

## **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

Doctorado en Artes y Diseño  
Facultad de Artes y Diseño

### **FÍSICA ÓPTICA APLICADA AL ARTE** **Una propuesta metodológica**

Tesis  
que para optar por el grado de:  
**Doctora en Artes y Diseño**

Presenta:  
**Edith Guadalupe Vázquez Navarrete**

Tutora:  
**Dra. Karen Patricia Volke Sepúlveda**  
Instituto de Física, UNAM.

Co-tutores:  
**Dr. Gerardo García Luna**  
Facultad de Artes y Diseño, UNAM.  
**Dra. Rebeca Monroy Nasr**  
Instituto de Antropología e Historia, INAH.

Sinodales:  
**Dra. Adriana Raggi Lucio**  
Facultad de Artes y Diseño, UNAM.  
**Dr. Yuri Alberto Aguilar Hernández**  
Facultad de Artes y Diseño, UNAM.

Ciudad Universitaria, CDMX, enero 2020.



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FÍSICA ÓPTICA APLICADA AL ARTE  
**Una propuesta metodológica**

Edith Vázquez

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser mi segunda casa.

Gracias por el apoyo brindado a:

Programa de Posgrado en Artes y Diseño por recibirme y por el apoyo brindado a través del Programa de Becas, UNAM.

Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado (PAEP).

Grupo de investigación de Pruebas Ópticas, en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, UNAM. Con el soporte del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, Universidad Nacional Autónoma de México PAPIIT-UNAM #IN112618.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a mis tutores, quienes con su conocimiento y dedicación me han guiado durante todo el proceso de investigación:

Dra. Karen P. Volke Sepúlveda (IF).

Dra. Rebeca Monroy Nasr (INAH).

Dr. Gerardo García Luna (FAD).

Dr. Efraín Solarte (UNIVALLE, CALI).

Dr. Maximino Avendaño Alejo (ICAT).

M. en I. Benjamín Valera (ICAT).

Gracias a mis sinodales por leerme, por sus pláticas y apoyo:

Dra. Adriana Raggi Lucio (FAD).

Dr. Yuri . Aguilar Hernández (FAD).

## AGRADECIMIENTOS

Gracias a cada uno de mis familiares y amigos por ser parte de mi vida.

## AGRADECIMIENTOS

Gracias especiales al Dr. Gibrán Larrauri, quien con su inteligencia, experiencia y buen sentido del humor, me acompañó en los viajes más misteriosos que ejercí a través del Psicoanálisis.

## AGRADECIMIENTOS

Gracias a Benjamín Alcántara porque en la última etapa de investigación me ha fortalecido con su amor y mucha diversión.

## DEDICATORIA

A mi mamá, quien siempre será la principal fuente de luz en mi camino.

## DEDICATORIA

A mi papá. El hombre que me enseñó que reír a carcajadas es siempre lo mejor cuando algo anda mal.

## DEDICATORIA

A Eduardo Lizalde Farías, porque a lo largo del camino al Tigre le salieron alas, como bien lo dijo esa gran mujer: Senaida.

COON -

TENI -

DO

De La Noche a La Mañana	
Introducción.....	10

## Capítulo 1 .....18

### ASPECTOS METODOLÓGICOS

1.1 Hacia una Metodología M.....	19
1.2 Antecedentes en el Arte.....	22

## Capítulo 2.....44

### LA FÍSICA DE LA LUZ

2.1 El espectro electromagnético y la luz visible.....	45
2.2 Colores primarios aditivos (RGB) y sustractivos (CMYK).....	48
2.3 Las fuentes de luz.....	51
2.4 Leyes físicas de la luz aplicadas a la metodología planteada.....	57
2.4.1 Reflexión.....	58
2.4.2 Refracción.....	59
2.4.3 Reflexión total interna .....	61
2.4.4 Dispersión.....	62
2.5 Las lentes ópticas.....	64
2.5.1 Lentes convergentes y divergentes.....	64
2.5.2 Lentes Cilíndricas .....	65
2.6 Filtros.....	66

## Capítulo 3 .....68

### HERRAMIENTAS PARA UN MÉTODO TECNO - CIENTÍFICO

3.1 La aplicación de los fenómenos físicos de la luz.....	69
3.2 Recuperación de material óptico de viejos objetivos de fotografía y cinematografía.....	69

3.3 Diseño y producción de material optomecánico.....	79
3.4 Diseño de controlador de potencia para leds de 50w.....	82

## Capítulo 4 .....88

### DISEÑO DE IMÁGENES CON SISTEMAS ÓPTICOS Y LEDS

4.1 Especificaciones técnicas.....	90
4.2 Fase de investigación y experimentación en laboratorios de óptica.....	91
4.3 Fase de experimentación con herramientas propias del método propuesto.....	99
4.4 Fase experimental para la proyección de imágenes en movimiento.....	101
4.4.1 Fase de experimentación #1 .....	101
4.4.2 Fase de experimentación #2...	108
4.4.3 Fase de experimentación #3 ...	120
4.4.4 Fase de experimentación #4....	121

## Capítulo 5 .....125

### DISEÑO DE IMÁGENES POR REFRACCIÓN CON EL MÉTODO DE PANTALLAS NULAS

5.1 Pantallas nulas por refracción para su aplicación en piezas de arte...	126
5.2 Teoría.....	127
5.3 Pantallas nulas por refracción a partir de una imagen fotográfica.....	129

Conclusiones y trabajo futuro.....	136
Bibliografía.....	140

DE LA  
NOCHE  
A LA  
MAÑANA

**Miércoles 28 de marzo de 2018**

**C**orría el sexto semestre de doctorado y me preguntaba, como tantas veces, hacia dónde estoy yendo. Un nudo en la garganta. Una presión en el pecho. Un mundo de palabras entrecruzadas. Un mar de emociones. Vi una hoja en blanco, las paredes de mi estudio llenas de escritos, colores y teorías físicas de la luz. Abrí mi carpeta con apuntes y puse a hervir pasta. En tanto, recordaba el día en que me senté a escribir los motivos para ser aceptada en el doctorado. Fue el 19 de mayo de 2015, en esos días estaba leyendo algunas poesías del escritor caleño Andrés Caicedo. Me sentía tan triste como él. Mi madre estaba a siete meses de morir y yo, desde entonces, dejaría de decir que soy fotógrafa. La pasta está lista.

La última fotografía que le hice a mi mamá fue para su carnet del Seguro Social. Días después de su muerte, en diciembre de 2015, vi la foto y sentí que por primera vez entendía perfecto lo que Roland Barthes escribió en *La Cámara Lúcida* sobre la relación entre el retrato fotográfico y la muerte. Qué cosa tan vacía resulta ver un retrato de la persona que amas, de tu madre, y saber que no te ve, que ya no puedes abrazarla. La crueldad de esa fotografía se mezcló con la imagen de su cuerpo inerte. Todo se concentró en mi pecho. Silencio, oscuridad, zozobra.

30 de diciembre de 2016. 07:00 de la mañana. Sonó el teléfono. Tu papá falleció, escuché. En el lapso de doce meses, yo, hija única, me quedé sin padres. Días antes

de esta última noticia unos rayitos de luz habían estado coqueteando en la oscuridad. Todo regresó a las penumbras. Me quedé en ese lugar un tiempo, sólo a veces una ventana aparecía de noche, entonces yo podía asomarme y ver una que otra estrella. Estaban lejos, más lejos que nunca, y al verlas yo me sentía pequeñita, como una varita abandonada en un mundo donde no sabe qué hacer.

Tocaron a la puerta demonios, les abrí. Y a veces, sólo a veces, brillaba el sol por debajo de la puerta. Una vez, aprovechando ese brillo, tomé entre mis manos una esfera de cristal que mi mamá me regaló, constantemente la apretaba fuerte contra mi pecho, mientras imaginaba su

sonrisa, la acerqué a la luz y empecé a girarla entre mis manos, de repente vi colores ¡el arcoíris!, exclamé. Esa fue la primera vez que, después de un tiempo, sonreí de verdad.

Cuando los rayos de luz blanca llegaron del sol a mi esfera mágica, como la llamo, para mostrarme colores, se desvaneció la última imagen de mis padres, esa que había lastimado tanto a mis ojos. Se abrió lentamente la puerta y yo, con sospecha, me acerqué, avancé lento hacia afuera. Desde entonces voy abriendo poco a poco mis ojos y transito diario por un lugar donde sé que la oscuridad no es permanente, un lugar en donde la luz está llena de misterios capaces de anublar las imágenes tan horribles que a veces se aferran con yacer en la memoria.

# INTRO- DUCCIÓN

**E**sta investigación tiene como principal propósito el estudio de la óptica y las leyes físicas de la luz para diseñar y formar imágenes que atiendan a situaciones escénicas, que se acercan más a una alusión o interpretación de visibilidades ligadas a la realidad, a lo onírico o al imaginario y no a una representación vertical de las formas que percibimos en la realidad. Es decir, son imágenes que no pretendo sean evidentes ni legibles en su totalidad. Por tanto, la idea del diseño de imágenes, se debe considerar también como un diseño de *experiencias visuales*. En específico la propuesta consiste en formular dos métodos de trabajo que, con base en la teoría científica, aporten una posibilidad de acción en el terreno del arte.

El diseño y formación de imágenes se refieren en esta investigación a formas, patrones y colores, logrados a través de sistemas ópticos conformados por lentes, espejos, filtros, prismas y otros materiales ópticos, a través de los cuales se traza una guía por donde viaja la luz, para formar imágenes que son previamente planeadas y proyectadas sobre superficies específicas, como telas, vidrio, espejos, agua, humo, hielo o cualquier mate-

rial que pueda funcionar en el discurso de una pieza. Ésta puede ser una pieza escultórica de tamaños variables o una instalación inmersiva, planeada para que el público entre y camine entre imágenes y colores.

Otra manera de producir imágenes para estos fines, es a través del método de pantallas nulas por refracción tipo Ronchi-Hartmann, un método que los científicos utilizan para poner a prueba la calidad y características de lentes ópticas. En esta investigación utilicé una imagen fotográfica para lograr variantes en la visualización de la misma. Las imágenes resultantes se capturan en movimiento cuando pasan por un sistema óptico hasta un sensor CCD, pueden igualmente ser utilizadas para proyectarse en diferentes superficies, sea en una pieza escultórica, inmersiva o en cualquier otra aplicación en el terreno del arte.

El término *inmersivo* lo empecé a utilizar cavilando en las posibilidades que ofrece un espacio, al ser modificado con luz e imágenes fijas o en movimiento, donde entra el espectador con todo su cuerpo. Pero también pueden ser piezas, incluso pequeñas, que se vuelvan inmersivas

una vez que el espectador se asoma y accede a la pieza sólo con los ojos, para visualizar una imagen o una secuencia de imágenes diseñadas con uno o ambos de los métodos que propongo.

El desarrollo y planteamiento de esta investigación tiene sus raíces cardinales en dos preguntas fundamentales: ¿es posible encontrar una forma alternativa para diseñar, formar y proyectar imágenes no convencionales que den lugar a escenas o experiencias visuales, con base en la teoría científica de la luz, a través de sistemas ópticos?; ¿Es posible diseñar, formar y proyectar imágenes a partir de un retrato fotográfico, utilizando el método de pantallas nulas por refracción tipo Ronchi-Hartmann y aplicarlo al diseño de escenas o experiencias visuales? Las respuestas a estas preguntas se han desarrollado a lo largo de la investigación a través de un fortalecimiento necesario entre la ciencia, el arte y la tecnología. Una de las máximas en este trabajo, es el vínculo entre disciplinas que da forma a la propuesta, a los objetivos, al método y a las conclusiones de mi investigación.

El carácter científico se refiere específicamente al estudio y aplicación de la teoría óptica, de las leyes físicas y el estudio del comportamiento de la luz. La parte tecnológica se refiere al estudio y aplicación de la electrónica, una materia fundamental para manipular las fuentes de luz que se utilizan junto con los sistemas ópticos.

Desde un ámbito académico, ajustarnos en el arte a un conocimiento tecno-científico, implica la dedicación al estudio teórico junto con un factor importante en la ciencia: la experimentación, que precedida de la teoría científica, venga ejecutada en el terreno del arte. Durante esta fase hay lugar para la observación de lo que podría-

mos denominar *accidente*, en el caso de esta investigación, los *accidentes* corresponden a visualizaciones de imágenes o patrones inesperados que además de los diseñados y ejecutados, con base en la teoría física de la óptica, pueden cumplir un papel importante en el discurso de una obra.

Durante el proceso de investigación se utilizó como marco teórico general la óptica física, óptica geométrica, óptica experimental, instrumentación óptica y electrónica. Se enriqueció este marco con estudios sobre psicofísica del color, teoría del color y anatomía del ojo humano.

En concreto, la investigación se basa en el estudio de la naturaleza de la luz, desde sus fundamentos científicos, así como en el estudio del método de pantallas nulas por refracción. Se ha accedido a literatura especializada para la comprensión de la luz y su interacción con la materia. También ha sido imprescindible estudiar los principios básicos de la electrónica para atender al funcionamiento de los sistemas de fuentes LED que son fundamentales en el diseño y articulación de imágenes con sistemas ópticos.

Los estudios en óptica iniciaron en el Laboratorio de Óptica de la Facultad de Ciencias de la UNAM, donde el Dr. Mathieu Hautefeuille me recomendó frecuentar el Laboratorio *Cómo atrapar luz dentro de una gelatina* impartido por el Maestro Reinher Pimentel-Domínguez y el Laboratorio de *óptica experimental* con los Maestros Raúl Caudillo Viurquez y María José González Vázquez.

De manera paralela se hizo vigente el valor de tener entre mis tutores a un físico, fue entonces que busqué a la Dra. Karen Volke, investigadora y académica del Instituto de Física de la UNAM y quien, para mi alegría, aceptó

ser mi tutora. Ha sido una experiencia importante tener a mi lado a una científica, eso subraya de manera contundente el carácter multidisciplinario y tecno-científico de esta investigación.

Para fortalecer los estudios busqué a la Dra. Jazmín Carranza, investigadora y académica del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Asistí a su clase *colorimetría* que imparte en la Facultad de Ciencias, UNAM. Más tarde me ofreció una beca para asistir al curso *Psicofísica del color*, que imparte en las instalaciones del INAOE, donde adquirí conocimientos importantes como la estructura del ojo humano, cómo vemos los humanos, teoría del color, psicología del color y obtuve el reconocimiento de *Discriminador Superior* de la prueba Farnsworth-Munsell, un examen importante en el mundo de la óptica, que implica la capacidad para aislar y ordenar muestras de colores que tienen una mínima variante en su tonalidad.

Durante este proceso fue muy importante la estancia de investigación que realicé en la Universidad del Valle de Cali, en Colombia, en el grupo de *Investigación de Óptica Cuántica*, dirigido por el académico e investigador Dr. Efraín Solarte, uno de los académicos de mayor prestigio en el mundo de la óptica. Esta experiencia fue un soporte importante para el fortalecimiento teórico y experimental de la investigación y promovió la apertura al estudio de la electrónica, materia obligatoria para diseñar y construir herramientas de trabajo relacionadas al funcionamiento de LEDs de alta potencia.

