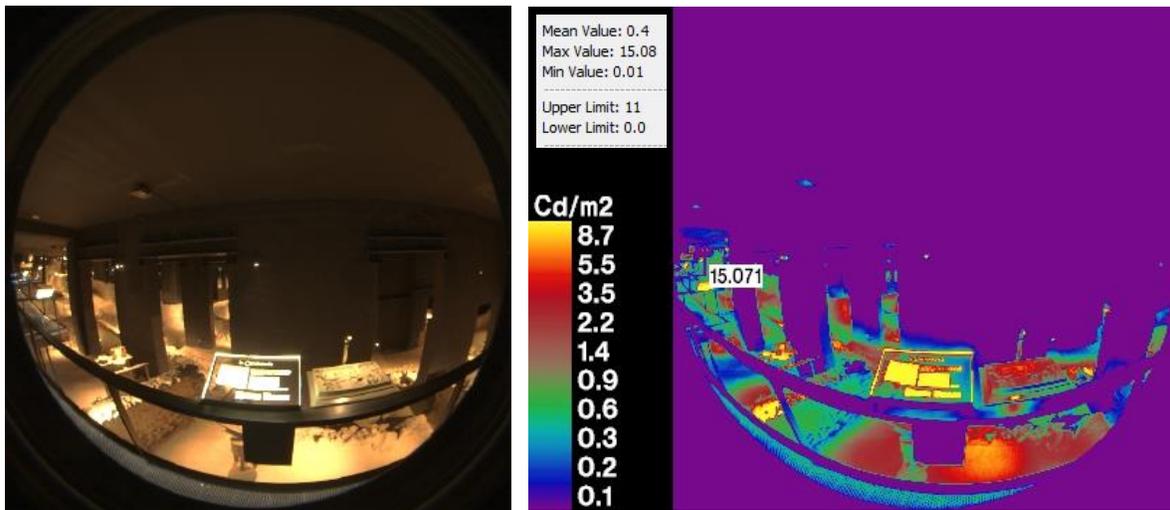


Figura 98. HDR y falso color en punto de medición C-38

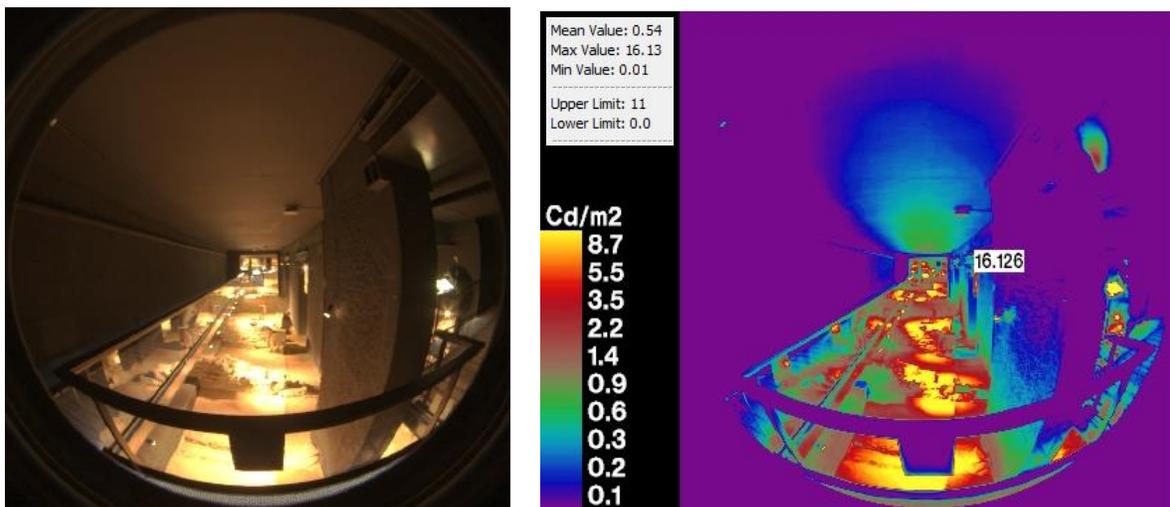


Figura 99. HDR y falso color en punto de medición C-39

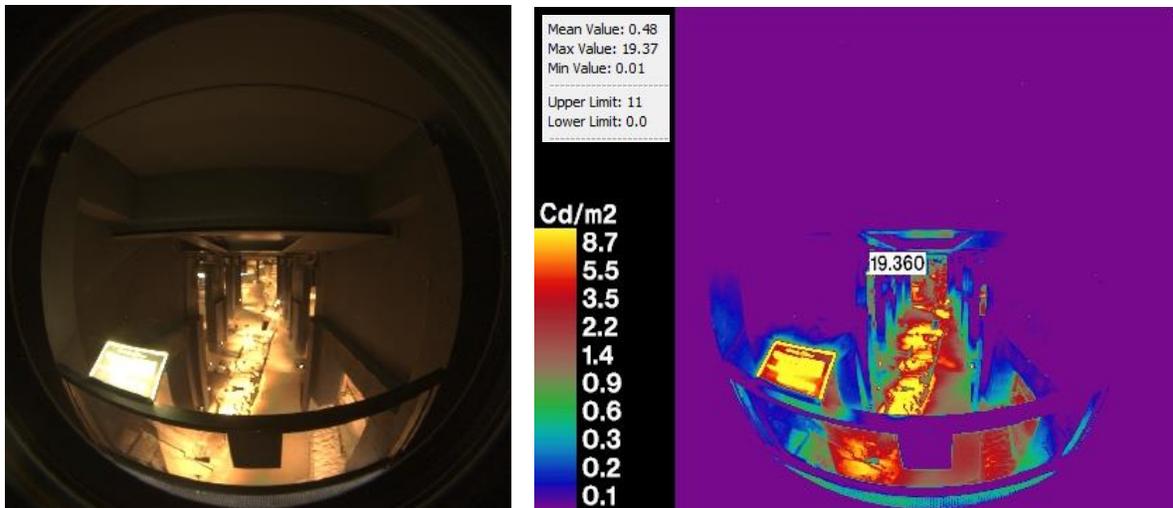


Figura 100. HDR y falso color en punto de medición C-40

La exposición En tiempo real, la colección Rafael Tous de arte conceptual en el MACBA fue estudiada desde el punto de vista lumínico. El presente anexo contiene la información extraída de las mediciones y procesamiento de imágenes con el objetivo de encontrar los valores de luminancia en todas las escenas analizadas. Se determinó seis puntos de medición dentro de la Capella Convent dels Àngels. Las escenas fotografiadas en cada uno de los puntos de medición están orientadas en diferentes direcciones con el fin de abarcar toda las superficies con exhibición. La primera escena se ubica en el eje longitudinal de la capilla ya que permite tener una visión completa de la nave central. De la segunda a la quinta escena observamos las pórticos que sirven de marco a las piezas expuestas. La sexta escena muestra el final de la exposición en el abside de la capilla. Todas las escenas fueron capturadas con tres fotografías que permiten hacer una imagen en HDR y falso color dentro del software de cálculo de luminancias. Los valores de luminancias se encuentran ordenados dentro de la tabla 1.

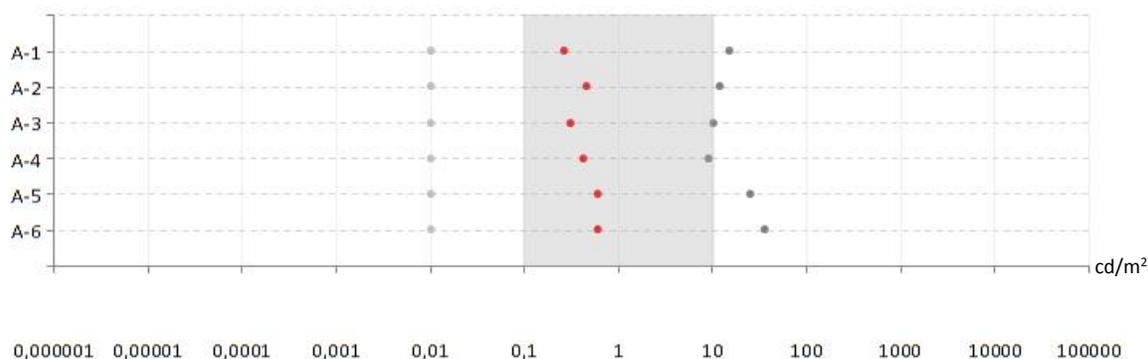


Tabla 1. Valores de luminancia mínimo, medio y máximo en los seis puntos de medición.

La tabla muestra los valores de luminancias mínimo, medio y máximo dentro de la capilla. En el eje de las ordenadas se ubican los seis puntos de medición y en el eje de las abscisas, en escala logarítmica, las luminancias dentro del rango de visión del hombre. Los valores mínimos de luminancias empiezan en $0,01 \text{ cd/m}^2$ debido a que es el valor más bajo registrado por el luminancímetro y el software utilizado. Los valores de luminancia medios se encuentran entre $0,1 \text{ cd/m}^2$ y 1 cd/m^2 . Cabe mencionar que en cada una de las escenas analizadas el rango en el que se encuentra el valor medio de luminancia ocupa más de la mitad del campo visual, lo que constata que el tipo de visión se encuentra dentro de los márgenes de la visión mesópica. Los valores de luminancia máximos están en el rango de 10 cd/m^2 y 100 cd/m^2 . Todos los valores máximos de luminancias corresponden con las luminancias de las fuentes de luz que se aprecian dentro del campo visual. El valor máximo de luminancia, entre todas las escenas estudiadas, es de 36 cd/m^2 que pertenece a la fuente de luz de neón intencionalmente expuesta a la vista.

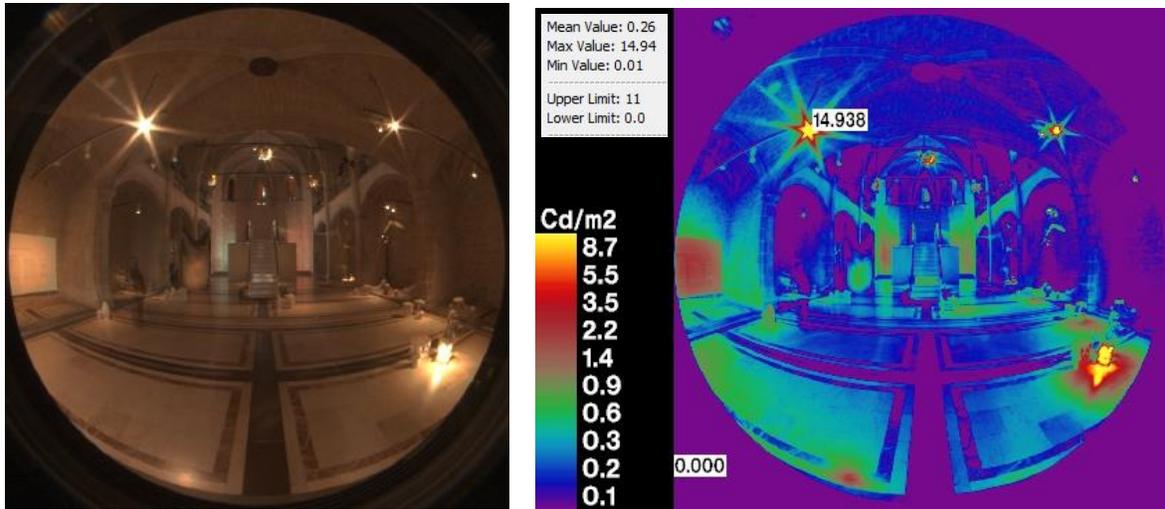


Figura 01. HDR y falso color en punto de medición 1

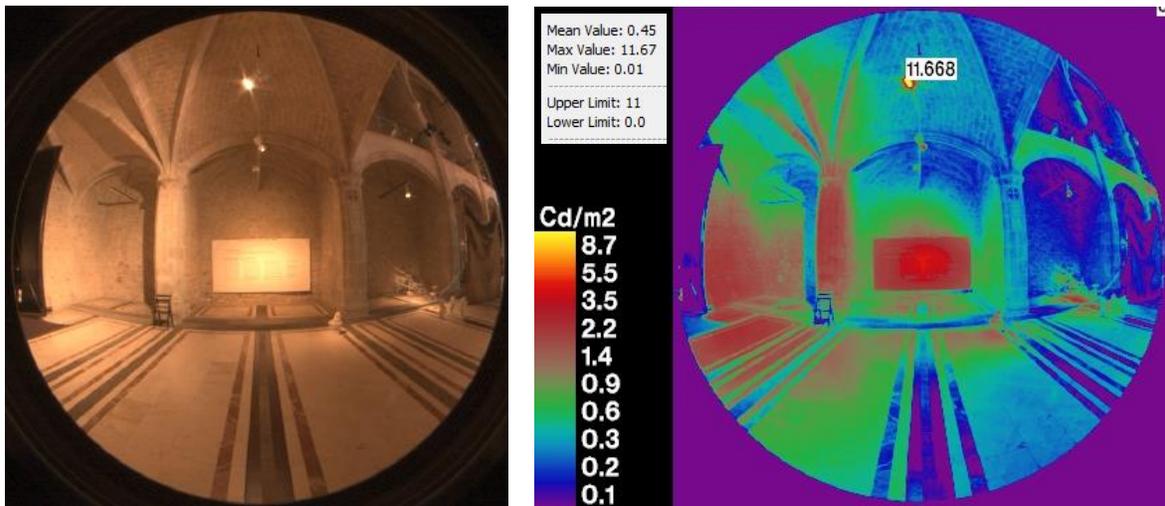


Figura 02. HDR y falso color en punto de medición 2

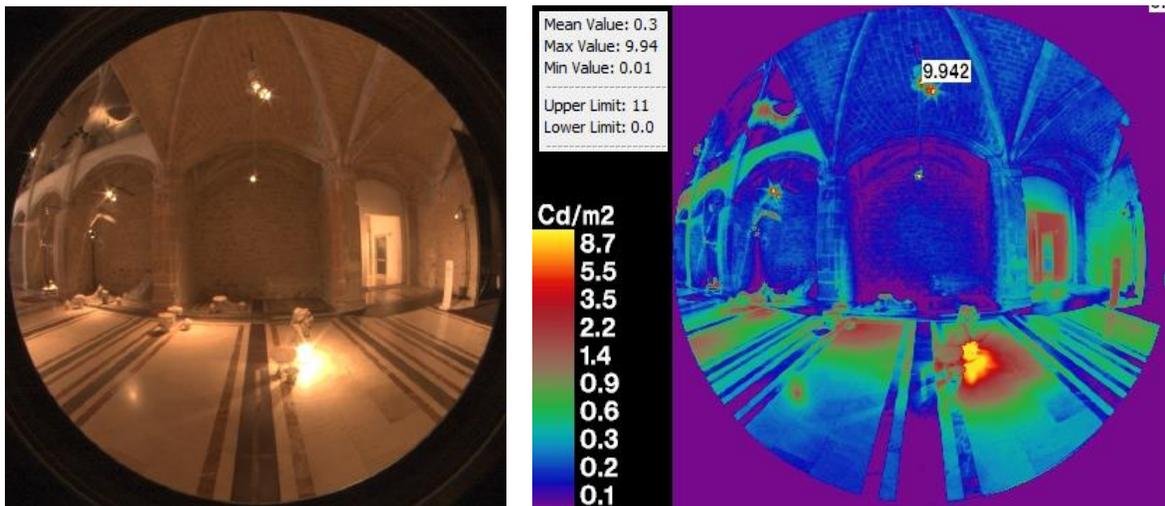


Figura 03. HDR y falso color en punto de medición 3

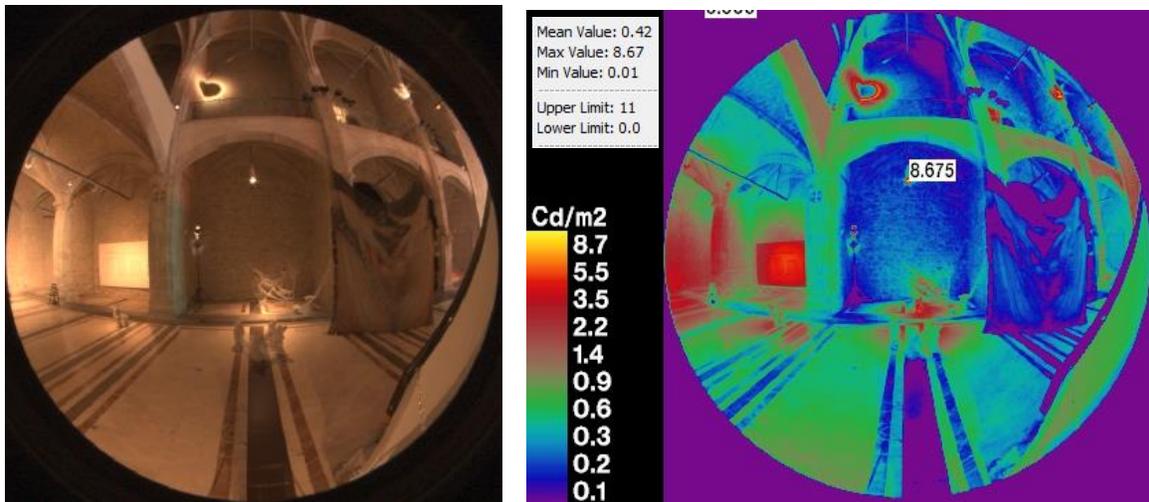


Figura 04. HDR y falso color en punto de medición 4

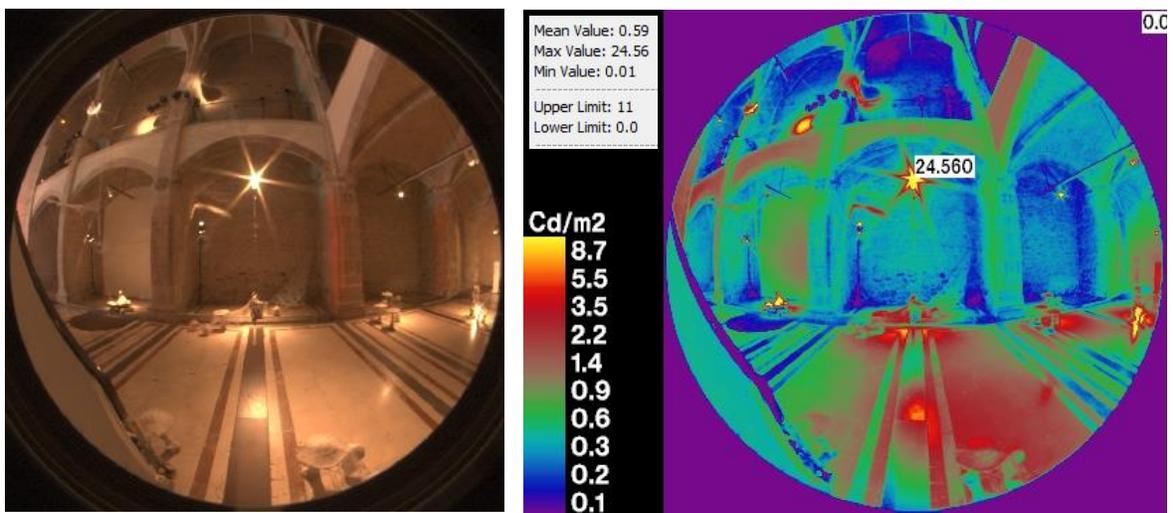


Figura 05. HDR y falso color en punto de medición 5

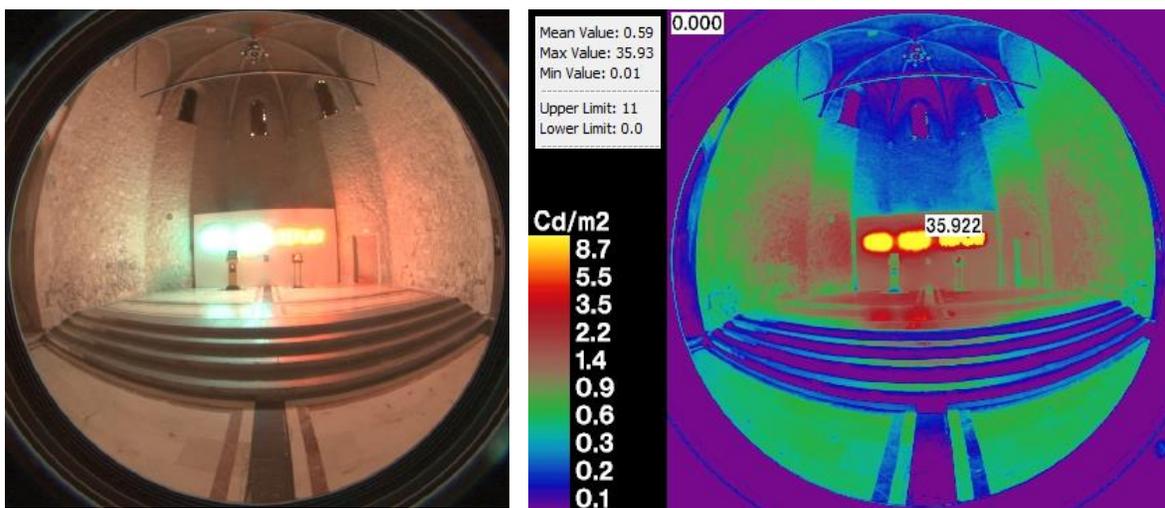


Figura 06. HDR y falso color en punto de medición 6