En esta área recibí la colaboración del Ing. Román Herrera, quien me enseñó los principios fundamentales de la energía eléctrica; del Mtro. Jorge Eliécer Quintero Cal-

vache y el Mtro. Freyner Piedrahita Naranjo, académicos e investigadores de la Universidad del Valle de Cali, Colombia, quienes además de asesorarme en la teoría y la práctica en electrónica, me ayudaron con el diseño de un controlador para LEDs de alta potencia.

Otro acontecimiento importante que amplió mi perspectiva en torno a la óptica y me llevó a trabajar de manera diferente en el Laboratorio, fue mi participación en el grupo de *Pruebas Ópticas* dirigido por el Dr. Maximino Avendaño, académico e investigador del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) donde con su ayuda y la colaboración del Mtro. Gabriel Castillo, elaboré los estudios y experimentos de las pantallas nulas por refracción. Con el mismo grupo acudí semanalmente al *Seminario de Pruebas Ópticas*. Complementé mis estudios frecuentando las clases de óptica geométrica que imparte el Dr. Avendaño en la Facultad de Ciencias, UNAM. El trabajo realizado en esta etapa alcanzó niveles más complejos en el uso de sistemas ópticos y en el aprendizaje para diseñar imágenes con el método de Pantallas nulas por refracción utilizando, en mi caso, una imagen fotográfica.

En el último periodo de la investigación conocí al Maestro en Ingeniería Benjamín Valera, con quien planeamos trabajar de manera colaborativa en el diseño de un sistema para controlar y programar varias fuentes LED de diferentes longitudes de onda y láser. Es una propuesta que surge durante la parte final de la investigación y que abre las posibilidades de enriquecer, en el futuro inmediato, los procesos para el diseño de piezas de arte con luz, complejizadas con sistemas ópticos en movimiento y sensores que propicien una participación activa del espectador.

Para enriquecer el marco teórico de esta investigación ha sido también fundamental realizar una búsqueda histórica de los artistas que trabajan o que han trabajado con luz. Aunque en la lista hay muchos clásicos y otros contemporáneos, han sido pocos los artistas encontrados, cuya obra se base en el estudio científico de las leyes físicas de la luz, la óptica y el control de sistemas ópticos. Al contrario, surgieron nombres de científicos que desde su área se inclinaron hacia la producción artística.

También se realizó una búsqueda bibliográfica sobre arte multidisciplinario y de proyectos donde los trayectos entre arte, ciencia y tecnología se visualizan desde una perspectiva de trabajo colaborativo para ampliar la configuración del concepto y de las formas de abordar el arte mediante la relación entre estas materias.

Los estudios y la experimentación desarrollados en los Laboratorios que he mencionado, se fortalecieron en el espacio que la Facultad de Artes y Diseño me facilitó en el área de Posgrado de Ciudad Universitaria, para poner en práctica la experimentación de la metodología propuesta para el campo del arte.

Es importante mencionar que en los Laboratorios de Física se trabaja con material óptico y optomecánico de alto costo, que generalmente llega a México desde Estados Unidos y Alemania. Por tanto, esta investigación tuvo una etapa en la que recuperé más de treinta lentes que extraje de viejos objetivos de fotografía y cinematografía encontrados en mercados de antigüedades.

En cuanto al material optomecánico, que se refiere a los soportes en donde se colocan lentes, prismas, espejos, LEDs y todo elemento que conforma una pieza, también

es material que diseñé y que fue construido por el herrero Sergio González, el carpintero Raúl Llanos y el joyero Emanuel Fuentes Gálvez. Estas colaboraciones que están del otro lado de lo académico enriquecen de manera fundamental a esta investigación.

Desde el inicio del doctorado, una actividad enriquecedora y de suma importancia en el desarrollo conceptual de mi trabajo fue la asesoría de la Dra. Rebeca Monroy Nasr, investigadora y académica de la Dirección de Estudios Históricos del Instituto Nacional de Antropología e Historia, INAH, especialista en estudios de la imagen y fotografía. Dirige el Seminario *El Sabor de la Imagen*, un espacio donde las reflexiones en torno a la imagen se despliegan a partir de diversas plataformas disciplinarias. La actividad de reflexión en torno al discurso que tenemos como artistas junto con nuestra técnica y método de trabajo es un ejercicio obligatorio durante el proceso de la investigación artística.

En estas reflexiones está en constante búsqueda la vinculación entre lo discursivo y lo técnico. En una propuesta como la que presento, fue preciso desde el inicio tener una apertura a la experimentación en otras áreas, dialogar con otros lenguajes y durante toda la investigación este impulso fue alimentado por el Dr. Gerardo García Luna, académico y ahora director de la Facultad de Artes y Diseño FAD, UNAM. Su pensamiento en nuestra área de estudio convoca a un constante cuestionamiento en torno a los paradigmas del arte, en donde es imprescindible tratar de generar rupturas discursivas, en donde estén implicadas nuevas maneras de abordar nuestras narrativas artísticas y apostar por lo multidisciplinario.

Como artista, desde el inicio de la investigación he mantenido claridad frente a mi posición en el proceso

de una investigación multidisciplinaria. Por tanto, me parece prudente aclarar que no estoy haciendo ciencia. Estoy haciendo arte y me he acercado a la ciencia como una disciplina donde busco las herramientas necesarias para enriquecer mis técnicas y con ello extender mis posibilidades discursivas. Exploro la idea de encontrar en el estudio de la luz, de la óptica y de la electrónica, un lenguaje que enriquezca nuestro campo de estudio en las artes.

Desde nuestra área, el éxito de relacionar óptica, electrónica y arte se podrá ver en la capacidad que tengamos como artistas de absorber el conocimiento científico y llevar a la práctica las técnicas experimentales con sustento teórico para la construcción de piezas de arte, en donde los procesos cognitivos se asocian a la creatividad y a la capacidad de construir discursos a través, en este caso, de imágenes con luz.

Como artistas somos creadores de formas y podemos también experimentar con la construcción de nuestro propio lenguaje. En *El nacimiento de la tragedia* dice Nietzsche que el hombre no tiene una relación con el mundo guiada por la búsqueda de la verdad, sino por la producción de la ilusión que enmascara y hace soportable y aceptable la vida. Que el hombre es, por naturaleza, artista, o sea, creador de ficciones.

De manera particular, durante este proceso de investigación, he indagado en la dualidad estructural donde encajan las formas que acontecen tanto en la persuasión intuitiva de lo sensible cuanto en la razón y en la operación discursiva. Mi experiencia individual se ha convertido en la pauta que guía mis procesos como artista.

Es difícil pensar que en nuestro ámbito podamos trabajar deslindados de nuestro contexto histórico y de las memorias personales, por tanto, aunque no de manera explícita, esta investigación y la obra que de ella surge, son inevitablemente autobiográfica y recorro al lenguaje que he elegido utilizar, para darle sentido a las imágenes y a las formas.

El lenguaje con sistemas ópticos y luz, que fui construyendo a lo largo de este proceso, facilita una translación de carácter alusivo, de las sensaciones e impulsos que se convierten en imágenes o formas expresivas y conceptuales. De manera muy precisa, el método que desarrollé durante estos cuatro años, responde al deseo de bruñir las imágenes dolorosas y oscuras, dibujadas por los cuerpos sin vida de mis seres amados.

## **ORGANIZACIÓN DE LA TESIS**



## CAPÍTULO 1

# ASPEC- TOS ME- TODOLÓ- GICOS

**E**ste capítulo contiene una explicación sistemática de la propuesta de la tesis, que tiene su soporte en dos métodos de trabajo, uno ligado al estudio de los fenómenos físicos de la luz y sus aplicaciones en el diseño de imágenes. Otro que se basa en el estudio y aplicación del método de pantallas nulas por refracción tipo Ronchi-Hartmann. En el segundo apartado haré una revisión a referencias artísticas pertinentes para contextualizar las posibles aplicaciones del método de trabajo propuesto en esta tesis.

### **1.1 Hacia una metodología multidisciplinar**

La investigación de doctorado que realicé en la Facultad de Artes y Diseño, tiene como propósito principal abrir un diálogo interdisciplinario entre el arte, la ciencia y la tecnología. Como lo he explicado a lo largo de la introducción, propongo el diseño y formación de imágenes utilizando dos métodos, uno determinado por las leyes físicas de la luz, que implica el uso de elementos ópticos, luces LED y láser. El segundo método basado en el diseño y formación de imágenes con base en el conocimiento de las pantallas nulas por refracción.

Con el primer método se plantea el diseño, generación y observación de procesos experimentales a través del ensamble de sistemas ópticos y fuentes de luz. Esto da cuerpo a una investigación en constante transformación, donde se aplican las leyes físicas de la luz; se analiza el comportamiento de la misma al momento de pasar y ser manipulada o dejada para que evolucione, en, por, o a través de diferentes elementos ópticos (lentes, filtros, polarizadores, espejos, prismas, entre otros) colocados en un espacio físico sobre una mesa especial de óptica. Se ha observado la transformación de la luz y sus efectos sensibles, cuando incide en los elementos ópticos para formar las imágenes que previamente han sido diseñadas o planeadas. El diseño de estas imágenes son aproximaciones de lo que se quiere ver, pueden sufrir modificaciones debido al carácter mecánico con el que se elaboran.

La metodología entiende incorporar la luz como elemento activo en una pieza artística y explotar al máximo las posibilidades que esta idea ofrece, para ello es indispensable conocer la propia luz desde una perspectiva científica y la óptica es el área de la física que

estudia la luz y su interacción con la materia. La luz se incorpora al desarrollo de instrumentos y tecnologías, en ese sentido, es fundamental la estrecha colaboración con científicos del área de óptica e ingenieros que han aportado en el desarrollo de sistemas de control de fuentes de luz, lo cual marca el valor interdisciplinar implícito en la investigación.

Concretamente se utilizan distintos elementos ópticos para generar diferentes efectos visuales. Los espejos y lentes, por ejemplo, de acuerdo a su forma (curvatura), tamaño y disposición, pueden crear imágenes, pero también se pueden utilizar para definir la ruta de la luz dentro de la pieza. Otros elementos como los prismas, pueden utilizarse para separar la luz blanca en sus diferentes componentes espectrales, que vemos como colores. Los polarizadores se pueden combinar con materiales plásticos para generar patrones de colores mediante un efecto conocido como foto-elasticidad.

Para trabajar en la aplicación y formación de imágenes se necesitan elementos ópticos, material optomecánico, LEDs, láser y un sistema de control para estas fuentes. Todo esto constituye el conjunto de herramientas y de ello hablaré en el capítulo tres.

La segunda propuesta supone el diseño de patrones e imágenes que se logran con la metodología de pantallas nulas por refracción tipo Ronchi-Hartmann, que consiste en diseñar un patrón no uniforme de curvas, con el fin de generar en el plano de detección un patrón predefinido, de acuerdo a los parámetros del sistema óptico a utilizar para la construcción de piezas de arte. Este método fue desarrollado para en un futuro lograr piezas inmersivas. Es un método de trabajo que los

científicos aplican a la prueba de lentes de diferentes tipos y con lo que comprueban las características de las mismas. En mi caso, trabajé con un retrato fotográfico, para analizar matemáticamente la imagen, construir una pantalla nula y detectarla reconfigurada a través de una lente esférica, un sistema óptico y un plano de detección diseñados para un láser rojo.

El resultado son imágenes que hacen alusión al retrato analizado matemáticamente, registradas desde diferentes planos de detección. Especialmente surge de esto una imagen en movimiento que se genera manualmente en la mesa óptica, los detalles están en el capítulo cuatro.

En ambos métodos, lograr lo establecido en el diseño de imágenes es un gran reto y se tiene qué abordar de manera gradual, haciendo uso de esquemas simplificados en donde se define qué se quiere ver y cómo se va a lograr. La visión científica se incorpora al proceso de investigación artística no sólo en el aspecto de aportar conocimiento sobre los elementos a utilizar, sino también en el desarrollo de un método de trabajo para creaciones posteriores, que pueden ser esculturas ópticas, instalaciones inmersivas, diseños de imágenes para piezas escénicas o arquitectónicas. Este es el enfoque interdisciplinario integral que se plantea como parte de la investigación.

Para el desarrollo de la investigación ha sido indispensable estudiar óptica; leyes físicas de la luz; psicofísica del color; anatomía del ojo humano; medición del espectro solar; espectros de fuentes de luz; método de pantallas nulas por refracción; electrónica para controlar potencias de luz artificial (LED), programación con

Arduino para control de fuentes y llevar a cabo diversos procesos experimentales en laboratorios de óptica. Todo esto se ha realizado especialmente en la Facultad de Ciencias de la UNAM; el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE); la Facultad de Ciencias de la Universidad del Valle de Cali, Colombia; el Instituto de Física, UNAM y el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) y en la Unidad de Posgrado UNAM. Como resultado, se tiene el desarrollo de un método de carácter tecno-científico, especializado en óptica y luz, en donde han participado investigadores físicos e ingenieros, de quienes ya se ha hablado en la introducción y quienes han sido guía importante en las fases de investigación, experimentación, producción y aplicación.

La ciencia otorga el conocimiento para entender a fondo por qué y cómo vemos; qué es la luz y cómo viaja en el espacio. Qué es el color y como interactúa la luz con la materia; por qué el ojo humano es un gran sistema óptico; cómo se pueden hacer imágenes aplicando la óptica física y geométrica; entre otras explicaciones que enriquecerán la forma en que hacemos arte, junto con el conocimiento tecnológico que abre las posibilidades discursivas en la aplicación de las imágenes hechas con sistemas ópticos.

El carácter interdisciplinar y experimental de la investigación permite participar en el arte de manera colaborativa, y esa es una de las máximas en esta investigación. Arte, ciencia y tecnología conviven en la construcción del método de trabajo que se expone en la tesis. La experimentación y puesta en escena del trabajo final atienden de manera fundamental a la aplicación del conocimiento científico en el terreno del arte. Estas particularidades

han sido el factor principal para mi participación desde el arte en coloquios, congresos y seminarios nacionales e internacionales en el terreno científico.

La figura del artista la planteo como un sujeto que se integra a discusiones y proyectos en donde el cruce de áreas de conocimiento esté ligado a una tarea de producción de obras y piezas colaborativas, junto con un compromiso de divulgación y transmisión del conocimiento adquirido logrado a través de vínculos con investigadores y estudiantes de otras instituciones científicas y tecnológicas dentro y fuera de la UNAM para forjar trabajos colaborativos e interdisciplinarios que permiten complejizar la producción artística.

La investigación explora la realidad del entorno físico determinada por la luz con base en teorías y situaciones de experimentación científica y tecnológica, mientras se construyen nuevos modelos de simulación y representación en donde el lenguaje natural se convierte en un lenguaje visual y tridimensional por medio de la luz, las variantes de distancia y posición en los sistemas ópticos y la materia que compone el entorno donde se proyectan o visualizan las imágenes construidas. Se atiende a la idea del arte como un hábitat en donde se promueve la conexión de teorías y métodos que confluyen en la conformación de una metodología interdisciplinar.

Esta concepción de lenguaje tridimensional refleja la idea del arte como un sistema complejo, con el cual se pueden construir experiencias, que de manera formal plantean un cuestionamiento en torno a la función del arte a partir de la investigación tecno-científica. Esta idea traza la instauración de nuevos modelos de investigación como práctica artística, en donde se pueden

plantear discursos que establezcan una comunicación entre artista-espectador, no específicamente a través de lo que éste ve sino de lo que percibe en torno al proceso de la investigación artística.

Un diálogo que nace desde la disponibilidad de ambas figuras, desde mi perspectiva como artista, las imágenes que diseño y construyo con estos métodos, tiene la intención de crear en el espectador la idea de una experiencia visual que podría remitirlo a cualquier espacio o situación ligada a su propia historia de vida y memorias visuales que apelan a un ejercicio racional de apropiación del proceso artístico desde una reflexión individual y única.

No diseño imágenes narrativas sino situaciones que pueden servir de pretexto para extraerse de la propia realidad o cotidianidad, para sumergirse en la luz y el color con imágenes que no necesariamente son definibles o explicables. Representaciones tridimensionales de lo visible, lo metafórico, lo onírico o lo aleatorio, una interpretación microscópica de la naturaleza y una resignificación de los procesos cognitivos y emocionales que atravesaron el proceso de investigación y creación artística. La suma de esto es lo que puede mantenerse en estrecho diálogo con el espectador y es lo que viene a señalar el borde en donde se coloca la autonomía de la disciplina artística, para establecer una convergencia en donde se pone en cuestión el paradigma no solamente del quehacer en el arte, sino del ver o participar de él.

De este modo la investigación se asienta en lo que Stella Veciana Schultheiss<sup>1</sup> denomina "*research art*" – el arte

---

<sup>1</sup> Stella Veciana Schultheiss, *Research arts: la intersección arte, ciencia y tecnología como campo de conocimiento* (Barcelona: Universidad de Barcelona, 2014), 13-14.

como una práctica de investigación científico tecnológica que se inscribe en el dominio del conocimiento artístico. En esta dinámica se anotan los resultados, en donde especialmente exhibo el método aprendido en el terreno de la ciencia y aplicable en el del arte. Un trabajo en cuyas conclusiones se forja la instauración de un lenguaje de trabajo ampliable en el futuro, a través de otras teorías científicas y la implementación de otras herramientas tecnológicas. De modo que concluyo no con la presentación de una pieza de arte sino con la exposición del método, de las herramientas, las teorías aplicadas y aplicables en la tarea artística, así como las imágenes que he diseñado con sistemas ópticos, luz y con pantallas nulas, para dar muestra de resultados y de los alcances multidisciplinarios de la propuesta.

## 1.2 Antecedentes en el Arte

Antes de abordar las leyes físicas de la luz y el método de pantallas nulas por refracción, conocimientos científicos primordiales para el diseño y construcción de imágenes e hilo conductor de esta tesis, me parece pertinente exponer el nombre de artistas que trabajan con luz, quienes, independientemente de la diversidad en las metodologías utilizadas, resultan un buen referente para responder a la búsqueda de una aproximación estética.

No obstante la variedad en la manera de trabajar, los recursos y la metodología que planteo en mi tesis encuentran analogías precisas con dos proyectos en la historia del arte con luz. Uno realizado en 1960 por los chilenos Carlos Martinoya y Nahum Joël, otro realizado en el año 2000 por el vitralista italiano Narcissus Quagliata en colaboración con el Dr. Salvador Cuevas Cardona, Investigador de la UNAM. Abordaré en segui-

da estos dos trabajos para después continuar con un breve recorrido artístico, que da lugar a referencias estéticas aunque no precisamente metodológicas.

La primera pieza de la que hablaré se llama *Abstractoscopio Cromático*, la cual marca un acercamiento formal con la manera de producir imágenes y aplicarlas al arte. El resultado marca una clara fusión entre ciencia, arte y transmisión del conocimiento científico, a través no sólo de la exposición de la obra sino de la explicación científica de lo que se está visualizando en ella. La obra fue realizada a finales de 1960 por el físico y Director del Instituto de Física y Matemáticas de la Universidad de Chile Carlos Martinoya y el cristalógrafo Nahum Joël. Consistía en una máquina que operaba teniendo en cuenta los conocimientos de óptica y luz, tenía cristales, trozos de papel celofán, luz polarizada y dos brazos activados por un motor eléctrico con el que se generaba un movimiento lento, tenía un ajuste en las velocidades contaba también con un proyector de diapositivas de 500 watts, con ello se obtenía la proyección una amplia variedad de composiciones abstractas de diferentes colores y texturas que nunca se repetían.

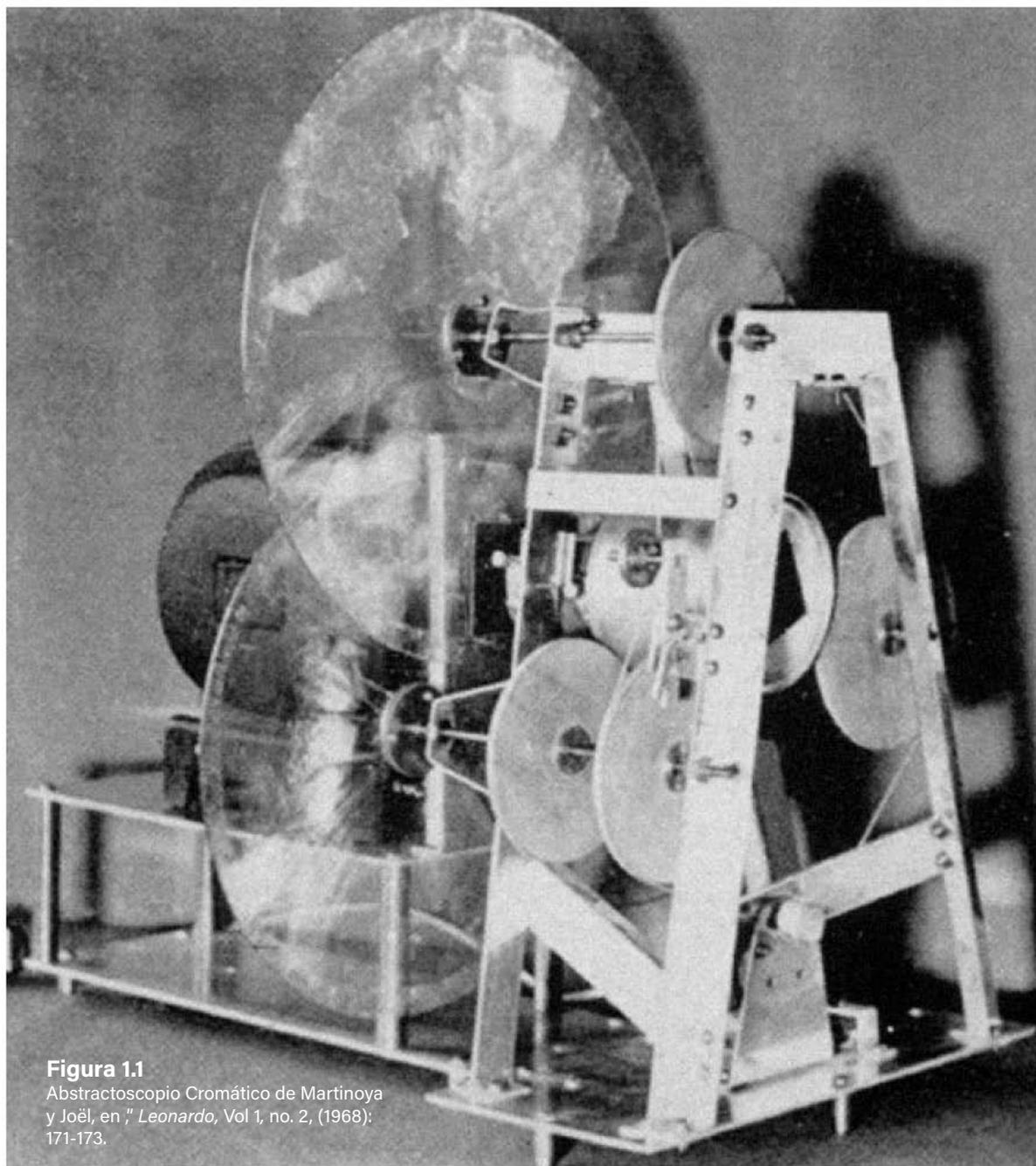
Pensamos que los colores obtenidos por medio de interferencias de luz polarizada en cristales birrefringentes serían un buen ejemplo. Las vibraciones transversales son restringidas a ciertas direcciones

especiales en la luz polarizada; por ejemplo, en un plano de luz polarizada todas las vibraciones convergen en un solo plano. Un material polarizado o polaroide, como el del papel fotográfico Polaroid, tiene la propiedad de transmitir estas vibraciones de luz transversales que vibran en un cierto plano. La doble refracción material divide una ola de luz en dos olas que se propagan a través del material a distintas velocidades, dando lugar así a los efectos de interferencia que producen colores cuando se usa la luz polarizada. Ambos hemos demostrado en muchas ocasiones el conocido efecto a nuestros estudiantes de física y cristalografía; su reacción nos hizo pensar que el público general también podría disfrutar al verlo<sup>2</sup>.

El *Abstractoscopio cromático* representa un perfecto ejemplo de mediados de S.XX, en donde el conocimiento científico es el soporte para la producción de piezas de arte, en donde es fundamental, como lo afirman sus creadores, instaurar un lazo entre la ciencia y el arte, así como fortalecer la relación entre los fenómenos naturales y las emociones estéticas, principios adheridos y que resultan fundamentales en la investigación artística y la propuesta metodológica que expongo en mi tesis.

---

<sup>2</sup> Carlos Martinoya y Nahum Joël, "The Chromatic Abstractoscope: an application of polarized light," *Leonardo*, Vol 1, no. 2, (1968 [Consultado en marzo de 2017]): 171-173, [www.jstor.org/stable/1571956](http://www.jstor.org/stable/1571956)

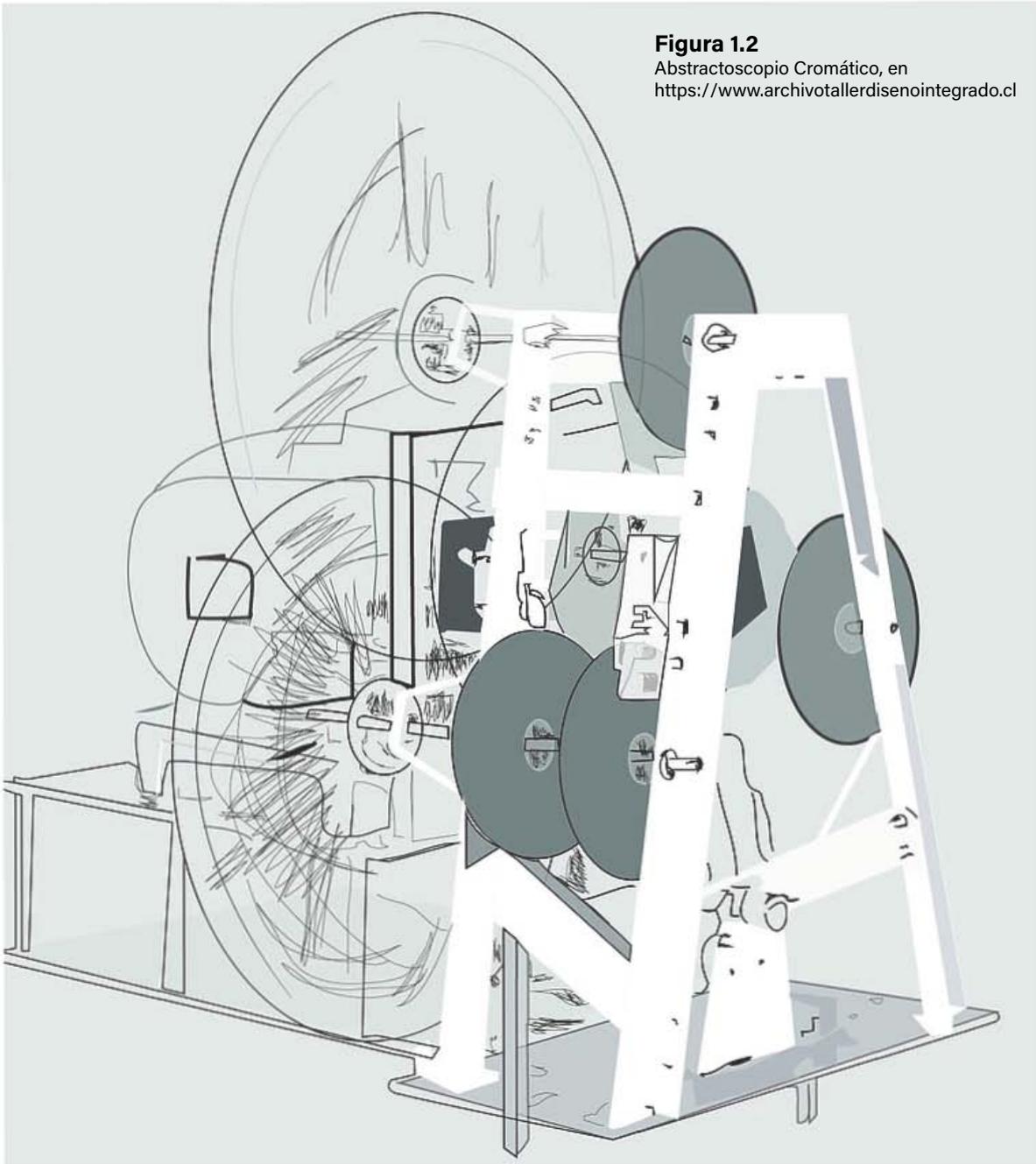


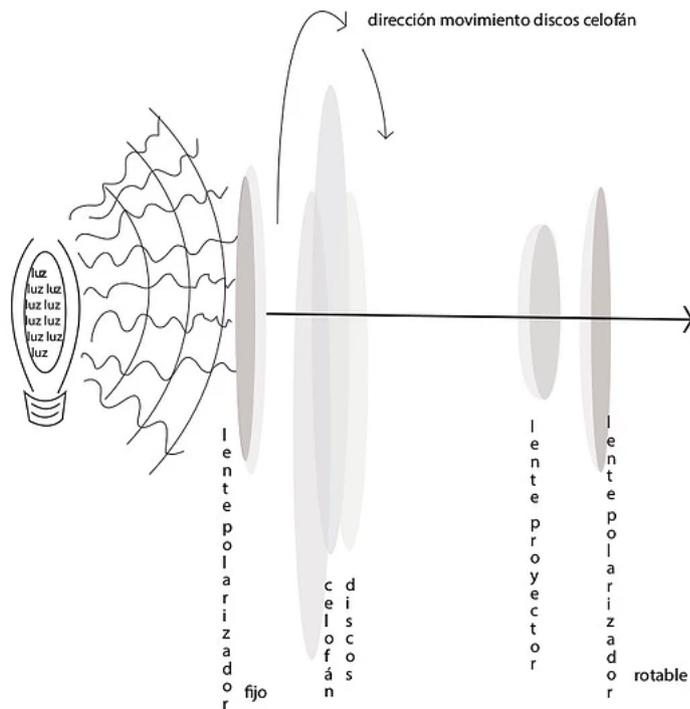
**Figura 1.1**

Abstractoscopio Cromático de Martinoya y Joël, en "*Leonardo*, Vol 1, no. 2, (1968): 171-173.