En el Restaurante-bar Feroz se realizó una campaña de mediciones de luz que incluyó las medidas de luminancia. El estudio empezó por definir los diez puntos de medición en donde se tomaron una serie de fotos para capturar la escena lumínica. Las dos primeras escenas corresponden con el pasadizo de ingreso al local comercial que conduce hacia dos salas separadas. De la escena número tres a la siete observamos la sala más grande que incluye varias zonas de comedor y dos barras de bar. La sala más pequeña que tiene una barra de bar y dos zonas de comedor se aprecian de la escena ocho a la diez. Las diez escenas fueron sometidas a un software de cálculo de luminancias que requiere de un punto de medición real en cada una de las escenas. Una vez procesadas las fotografías se consiguieron las imágenes en HDR y falso color. Las imágenes en falso color permiten aproximarnos por el color de cada superficie al valor de luminancia referenciado a una escala logarítmica entre 0 cd/m^2 y 11 cd/m^2 . Además se obtuvo el valor de las luminancias mínimas, medias y máximas que se observan en la siguiente tabla.

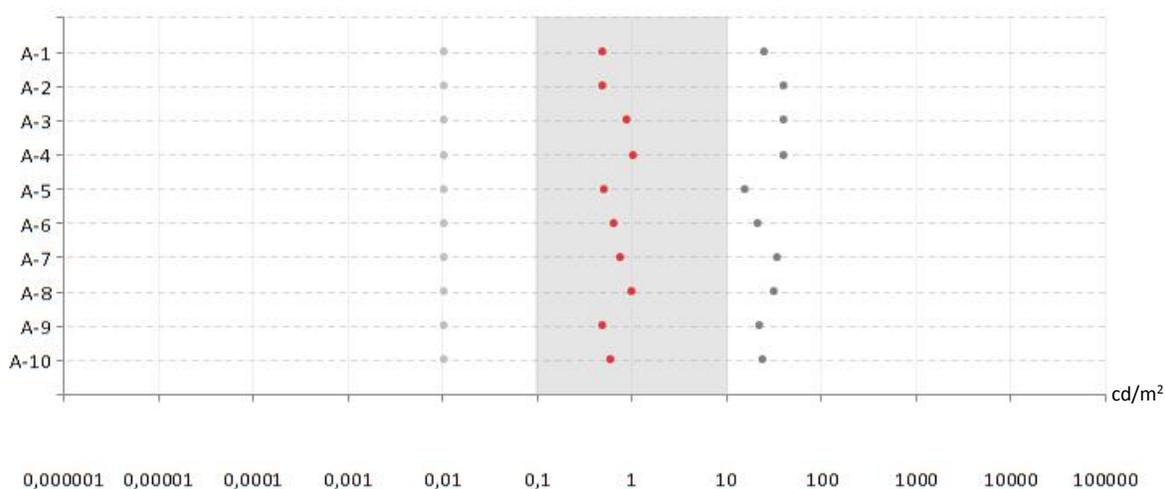


Tabla 1. Valores de luminancia mínimo, medio y máximo en los seis puntos de medición.

En la tabla 1 observamos que las diez escenas están ordenadas en el eje vertical y el rango de luminancias están en el eje horizontal. Los valores de luminancia mínimo en todas las escenas se encuentran en $0,01 \text{ cd/m}^2$ ya que es el valor mínimo de precisión de las herramientas y software utilizados. Los valores medios de luminancia, en color rojo, se encuentran en el margen de la visión mesópica. Los valores máximos de luminancia, que provienen de las luminancias, oscilan entre 15 cd/m^2 y 40 cd/m^2 . Es importante destacar que las imágenes en falso color muestran que más del 50% de cada escena analizada se encuentra por debajo de 1 cd/m^2 , las superficies que sobrepasan este valor corresponde a las mesas de comedor, las barras de bar y las luminarias.