**Figura 1.2**

Abstractoscopio Cromático, en  
<https://www.archivotallerdisenointegrado.cl>





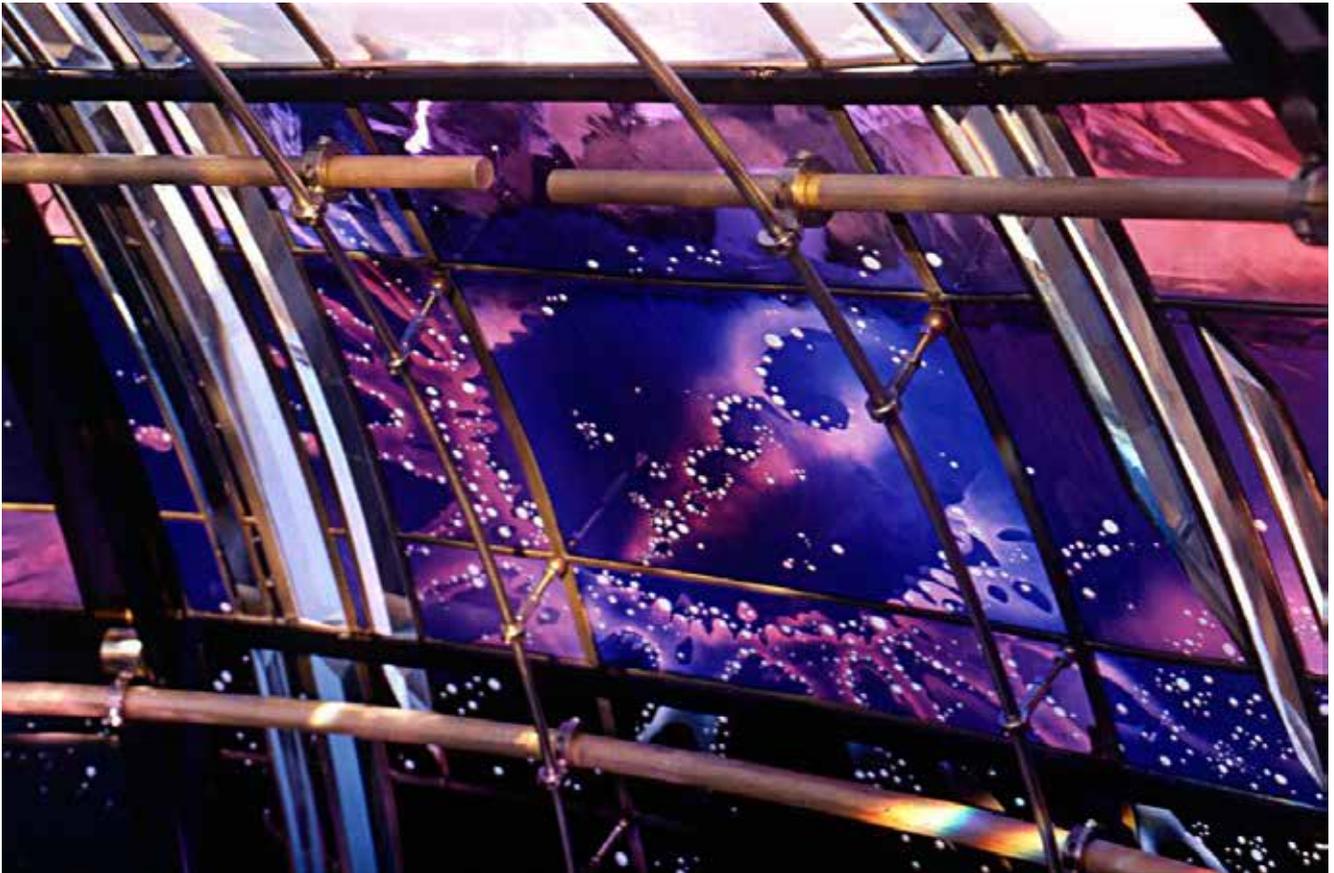
**Figura 1.3**

Boceto de Abstractoscopio cromático, en <https://www.archivotallerdisenointegrado.cl/>

Además de esta referencia destacada, existe otro proyecto que resulta un buen referente, debido al uso de elementos ópticos para generar imágenes y aplicarlas, en este caso, a un proceso no solamente artístico sino arquitectónico, me refiero a la pieza instalada en la Basílica *Santa Maria degli Angeli e dei Martiri* en Italia, un lucernario en forma de domo de cuatro metros de diámetro, obra del vitralista italiano Narcissus Quagliata en colaboración con el Dr. Salvador Cuevas Cardona, ingeniero óptico del Instituto de Astronomía de la UNAM, quien propuso la inclusión de tres lentes prismáticas que desviarán la luz del Sol y formarán la imagen del astro sobre el piso en las fechas de los solsticios y equinoccios.

Como se puede notar en las Fig. 1.4 a 1.7<sup>3</sup> esta pieza es muy sofisticada y de un elevado costo productivo, es referente fundamental para mí por la manera en que se accede al uso de elementos ópticos para formar imágenes, con base en estudios precisos de la arquitectura, geografía, luz y la manera en que ésta incide e interactúa con la materia. Acciones que obedecen justamente a mi interés principal y que anteceden al diseño de imágenes para una pieza de arte.

3 Imágenes e información de las mismas, recuperado de <http://revista925taxco.fad.unam.mx/index.php/tag/color/>

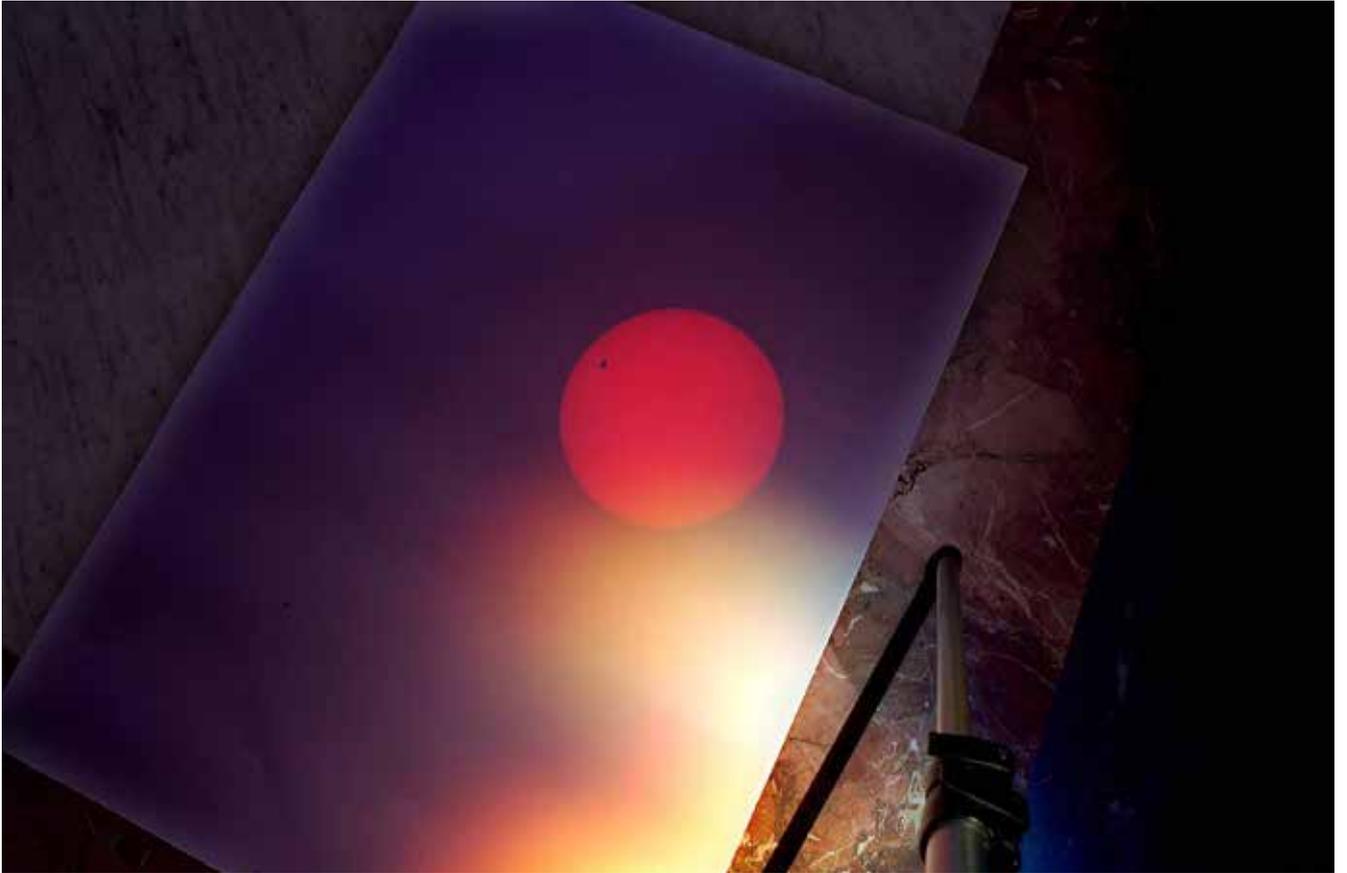


**Figura 1.4.**  
Detalle de Vitral en el Domo en la Basílica *Santa Maria degli Angeli e dei Martiri*.



**Figura 1.5**

Las tres lentes instaladas en la cara sur del domo.



**Figura 1.6**

Tránsito de venus en junio 8 de 2004 proyectada por la lente del verano. Foto de la imagen proyectada sobre un papel.



**Figura 1.7**

Dos imágenes del sol del 17 de agosto en la parte norte de la rotonda. Las imágenes provienen de la lente del equinoccio (amarilla-naranja) y de la lente del verano (naranja)

A continuación haré un breve recorrido de obras realizadas con luz, que representan un elemento referencial en la historia del arte realizado principalmente con este elemento. Al final de este apartado coloqué algunas imágenes con la obra de algunos artistas aquí mencionados, con la finalidad de procurar un acercamiento visual al itinerario. Las obras elegidas fueron con base en la estética pertinente que sustenta la referencia inmediata funcional para la presente investigación.

Iniciaré con la obra *Light Space Modulator*, realizada de 1921 a 1930 por el húngaro László Moholy Nagy (1895-1954), se trata de una escultura de metal que se mantiene colgada al techo mientras hace constantes movimientos circulares. La sombra impera en el discurso y es lograda por la incidencia de la luz artificial sobre la pieza compuesta por focos de diferentes colores, es considerada una de las primeras esculturas cinéticas eléctricas del siglo XX. En esta época, lo que se utilizaba eran lámparas de tungsteno, en este caso el artista trabajó con aproximadamente 70 lámparas luminosas, 5 faros de 100 watts y varias bombillas eléctricas de diferentes colores. Para la época en que esta pieza fue hecha, esta presencia de sombras y de movimiento tuvo que ser sin duda un proyecto innovador en el terreno del arte cinético, una corriente en donde la estética del movimiento es fundamental.

En la década de los cincuenta surgió el trabajo del futurista italiano Bruno Munari (1907-1998), llamado *Pittura Polarizada*, eran composiciones abstractas colocadas en soportes de diapositiva, las cuales, al ser observadas a través de un filtro polarizado de Polaroid, experimentaban una descomposición de la luz. Munari fue pionero del movimiento *arte programmata* y *arte cinético*, movimientos representados principalmente, de acuerdo con

Paula Barreiro<sup>4</sup>, por Vasarely, Schöffer, Yaacov Agam, Takis, Jesús Rafael Soto, Jean Tinguely y Paul Buri.

Un movimiento fuerte en materia de luz es el que nombraron *Light and Space Movement*, surgió en el sur de Los Ángeles en 1960. Hacían un arte relacionado con el *Op Art*, el minimalismo y la abstracción geométrica. De acuerdo a Butterfield<sup>5</sup> los artistas pioneros de este movimiento incluyen a Larry Bell, Robert Irwin y James Turrell, todos ellos nacidos en Norteamérica. En 1971, como parte del mismo movimiento, se presentó en público la exposición *Transparency, Reflection, Light, Space: Four Artists* (Transparencia, Reflexión, Luz, Espacio: Cuatro Artistas), organizada por la UCLA (University of California), donde se expusieron los trabajos de Robert Irwin, Craig Kauffman, Larry Bell y Peter Alexander<sup>6</sup>.

Otros artistas que también forman parte de este movimiento que trabaja con luz son John McCracken, Mary Corse, Ron Cooper, Tony DeLap quien fue mentor de Turrell y Nauman, viene del movimiento *OpArt* pero después se inscribió en el *ligh and space*. Helen Pasghian, Bruce Nauman, De Wain Valentine, Doug Wheeler, Laddie John Dill, Eric Orr, Maria Nordman, Ray Howlett, François Morellet, Dan Flavin y Julio Le Parc (Argentina,1928) fundador e integrante del *Grupo de Investigación del Arte Visual (Grav)*, movimiento de los años sesenta que surgió en París y cuyos integrantes lograban experiencias ópticas, cinéticas y a veces tangibles, como resultado de la investigación artística relacionada con efectos lumínicos, cromáticos y visuales.