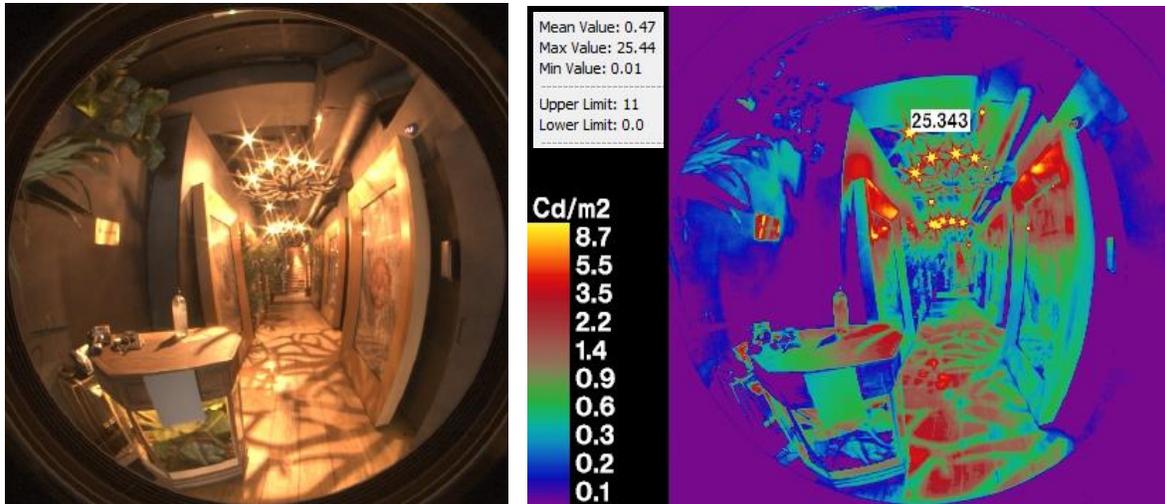


Figura 01. HDR y falso color en punto de medición 1

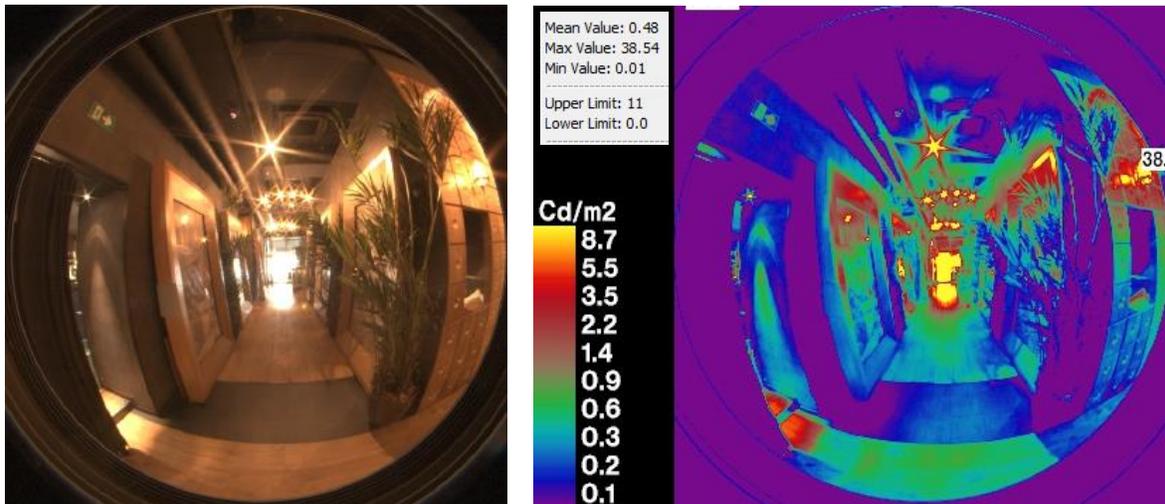


Figura 02. HDR y falso color en punto de medición 2

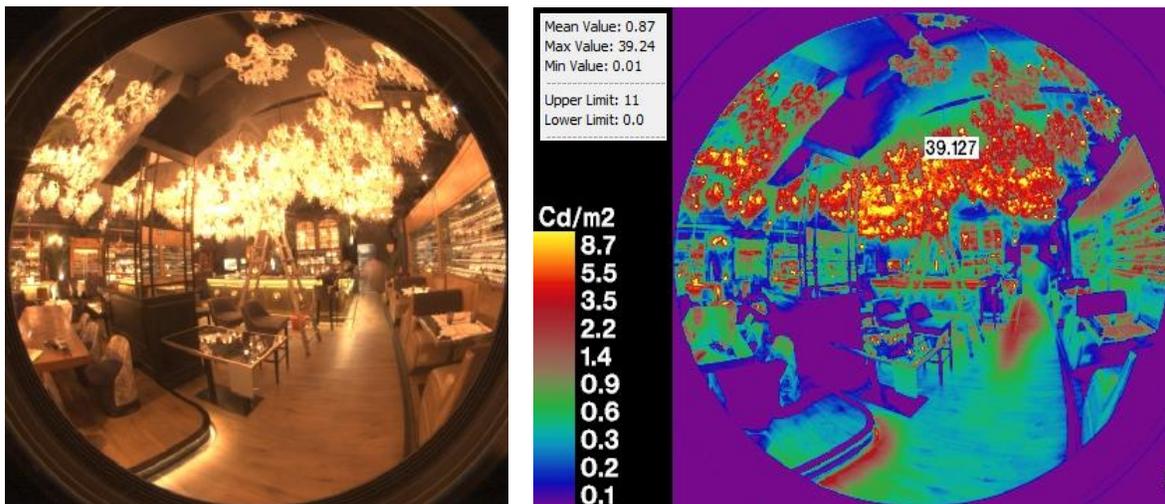


Figura 03. HDR y falso color en punto de medición 3

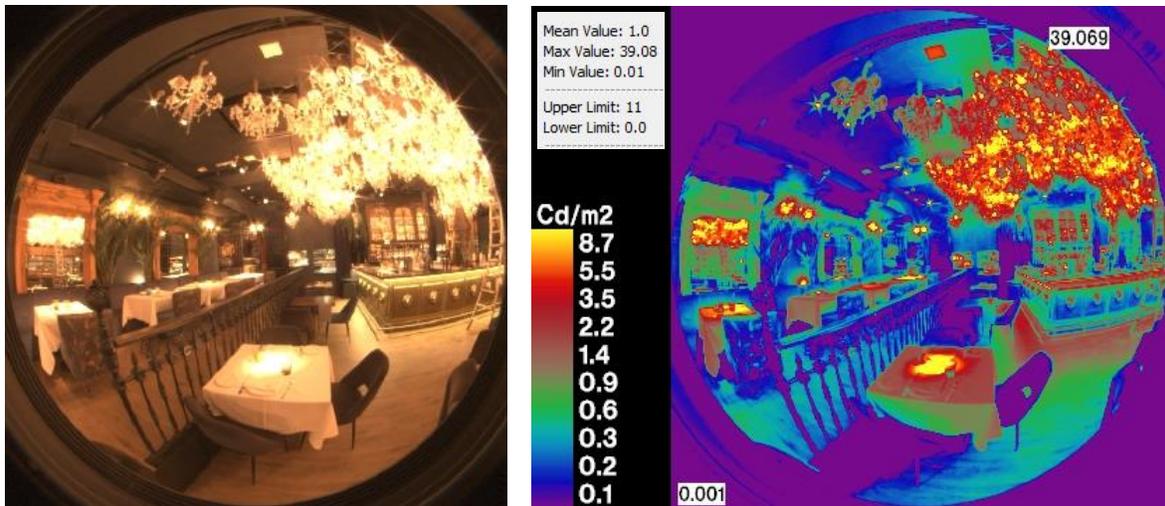


Figura 04. HDR y falso color en punto de medición 4

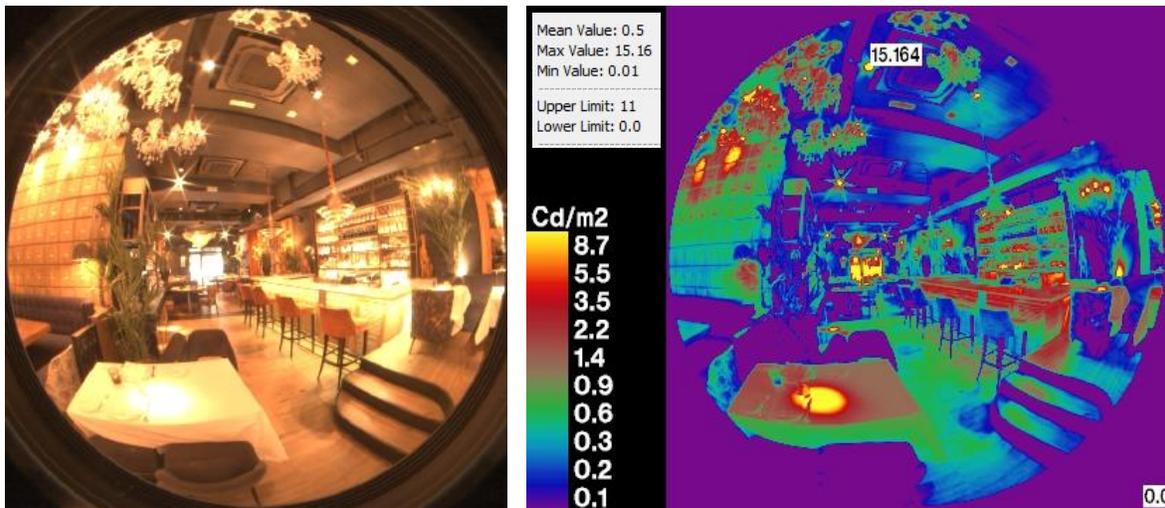


Figura 05. HDR y falso color en punto de medición 5

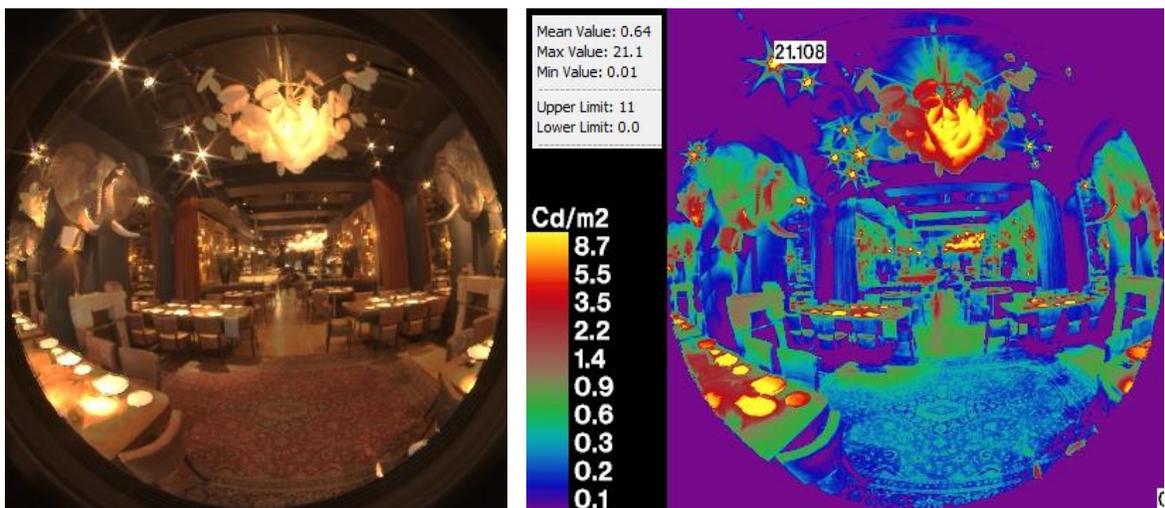


Figura 06. HDR y falso color en punto de medición 6

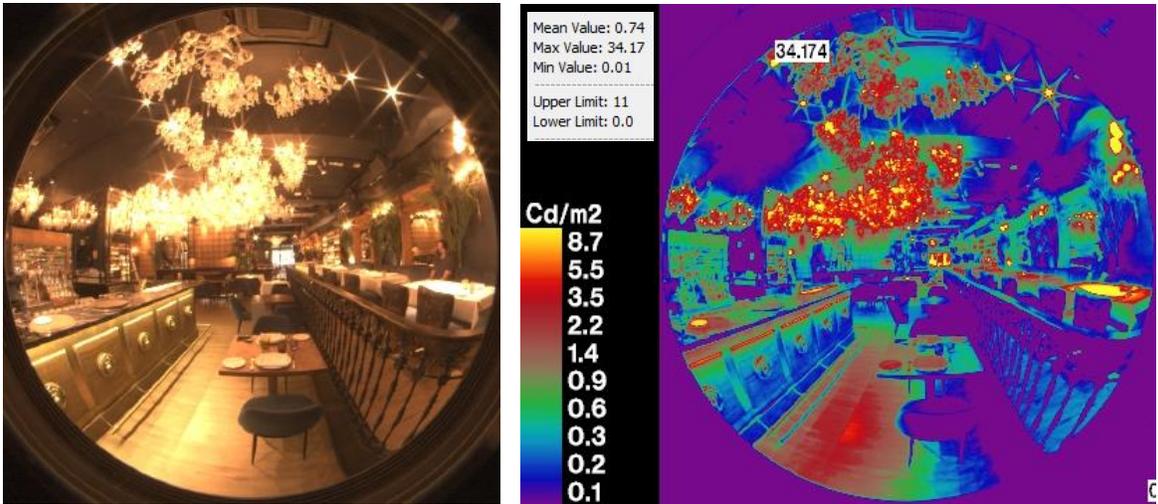


Figura 07. HDR y falso color en punto de medición 7

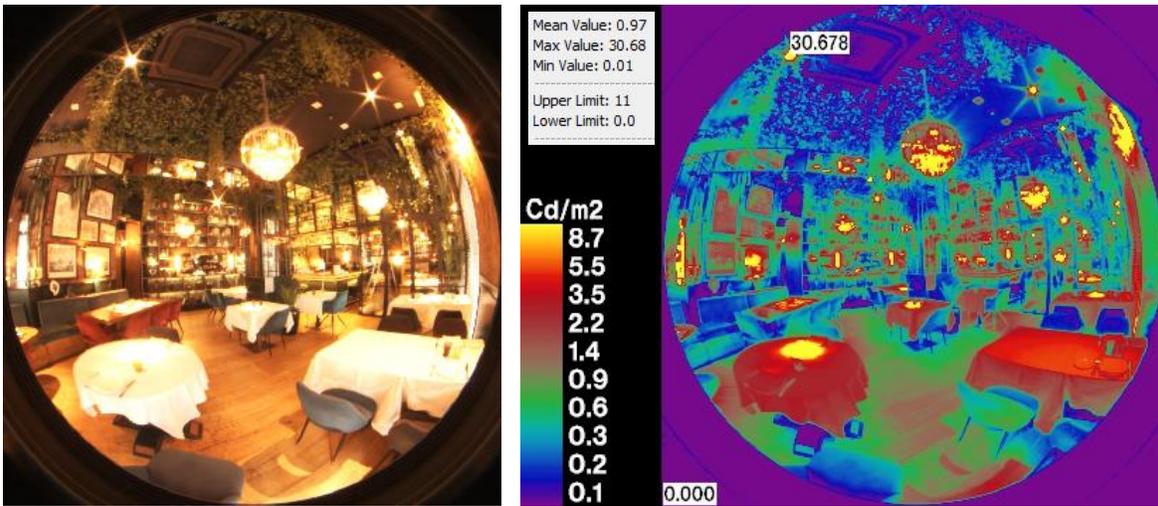


Figura 08. HDR y falso color en punto de medición 8

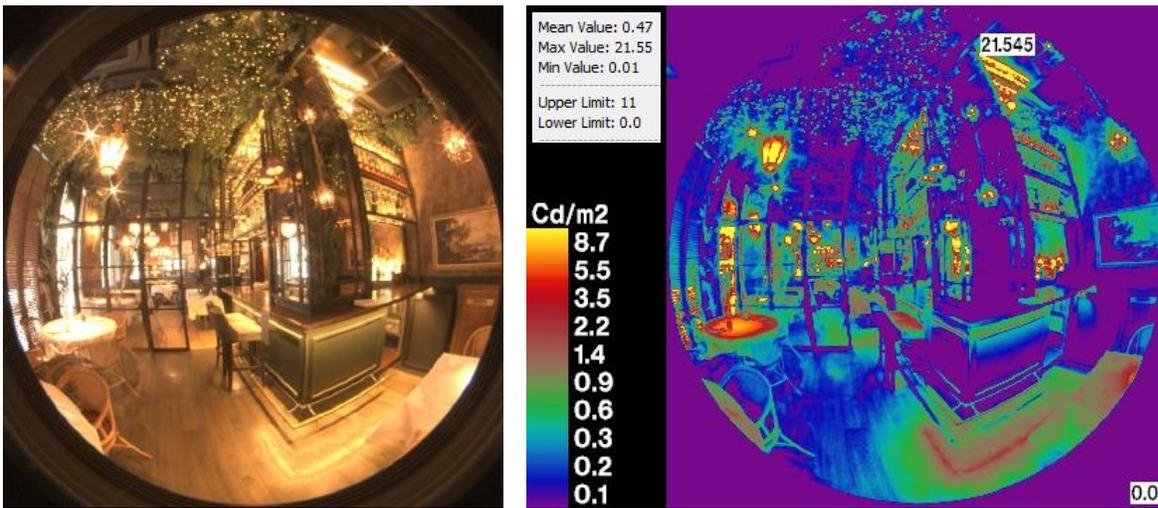


Figura 09. HDR y falso color en punto de medición 9

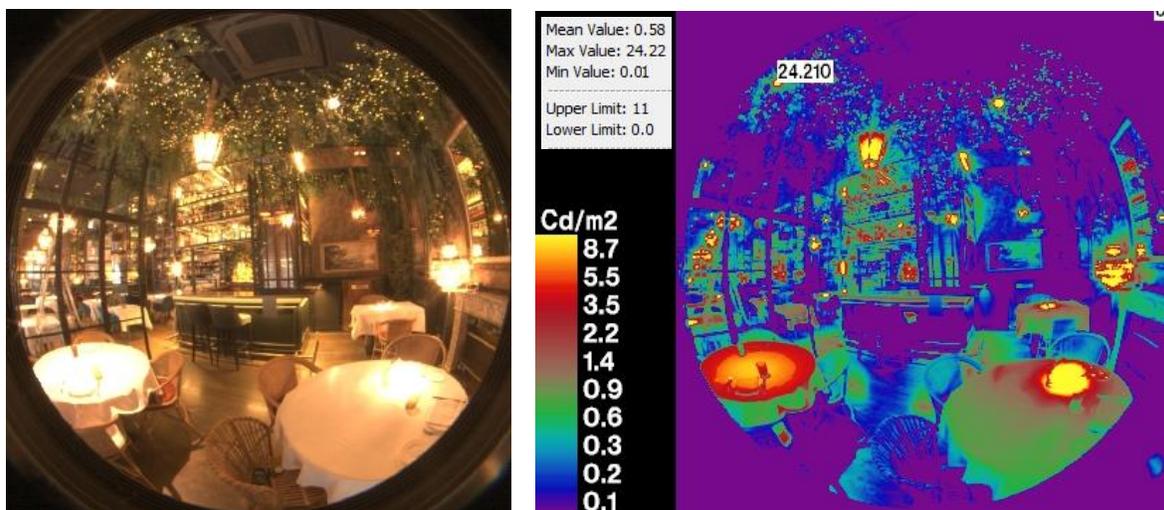


Figura 10. HDR y falso color en punto de medición 10

El Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona, llamado CCCB, ha sido caso de estudio para la presente tesis. Se identificaron diez puntos de medición a lo largo del recorrido de una de las exposiciones. Los cuatro primeros puntos de medición se encuentran en la sala más grande. El quinto y sexto punto de medición corresponde con las salas más pequeñas y oscuras de todo el recorrido. Del punto siete al diez se aprecian tres salas consecutivas que conducen al final de la exposición. En todos los puntos anteriores se hicieron mediciones de luminancias en una cartulina gris situada dentro de la escena fotografiada. Todas las escenas fueron sometidas a un software de cálculo de luminancias que proporciona imágenes en HDR y falso color. La escala de luminancia, en las imágenes de falso color, es logarítmica y cubre el rango de 0 cd/m^2 y 11 cd/m^2 . Las imágenes van acompañadas de un cuadro que indica el valor mínimo, medio y máximo de cada escena.

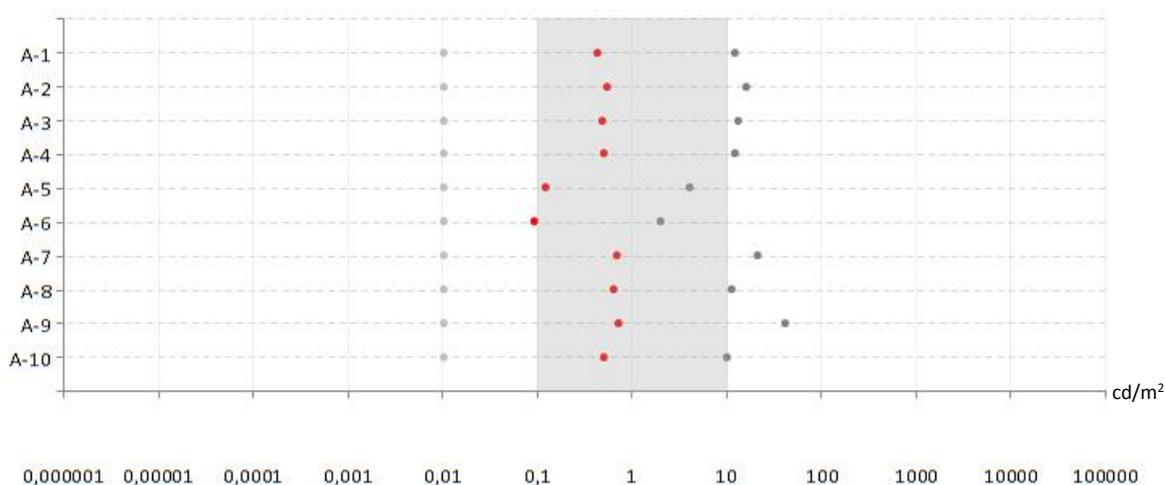


Tabla 1. Valores de luminancia mínimo, medio y máximo en los seis puntos de medición.

La tabla anterior reúne todos los valores de luminancia extraídos del análisis de imágenes. En el eje de las ordenadas se ubican las diez escenas y en el eje de las abscisas se indica los valores de luminancia desde el umbral de visión hasta el umbral de deslumbramiento absoluto. Los valores de luminancias mínimos en todos los casos son de 0,01 cd/m^2 ya que es el valor más bajo en el cálculo de luminancias. Los valores medios de luminancias están resaltados en color rojo y se ubican en el rango entre 0,1 cd/m^2 y 1 cd/m^2 . Los valores máximos de luminancia están por encima de 1 cd/m^2 y por debajo de 100 cd/m^2 . Los valores máximos que exceden las 12 cd/m^2 corresponden con las superficies de una lámpara expuesta a la vista. Observamos que en los puntos de medición cinco y seis tanto los valores de luminancia medio como máximos están por debajo de la tendencia por ser espacios con menos fuentes de iluminación que el resto. Sin embargo, todos los valores medios de luminancias están dentro del rango de 0,1 cd/m^2 y 10 cd/m^2 ; por tanto, corresponde con los valores propios de la visión mesópica.