---

4 Paula Barreiro López, *La abstracción geométrica en España, 1957-1969* (España: CSIC Press, 2009), 59.

5 Jan Butterfield, *The Art of Light and Space* (New York: Abbeville Publishing, 1993), 9.

6 Si desea conocer más: <https://hcommons.org/deposits/objects/hc:14292/datastreams/CONTENT/content>

Los artistas que hasta ahora he mencionado y en especial los artistas norteamericanos, se enfocaron en la luz, el volumen y la escala. Entre los materiales utilizados para lograr sus instalaciones destacan el vidrio, luces neón, fluorescentes, resina y acrílico. En palabras de Melinda Wortz, crítica de arte citada por Butterfield:

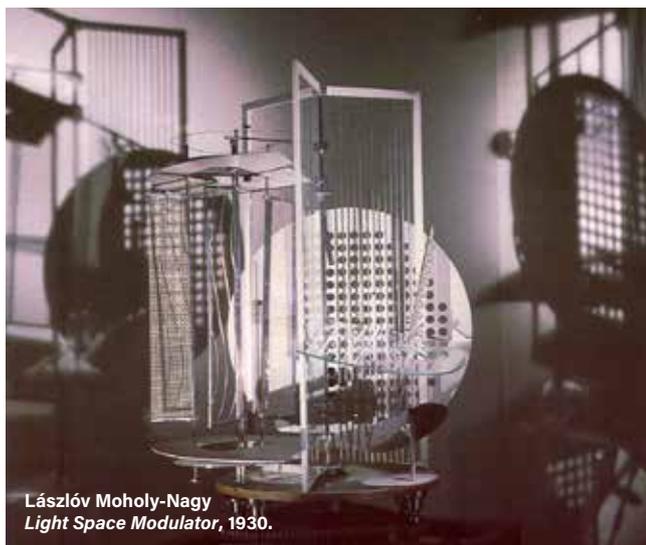
Las ilusiones encontradas en estos trabajos del Sur de California, son formas sólidas que se disuelven a través de la luz reflejada o proyectada [...] todo resultado de una interacción entre la luz ambiental y los objetos mismos. En otras palabras, estos trabajos incorporan la luz y el espacio del lugar donde se encuentran en lugar de pintar la ilusión de luz coloreada en un lienzo. <sup>7</sup>

Esta manera de hacer arte se desarrolló sobre todo a lo largo de la década de 1950, para 1960 ya había alcanzado un grado de dominio importante a lado de artistas con tendencias experimentales. Con base en esto Victor Vasarely escribió su *Manifiesto*, en donde aclara cómo para el artista es necesario centrar la obra en el problema del espacio, enfatiza también a propósito del surgimiento de una nueva concepción del arte en movimiento, que se servía de los nuevos medios técnicos que estaban a la mano del artista en esta época.

Después de los principales exponentes del arte con luz, han surgido más artistas, principalmente en Europa y Estados Unidos, que hasta ahora se mantienen activos con el movimiento, entre los más contemporáneos de este movimiento y entre los cuales algunos son referente para esta investigación puedo nombrar a Olafur Eliasson, Ann Veronica Janssens, Sophia Collier, Brigitte Kowanz, Hans Kotter, Chris Fraser, entre otros.

---

<sup>7</sup> Butterfield, *The Art of*, 14.



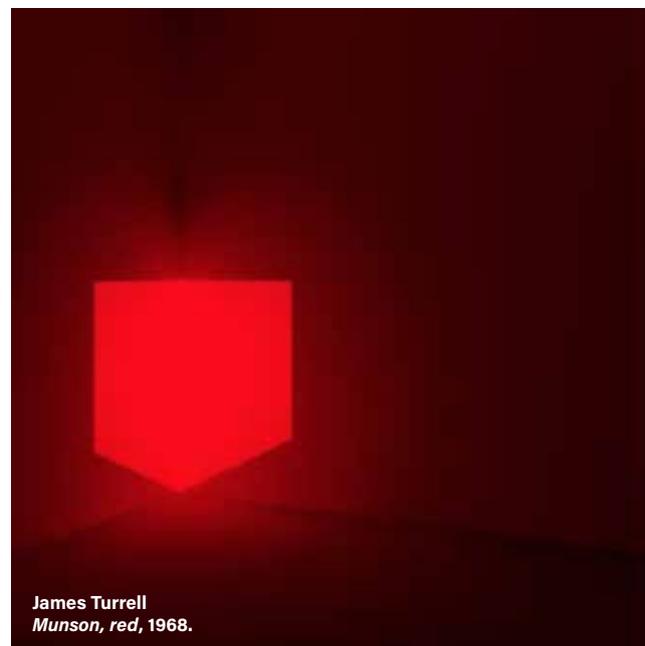
László Moholy-Nagy  
*Light Space Modulator, 1930.*



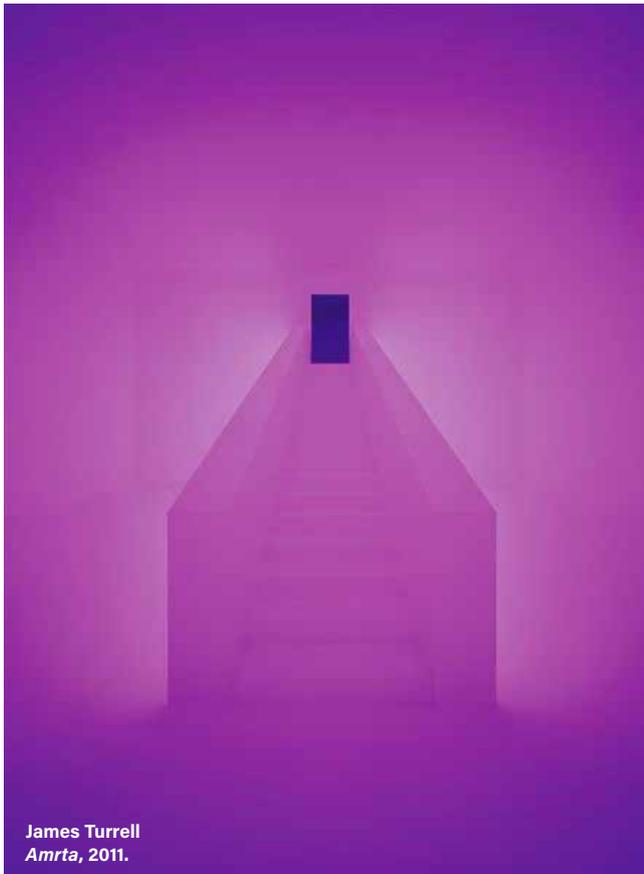
Robert Irwin  
*Light Column, 1970.*



Larry Bell  
*Vacuum coated glass, 1969-1970.*



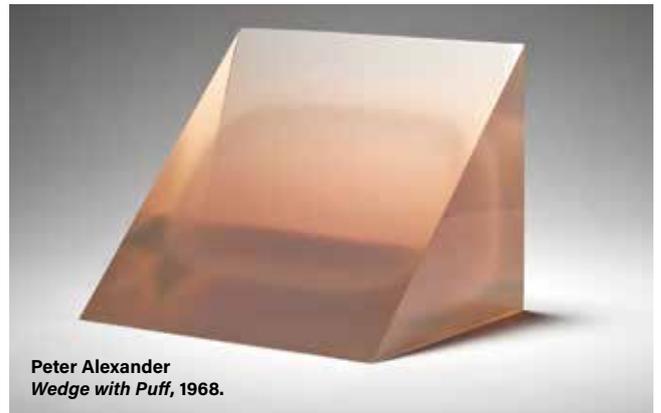
James Turrell  
*Munson, red, 1968.*



**James Turrell**  
*Amrta*, 2011.



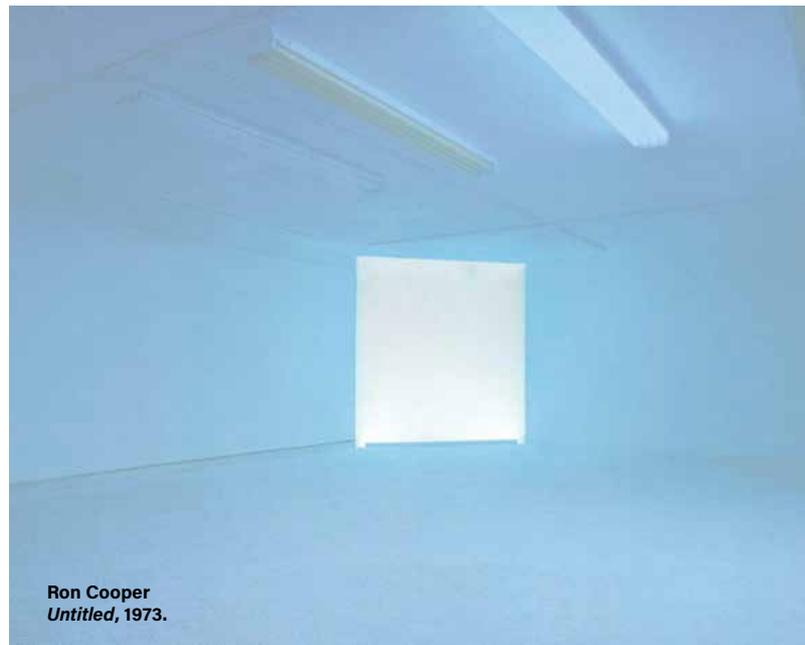
**Craig Kauffman**  
*Untitled*, 1969.



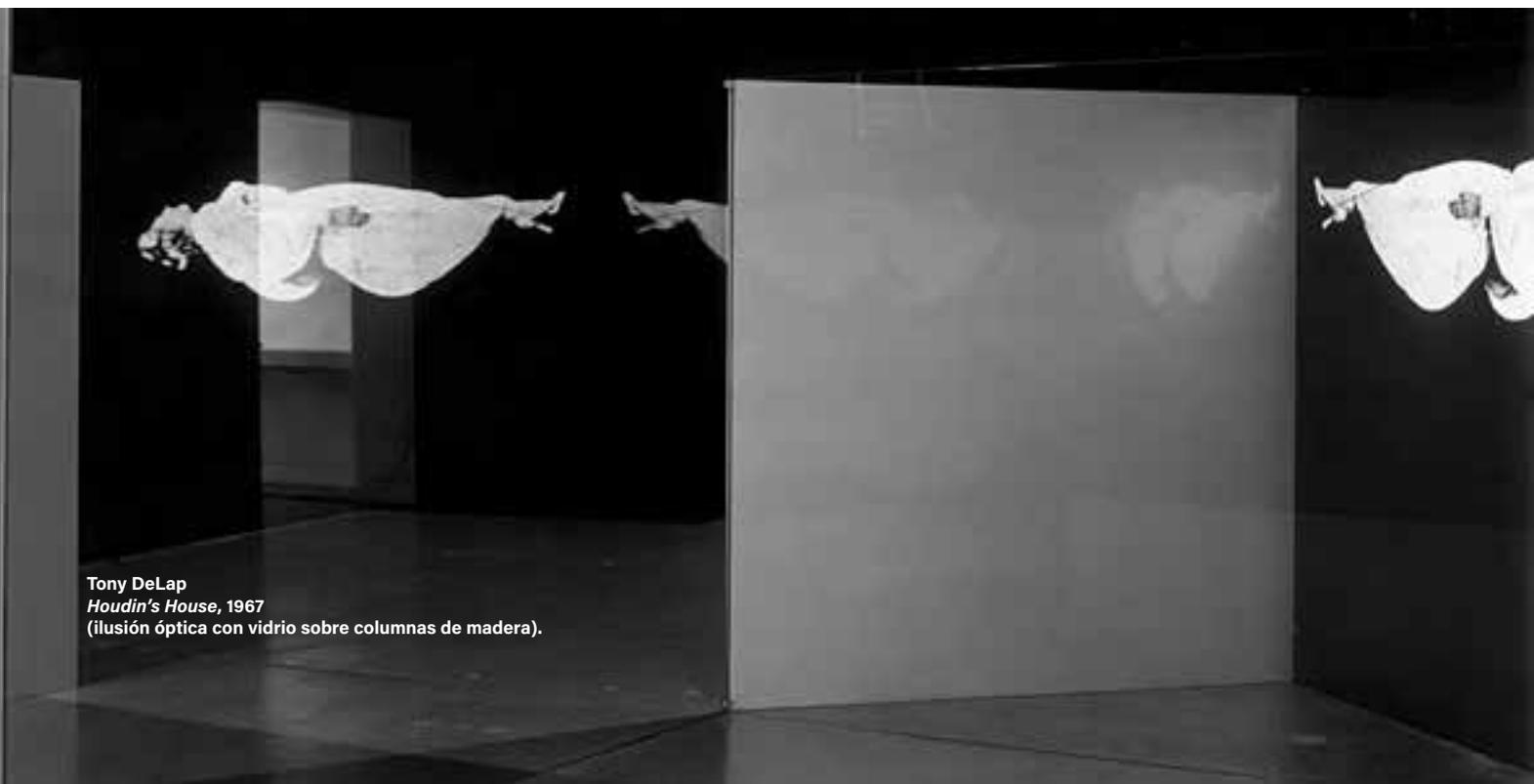
**Peter Alexander**  
*Wedge with Puff*, 1968.



Mary Corse  
*Untitled*, de la serie, *White Light Series*, 1966.



Ron Cooper  
*Untitled*, 1973.



Tony DeLap  
*Houdin's House*, 1967  
(ilusión óptica con vidrio sobre columnas de madera).



Helen Pashgian  
*Untitled*, estilo Light and Space, 1968.



De Wain Valentin,  
*Rainbow Ring*, 1972

Laddie John Dill  
*Light Sentence - Warm White*, 1971.

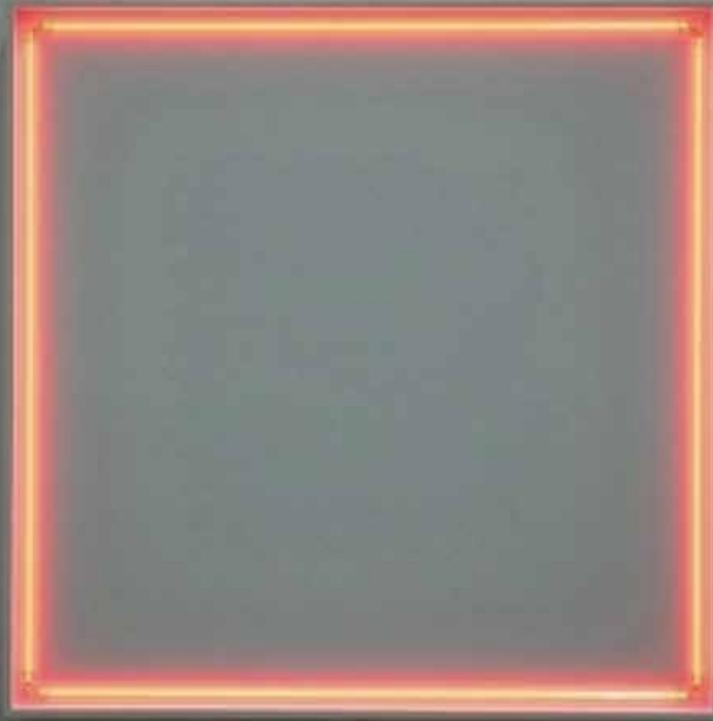




Bruce Nauman  
*Dream Passage*, 1983.