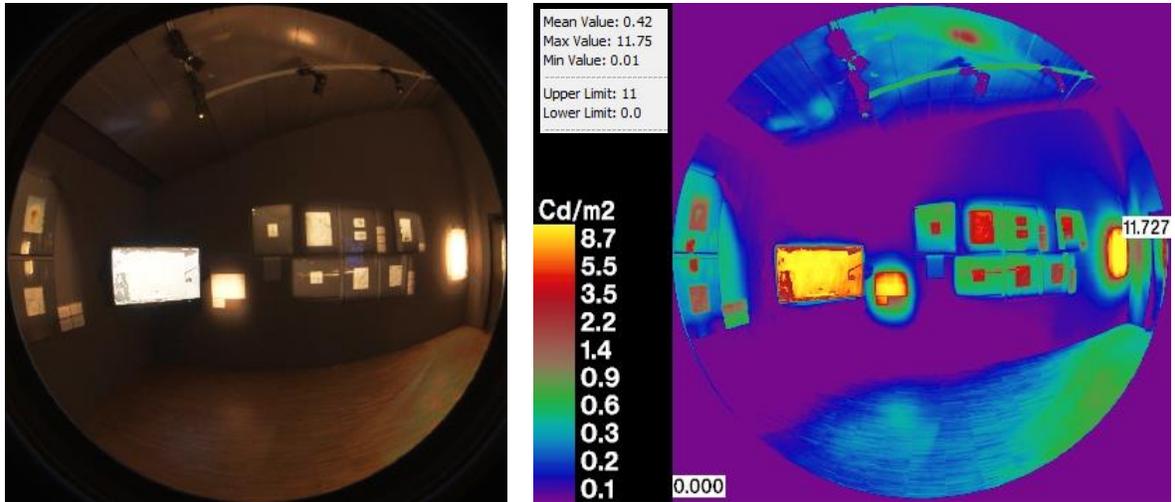


Figura 01. HDR y falso color en punto de medición 1

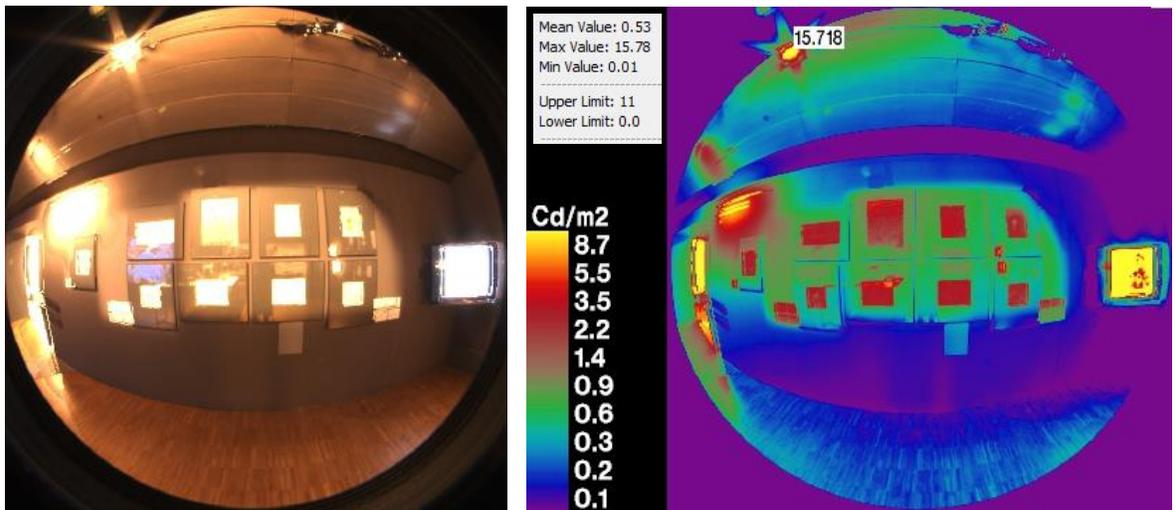


Figura 02. HDR y falso color en punto de medición 2

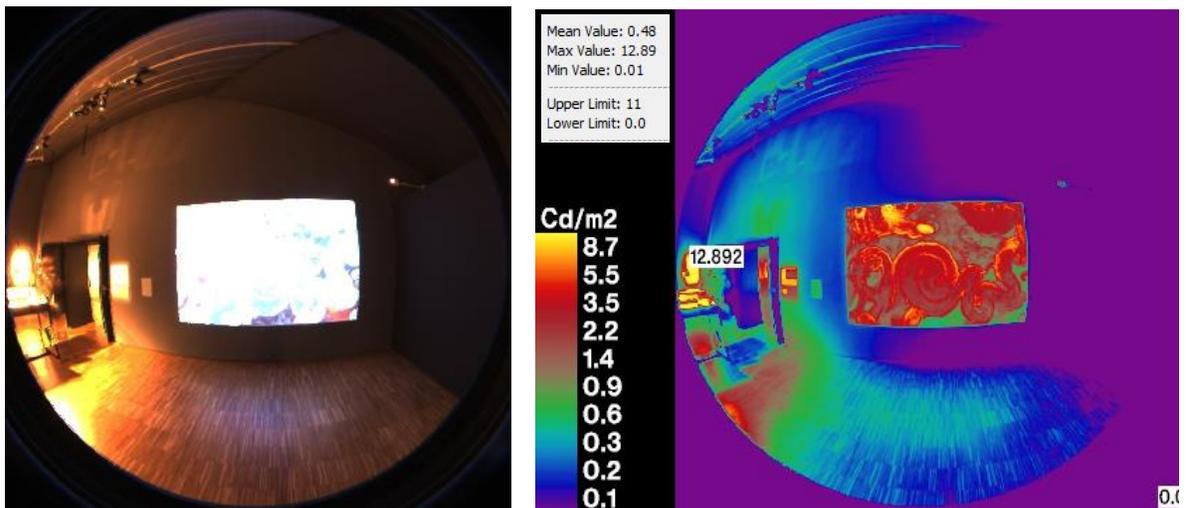


Figura 03. HDR y falso color en punto de medición 3

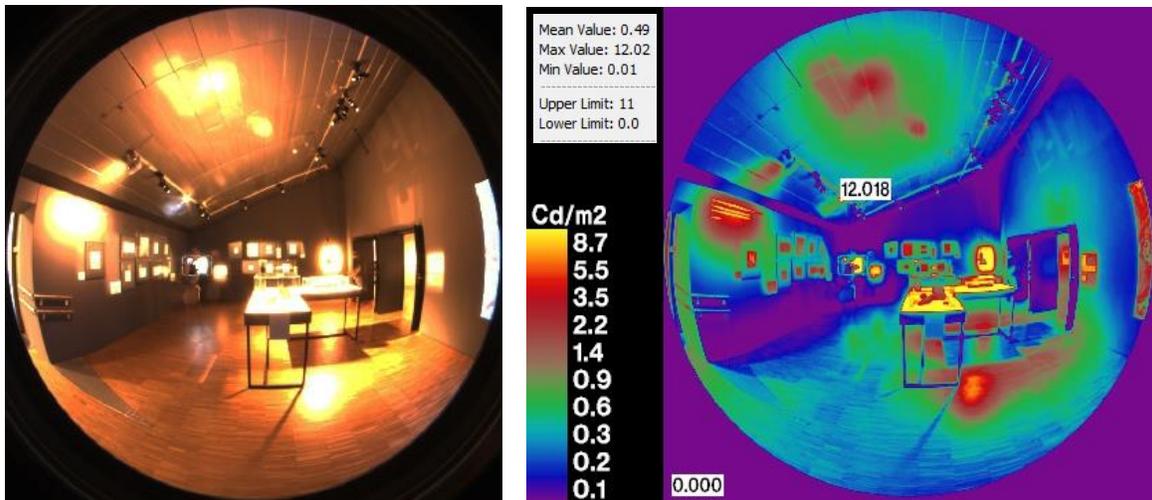


Figura 04. HDR y falso color en punto de medición 4

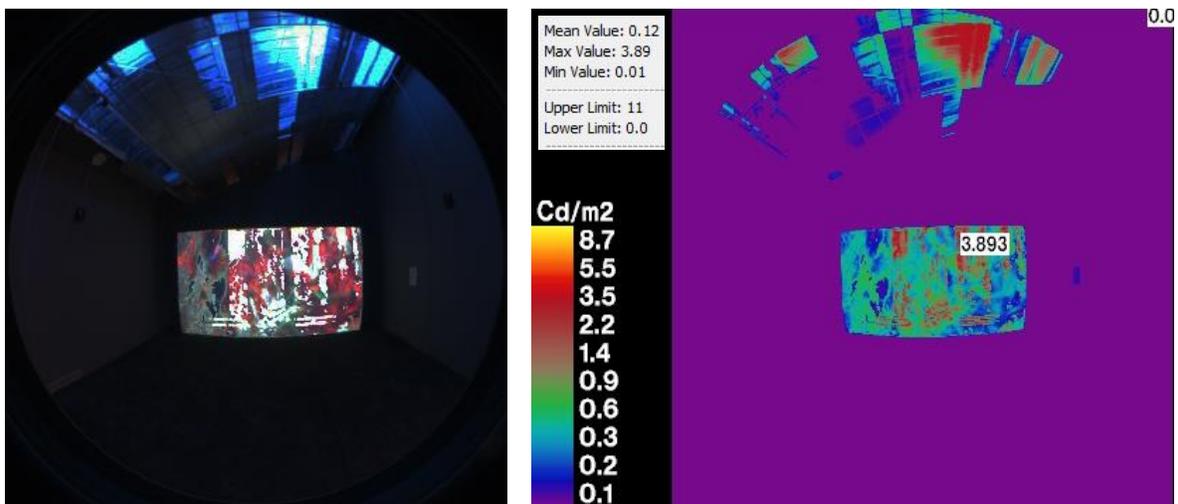


Figura 05. HDR y falso color en punto de medición 5