Doug Wheeler  
*SA MI DW 2 75, 1975*

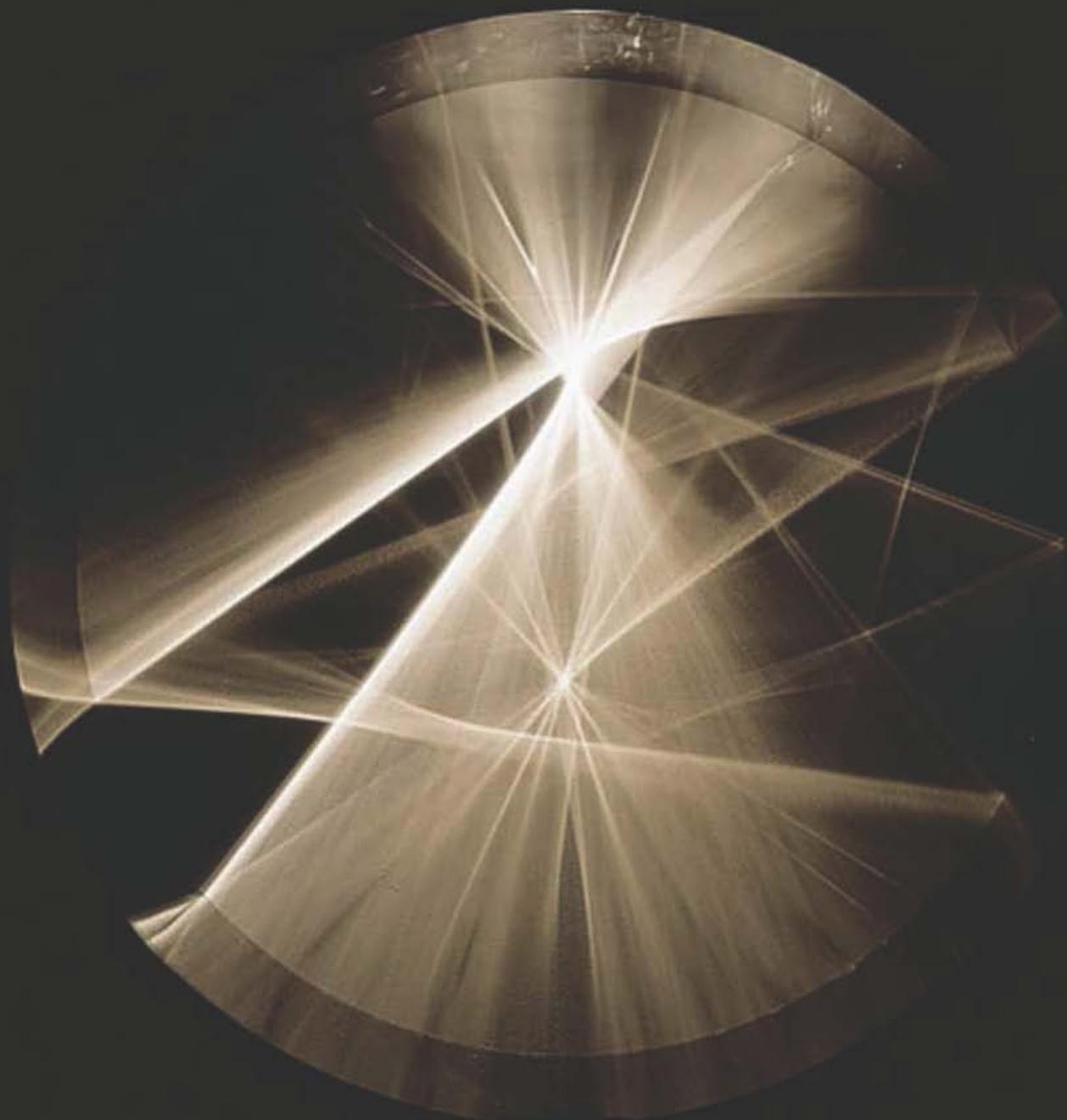


François Morellet,  
*4 rythmes interférents en formant un carré*, 1972.



Dan Flavin  
*Icons*, 1963





Julio Le Parc  
*Continuel-lumière cylindre, 1962.*



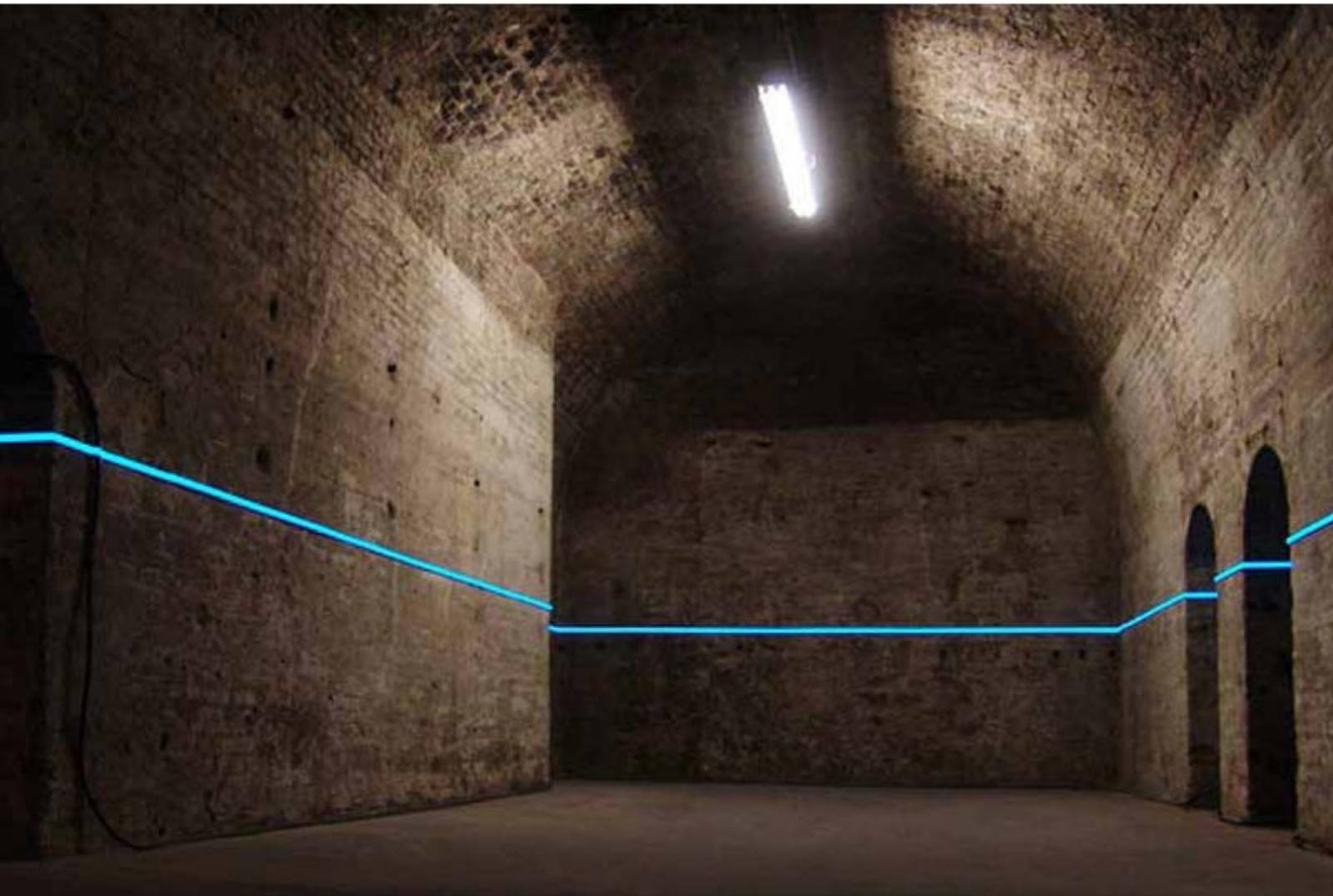
Ann Veronica Janssens  
*Untitled*, 2015.



Olafur Eliasson  
*Bauty*, 1993.



Sophia Collier  
*A Little Blue Ocean, 2015.*



Hans Kotter  
*Balance*, 2008.



Chris Fraser  
*Revolving Door*, 2015.

## CAPÍTULO 2

# LA FÍSICA DE LA LUZ

**E**n este capítulo se verán aspectos fundamentales relacionados con el color y sus mezclas, conocimiento indispensable para la planificación y montaje de piezas hechas con luz, se verán también las principales fuente de luz y su distribución espectral, las leyes físicas de la luz que han sido aplicadas en la parte experimental de esta investigación, las características de las principales lentes ópticas utilizadas en esta investigación y la función de los filtros ópticos.

Este apartado tiene la intención de sostener una explicación teórico-científica de las imágenes y el comportamiento del color que se observaron durante la fase experimental. Aunque fueron varias las leyes físicas estudiadas, solamente se explicarán los fenómenos que han sido aplicados durante el proceso de desarrollo de imágenes y escenas ligadas a las finalidades de esta investigación: reflexión, refracción y dispersión. El conocimiento de estas herramientas y teorías es fundamental para la metodología aquí presentada y facilitará la selección de los elementos correctos durante la etapa de planificación.

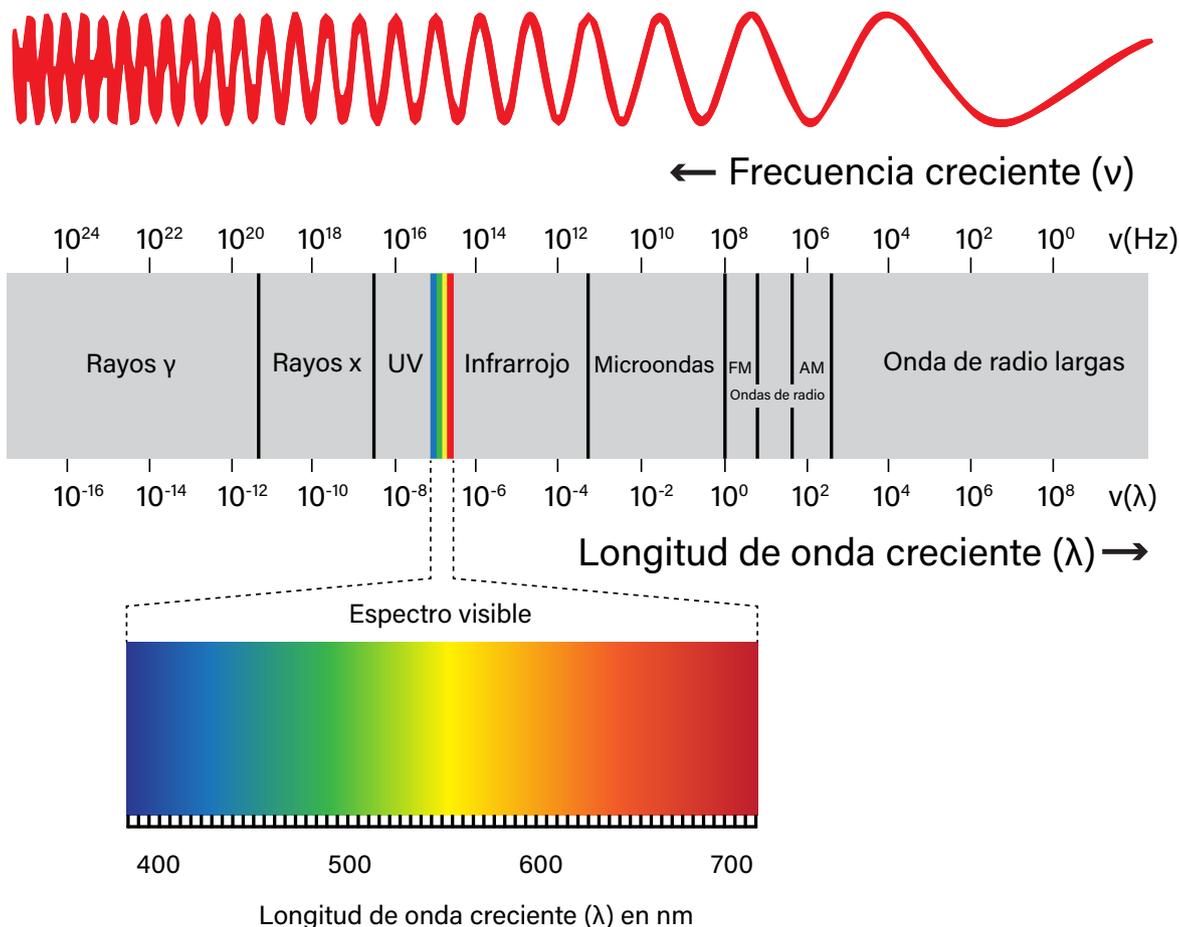
## **2.1 El espectro electromagnético y la luz visible.**

El espectro electromagnético se refiere al conjunto de ondas electromagnéticas o radiación electromagnética. Como se puede observar en la *Fig.2.1* "El espectro electromagnético representa todas las posibles frecuencias de energía electromagnética. Comprende desde longitudes de onda extremadamente largas (exposiciones a frecuencias extremadamente bajas como las de líneas de transmisión) hasta longitudes de onda extremadamente cortas (rayos X y rayos gamma) e incluye tanto la radiación ionizante como la no ionizante."<sup>8</sup> La luz visible que en la imagen se identifica por la aparición de colores, se encuentran en un rango de entre 380 nm<sup>9</sup> (violeta) hasta los 780 nm (rojo).

---

8 International Agency for Research on Cancer (IARC). *Non-ionizing radiation, Part II: Radiofrequency electromagnetic fields / IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. (2011 [citado en octubre de 2018] Lyon, France): <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/mono102.pdf>

<sup>9</sup> *nm* es la abreviación de nanómetro y es la unidad de medida utilizada universalmente para medir el espectro visible. Un nm equivale a 10<sup>-9</sup> metros.

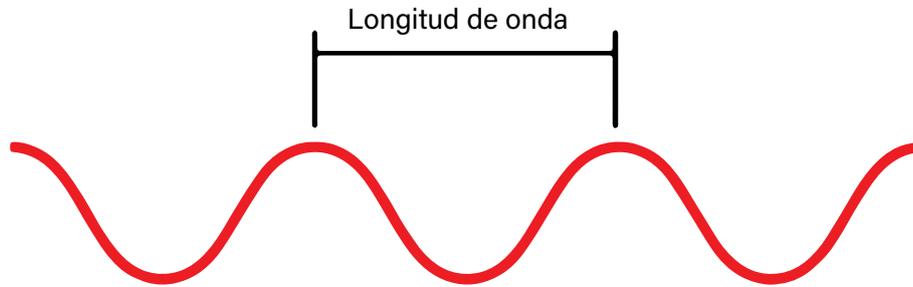


**Figura.2.1**

Espectro electromagnético, en <http://adrianredesdedatos.blogspot.com/>

En el caso de la luz, una onda la podemos entender como una oscilación periódica que transporta energía y que se mueve a través del vacío o de cualquier otro medio físico, como el agua, vidrio, aceite, entre otros. La longitud de onda se refiere a la distancia existente entre crestas consecutivas de las ondas. Las crestas

y los valles son los puntos donde la onda alcanza su máximo y su mínimo valor respectivamente, *Fig.2.2*. Una onda electromagnética está conformada por campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan en el vacío con una velocidad constante de 300 000 km/s.