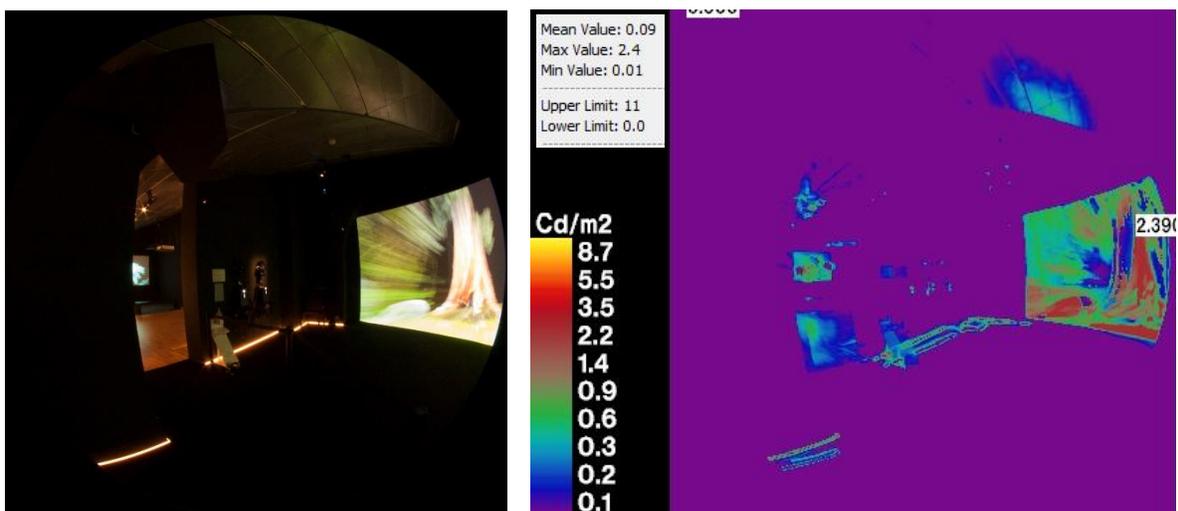


Figura 06. HDR y falso color en punto de medición 6

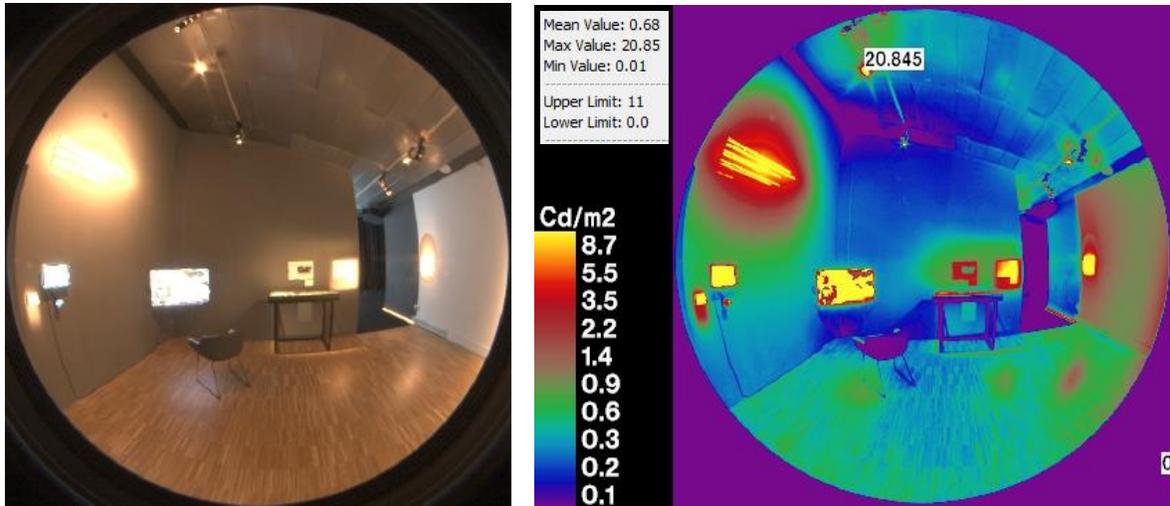


Figura 07. HDR y falso color en punto de medición 7

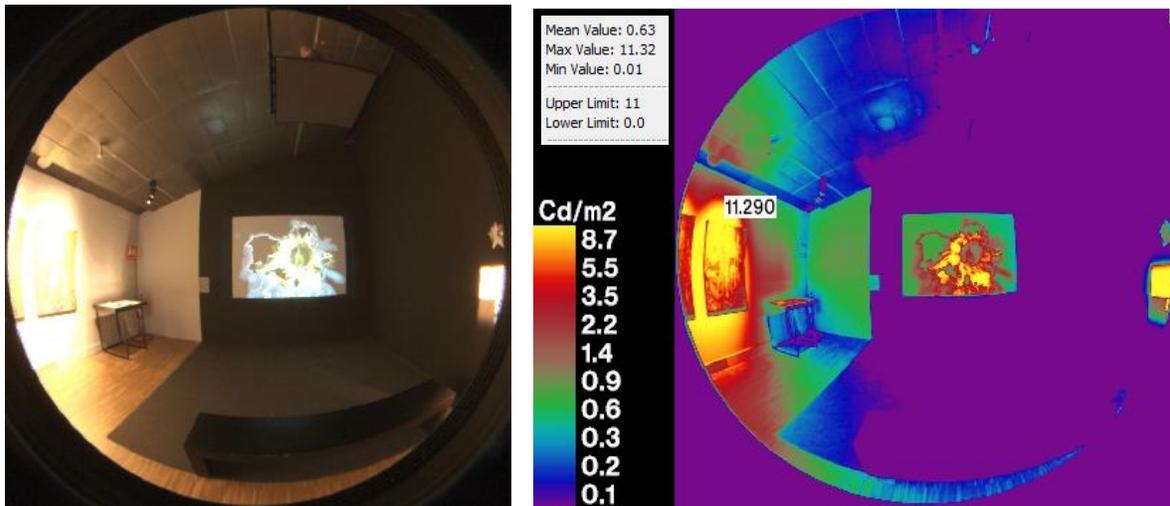


Figura 08. HDR y falso color en punto de medición 8

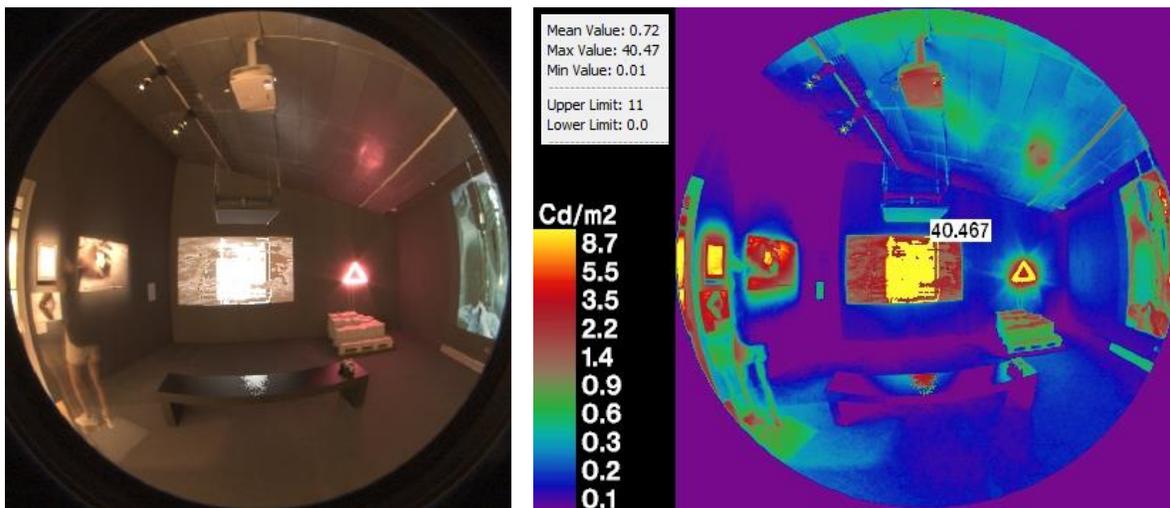


Figura 09. HDR y falso color en punto de medición 9

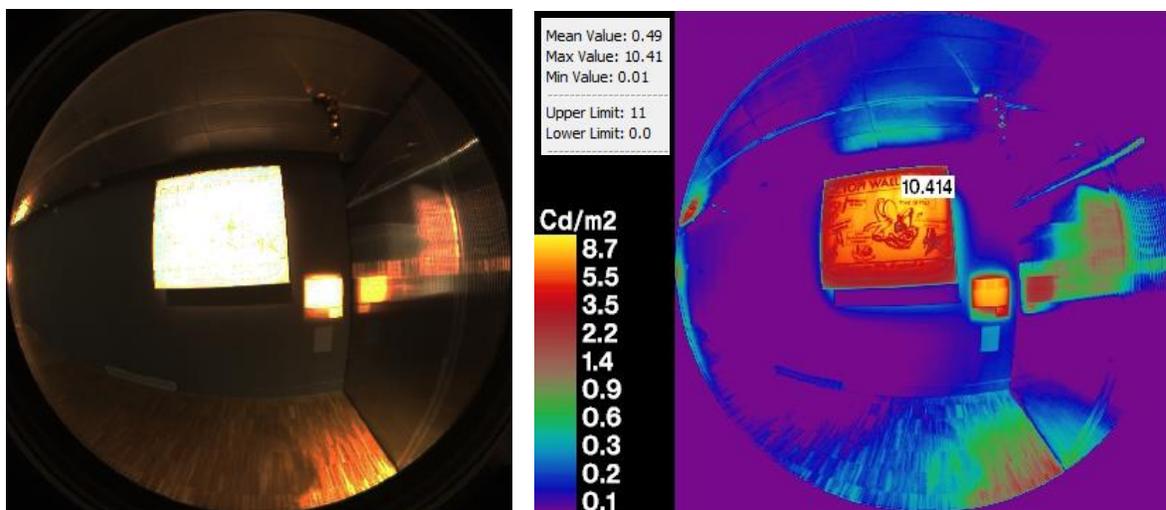


Figura 10. HDR y falso color en punto de medición 10