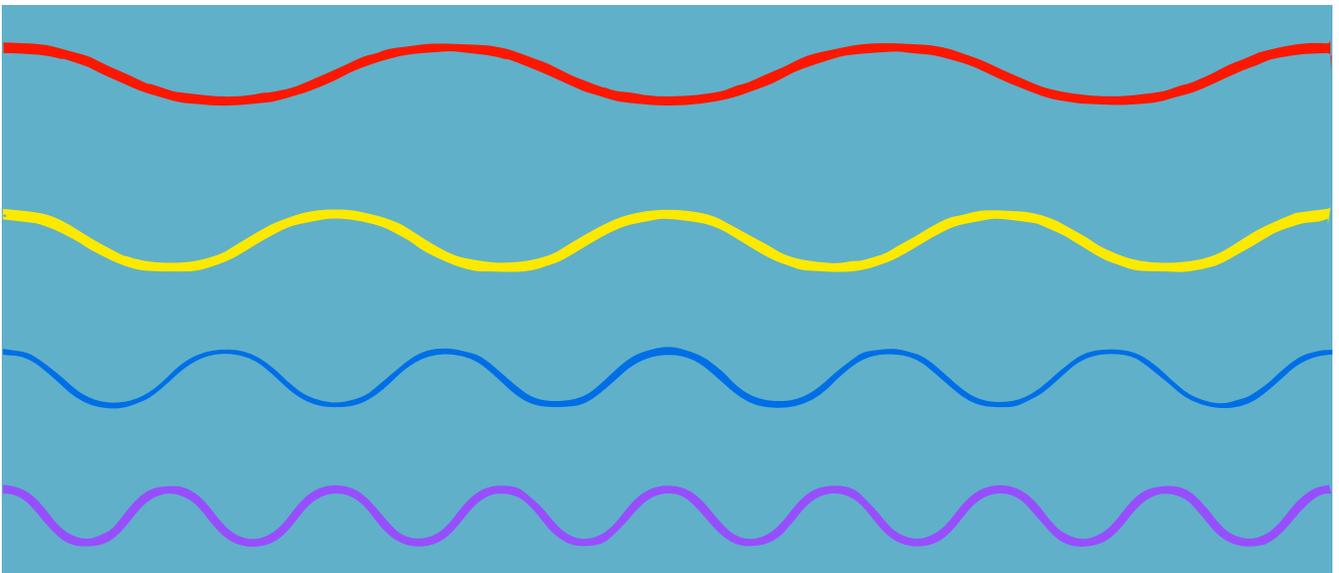


**Figura 2.2**

Longitud de onda. Crédito de imagen: NASA

A cada uno de los colores del espectro de luz visible corresponde una longitud de onda diferente. Como se puede ver, por ejemplo, en la *Fig. 2.3*, la luz roja tiene una longitud de onda más larga que la luz azul. Cuando todas las longitudes están presentes en proporciones e intensidades iguales lo que percibimos es luz blanca,

que es producto de la mezcla de longitudes de onda. Podemos separar las longitudes de onda o colores, cuando hacemos incidir luz blanca a través de un prisma, esto corresponde al fenómeno conocido como dispersión y se explicará más adelante.



**Figura 2.3**

Diferentes longitudes de onda. Crédito de imagen: NASA

Más allá del espectro de luz visible se observan los rayos infrarrojos hasta las ondas de radio, que son las que mayor longitud de onda tienen. Como es claro en la *Fig.2.3*, entre más corta es la longitud de onda, mayor es la frecuencia, esta última se refiere al número de veces que la vibración se repite por unidad de tiempo.

Las ondas con menor frecuencia que la luz mantienen una mayor longitud de onda, por eso no entran en contacto con objetos, como las frecuencias de radio, por ejemplo. Por el contrario las ondas de frecuencias que son mayores a las de la luz, tienen una longitud de onda muy pequeña, capaz de atravesar a la materia, de modo que la interacción con ésta, sea por medio de la reflexión o absorción, sólo se da en la franja del espectro que recorre del violeta hasta el rojo y por eso podemos ver los objetos.

Cada vez que la luz entra en contacto con una gran cantidad de materia, tiene lugar algo que podríamos representar como un acto de cooperación que surge cuando un flujo de fotones atraviesa e interacciona con toda una serie de átomos suspendidos (a través de campos electromagnéticos) en el vacío. Los detalles de tal viaje determinan que el cielo sea azul y la sangre roja, que la córnea sea transparente y la mano opaca, que la nieve sea blanca y la lluvia no [...]. Los procesos de transmisión, reflexión y refracción son manifestaciones macroscópicas del esparcimiento o dispersión que tiene lugar a un nivel submicroscópico.<sup>10</sup>

En el terreno del arte saber cómo se conforma el espectro electromagnético y a qué atiende el espectro de luz visible, es clave debido a que el uso de los colores luz y sus combinaciones, serán en esta metodología la

10 Eugene Hecht, *Óptica*, (Madrid: Adisson Wesley Iberoamericana, 2000), 87.

herramienta fundamental que entrará en contacto con la materia y con los elementos ópticos que se utilizan en la formación de imágenes y experiencias visuales.

Considerando que el espectro de luz visible viene de la luz solar, nos podemos dar cuenta de que es solamente una pequeña parte del más amplio espectro de las ondas electromagnéticas que atraviesan el espacio las que son percibidas por el ojo humano, que es un sistema receptor y selector que absorbe solo parte de esas ondas luminosas, las que va desde los 400 a 700 nanómetros, es decir del violeta hasta el rojo.

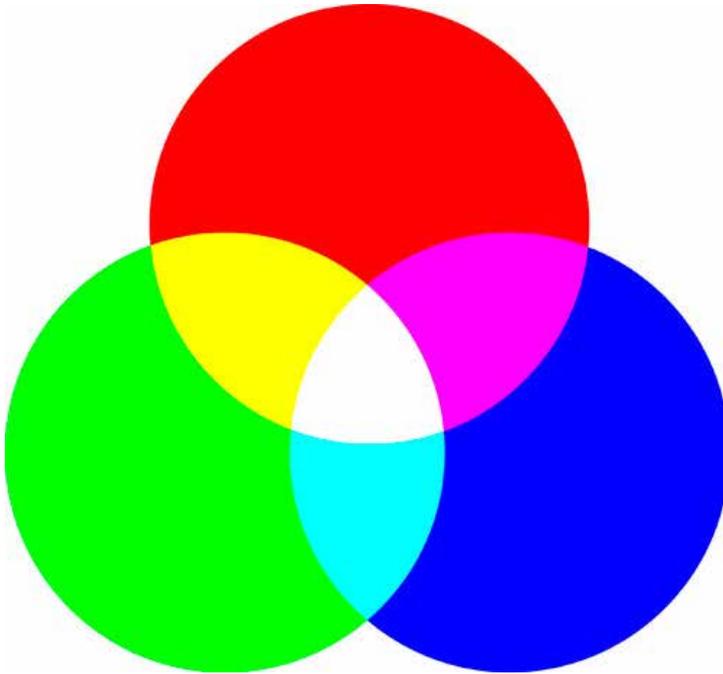
Es importante tener siempre en cuenta la diferencia entre el *color luz* y el *color pigmento*. El primer tipo se refiere a los que vienen de una fuente luminosa, sea el sol, un foco de luz incandescente, un LED u otra fuente, mientras el *color pigmento*, también conocido como color materia se refieren a los que provienen de tintas, óleo, pigmentos, anilinas, pintura, crayón y otro materiales con los que se puede dar color a objetos. En este terreno y para esta investigación, el énfasis del estudio y del conocimiento del color se basa en la aplicación de los colores luz, para ello es importante dejar en evidencia inmediata los tres colores básicos con los que podremos trabajar durante la parte experimental de la investigación y las características fundamentales que facilitarán el entendimiento de la luz, del color y sus aplicaciones en el arte.

## **2.2 Colores Primarios Aditivos (RGB) y Sustractivos (CMYK).**

Los colores luz y los colores pigmento tienen sus propios colores primarios, que son aquellos que no se pueden obtener por la mezcla de otros. Los colores pri-

marios aditivos o llamados también colores luz son el rojo, el verde y el azul: RGB (Red, Green, Blue), colores

que al unirse producen todos los colores del espectro visible.



**Figura 2.4**

Colores Primarios Aditivos RGB.

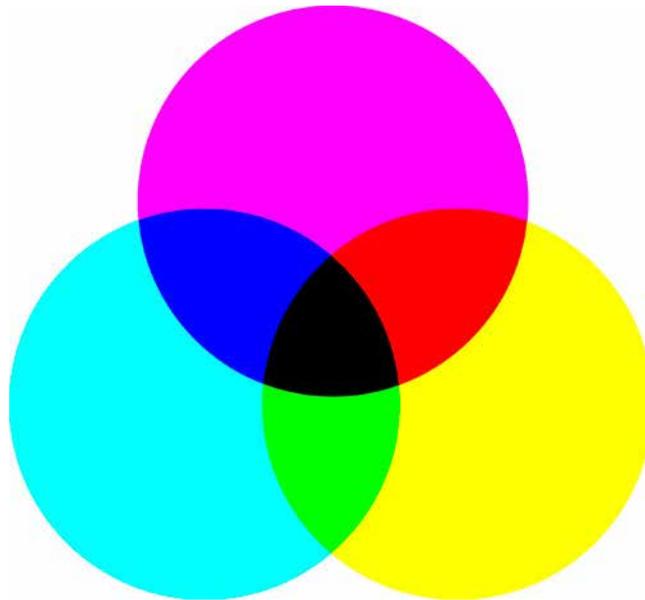
Como se puede ver en la *Fig. 2.4* la mezcla de los tres colores primarios aditivos RGB dan como resultado:

- Verde + Azul = Cian
- Rojo + Azul = Magenta
- Rojo + Verde = Amarillo
- Rojo + Azul + Verde = Blanco

El modelo de adición significa que para constituir otros colores se accede a la mezcla por adición de los tres colores primarios RGB, esta superposición se denomina síntesis aditiva, cuando se combina un color prima-

rio con otro en proporciones iguales, se obtienen los colores aditivos secundarios que son cian, magenta y amarillo. Cuando se combinan los tres colores primarios, también en proporción idénticas, es cuando se obtiene el blanco, en cambio la ausencia de los tres da como resultado el negro (la oscuridad).

Cuando se sabe la relación que existe entre estos colores, es más factible tener la habilidad para crearlos y con ello adquirir una mayor efectividad en el trabajo y construcción de piezas o situaciones escénicas que impliquen la luz como elemento activo.

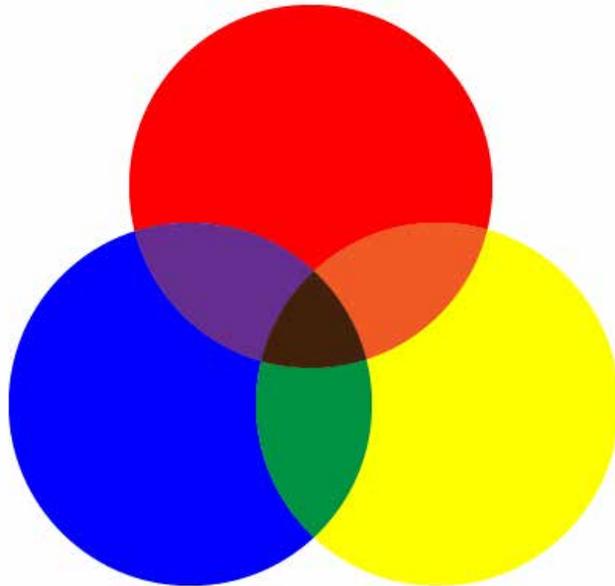


**Figura 2.5**  
Colores Primarios Sustractivos CMYK.

A diferencia de los colores luz o aditivos, cuando se utiliza pintura, lápices de colores, acrílicos o cualquier tipo de tinta, estamos hablando de colores pigmento o sustractivos y son colores basados en la luz que reflejan los pigmentos aplicados a las superficies. En este caso los colores primarios son CMYK, siglas que en inglés corresponden a Cian, Magenta, Yellow y Key o Negro. Es un modelo que se basa en la absorción de la luz, donde por ejemplo si vemos la *Fig. 2.5*, en la mezcla del pigmento cian con el pigmento magenta este último absorbe la luz verde del cian y a su vez éste absorbe la luz roja del magenta, lo que da como resultado visible la luz azul.

A diferencia de la mezcla de los tres colores luz primarios, que nos da el blanco, la mezcla de los tres colores pigmento primarios produce el negro, el color más oscuro que no contiene luz, juntos absorben toda la luz. Para este modelo, la mezcla de los tres colores primarios sustractivos CMYK dan como resultado:

- Amarillo + Cian = Verde
- Amarillo + Magenta = Rojo
- Magenta + Cian = Azul



**Figura 2.6**  
Colores Primarios Sustractivos RYB.

El sistema CMYK es el que sucedió al antiguo RYB, es decir Red, Yellow y Blue (rojo, amarillo y azul), utilizado especialmente en artes gráficas, en este caso las mezclas que se dan con estos pigmentos son:

- Amarillo + Rojo = Naranja
- Rojo + Azul = Violeta
- Azul + Amarillo = Verde

### 2.3 Las fuentes de luz

Una fuente de luz o luminosa, es un objeto que emite luz de manera natural o artificial. Existe una amplia diversidad y cada una de ellas emite una radiación electromagnética distinta, tiene una curva de distribución espectral diferente con lo que quedan definidas sus propiedades y diferencias. La curva de distribución espectral del sol tiene un espectro continuo mientras

otras fuentes no lo tienen. Conocer estas características espectrales es indispensable para decidir qué tipo de fuente se necesita y qué calidad en el color se obtendrá en una pieza, para esto se deben tener en cuenta los diagramas espectrales que dan cuenta de la composición de los colores que tiene una fuente.

En el apartado donde se explicaron las características principales de los colores luz, se evidencia que “la luz blanca es realmente una mezcla de todos los colores del espectro visible, que el prisma [...] despliega la luz, separándola en sus colores constitutivos.”<sup>11</sup> A este efecto se le conoce como dispersión, consiste en la separación de las distintas longitudes de onda que conforman el rayo incidente, es decir la descomposición de la luz blanca en los distintos colores que contiene, *Fig 2.7*.

<sup>11</sup> Hecht, *Óptica*, 77.

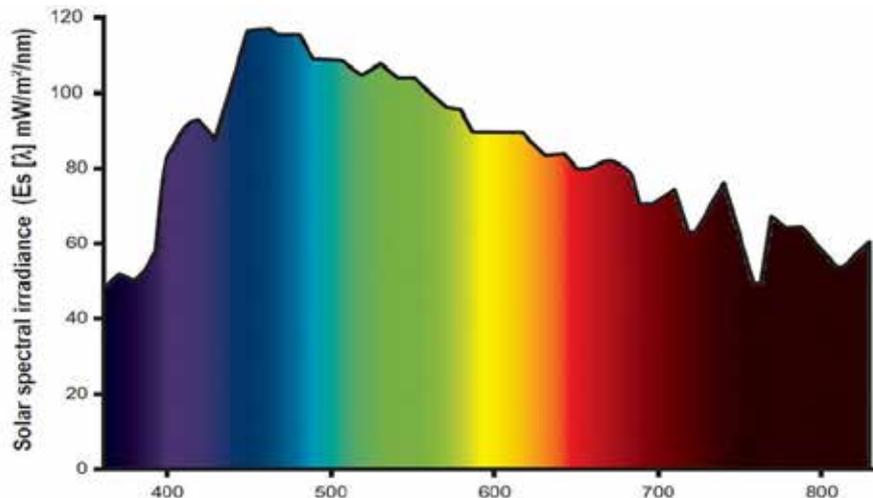


**Fig. 2.7**

Espectro continuo. En [www.ecured.cu](http://www.ecured.cu)

La distribución espectral de energía lumínica deja conocer la composición del color de cualquier tipo de luz emitida por una fuente luminosa y su temperatura de color determinada por la proporción de longitudes de onda grandes y cortas emitidas. Las fuentes de luz se caracterizan por tener, de manera independiente, una

intensidad distinta para cada una de las longitudes de onda (colores) del espectro visible. El sol es la principal fuente de emisión de luz blanca, en la *Fig. 2.8* se ve su espectro a una temperatura aproximada de 6500K, emitida a medio día. Por el contrario, durante la puesta del sol, la temperatura oscila alrededor de los 3000K.

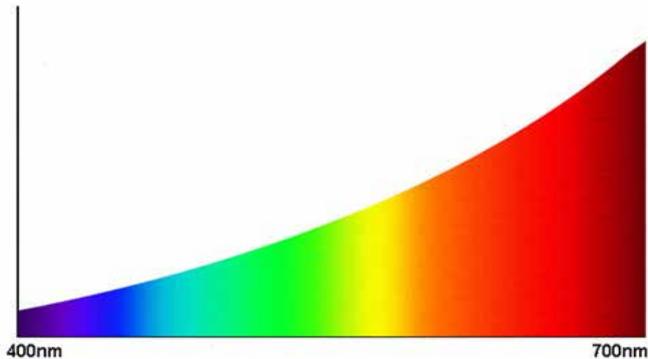


**Figura 2.8**

Distribución espectral, luz solar a medio día. En <https://linasoro-optika.eus/>

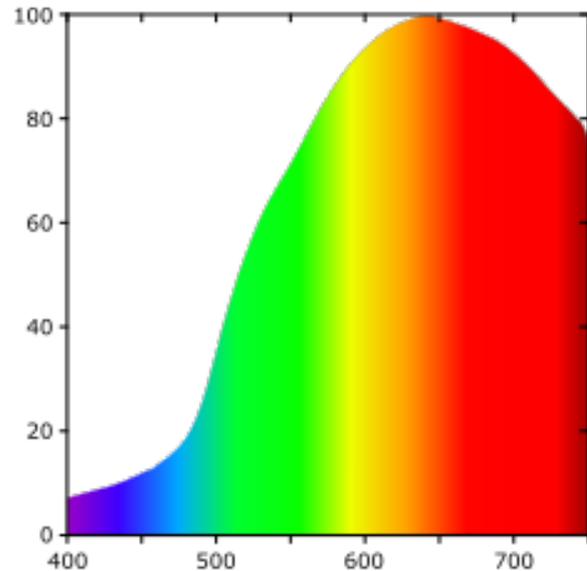
Lo que se se observa en la *Fig. 2.8* es que la luz procedente del sol comprende todas las longitudes de onda del espectro visible en proporciones variables, lo que resulta un parámetro importante para calificar la calidad de luz blanca que pueden ofrecer otras fuentes artificiales. Por ejemplo, las fuentes incandescentes fabricadas con filamento de tungsteno o las que con-

tienen gas halógeno, emiten su luz en un espectro continuo, es decir en todas las radiaciones del espectro, aunque no genera tanta energía luminosa en el rango azul del espectro como lo hace el sol y muestra una mayor proporción en los infrarrojos, por tanto es una luz amarillenta y su distribución espectral corresponde a una temperatura de aproximadamente 2856K.



**Figura 2.9**

Distribución espectral de una luz incandescente.  
En <http://www.quantotec.com>

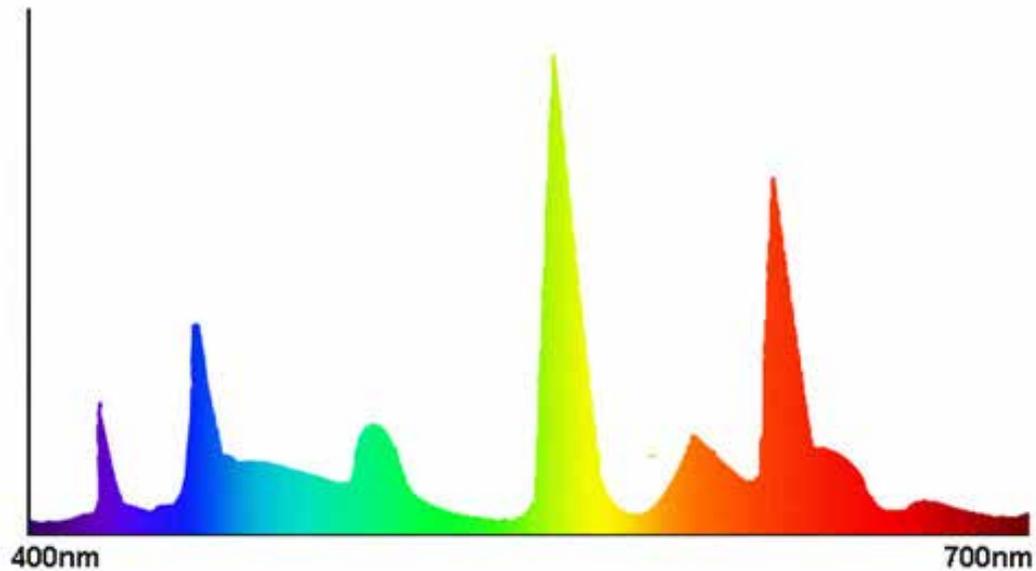


**Figura 2.10**

Distribución espectral de una luz halógena.  
En <https://entrecieloytierra.com/>

Otro proceso que se utiliza para producir luz blanca son los tubos fluorescentes, generalmente utilizados en hospitales o negocios. La *Fig. 2.11* muestra la distribución espectral de esta fuente, en la actualidad existen tubos con una amplia gama de temperatura

de color, desde los 2700K hasta los 10000K, el blanco aquí corresponde a 5000K, de modo que este tipo de fuentes pueden dar luz desde amarilla hasta azul. En esta figura se muestra la distribución espectral con una correspondencia de 4000K aproximadamente.

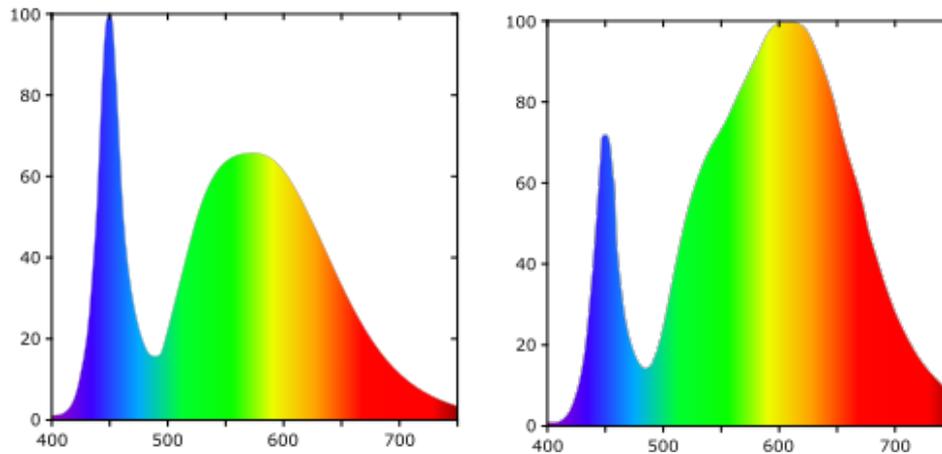


**Figura 2.11.**

Distribución espectral de una fuente fluorescente. En <http://www.quantotec.com>

La última generación de fuentes luminosas corresponden a la luz LED, diodos con un espectro que presenta por lo general un pico de emisión en la zona del azul y

una curva más extensa para el resto de las longitudes de onda, cuya relación se altera de acuerdo a la temperatura de color, como se ve en la Fig. 2.12.

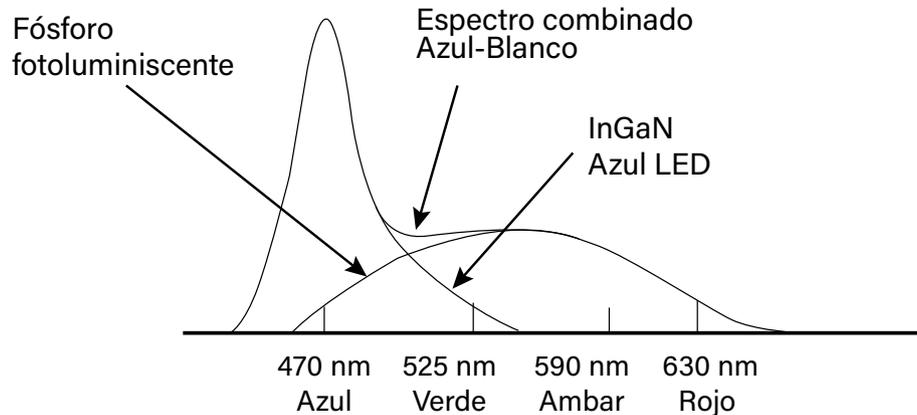


**Figura 2.12**

Distribución espectral luz LED a 4000K y 3000K respectivamente. De <https://entrecieloytierra.com/>

Para obtener luz blanca con esta fuente, existen dos caminos, en el primero se combinan diodos de color rojo, verde y azul (RGB), la mezcla es percibida por el ojo humano como blanco. El segundo camino es a través de un diodo LED de luz azul o violeta, acoplado a

uno o más luminofósforos con el objetivo de obtener temperaturas de color variables. Parte de la luz azul se convierte en un ancho espectro amarillo, la combinación de estos dos resulta en una luz con apariencia blanca azulada, *Fig 2.13*.



**Figura 2.13**

Distribución espectral de un LED azul-blanco. En <http://www.edutecne.utn.edu.ar>

La distribución espectral de un LED es pequeña, con anchos de banda de 17 nm para los LEDs de AlInGaP y 35nm para InGaN. Esto significa que los LEDs producen luz altamente saturada y casi monocromática. El color de un LED se especifica con su longitud de onda dominante [...], los LEDs de AlInGaP producen colores rojos ( 626 a 630 nm), rojo-naranja (615 a 621nm), naranja ( 605nm) y ámbar (590 a 592nm), mientras los InGaN producen colores verdes (525nm), azul-verde (498 a 505nm) y azul (470nm).<sup>12</sup>

Es importante tener en cuenta que esta fuente, elegida como una de las principales en la parte experimental

12 Beatriz M. O´Donell, Jet.al., "Fuentes luminosas", [Citado en agosto 2019] <http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/cap04.pdf>,60.

de esta investigación, es sensible al calor y en altas potencias emite alto porcentaje de calor, por lo tanto se requiere el uso de disipadores adecuados al tamaño y potencia de cada uno de los LEDs.

El organismo internacional encargado de establecer estándares de iluminación es la CIE, que es la Comisión Internacional de la Iluminación, sus siglas corresponden a su nombre en francés *Commission internationale de l'éclairage*, fue fundada en Viena, Austria en 1931 y es reconocida como autoridad internacional en luz, iluminación, color y espacios de color. "Es una organización dedicada a la cooperación internacional y al intercambio de información entre sus países miembros sobre todas las materias relacionadas con la ciencia

y el arte de la iluminación. Concretamente, según sus actuales estatutos, la CIE es una organización técnica, científica y cultural sin ánimo de lucro.”<sup>13</sup>

Entre las actividades de esta Comisión está el desarrollo de patrones básicos y procedimientos metrológicos en el campo de la luz y la iluminación, “abarcando temas fundamentales como visión, fotometría y colorimetría, incluyendo las fuentes de radiación naturales y artificiales en el rango ultravioleta, visible e infrarrojo del espectro, las aplicaciones relativas al uso de la luz en exteriores e interiores, los efectos medioambientales y estéticos, así como los medios de producción y control de la radiación.”<sup>14</sup>

Otra fuente de interés para esta investigación es el láser, que emite una luz y una distribución espectral muy diferente a las fuentes que hasta ahora he explicado. Es una fuente de emisión monocromática, cuya radiación

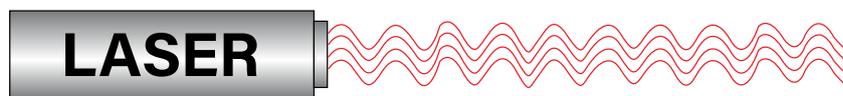
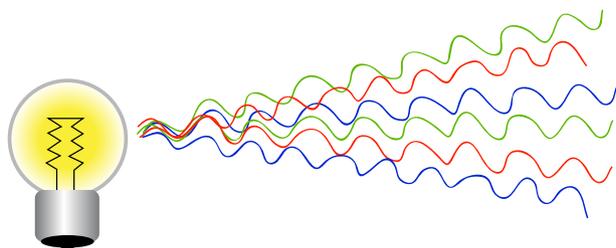
13 Antonio Corróns, Joaquín Campos y Manuel Melgosa, “La Comisión Internacional de Iluminación (CIE)”, *Comité Español de Iluminación*, [citado en julio de 2019] <https://www.ceisp.com>, 2.

14 Corróns, *La Comisión*, 2.

corresponde casi en su totalidad a una única transición energética, por lo que el ancho de banda, o longitud de onda, es muy pequeño. El tipo de luz que genera un láser es colimada, es decir que los rayos de luz viajan paralelos y hacia una misma dirección, esto es porque en la cavidad del láser están colocados casi de forma paralela, dos espejos cóncavos enfrentados entre sí, que limitan el haz final de láser en un camino perpendicular a los espejos. Dentro de la cavidad del láser se activa la emisión estimulada, donde los fotones van y vienen entre los espejos, ese estado de excitación hace que se multipliquen, por el haz saldrá una multitud de fotones, lo que da lugar a una amplificación de la luz. La radiación láser conserva una divergencia mínima, por tanto se puede proyectar a largas distancias sin que el haz (rayo) se esparza, mantiene toda la energía en una sección transversal pequeña.

En resumen, una fuente de luz láser es más cercana a un espectro monocromático debido a que el ancho de banda es más pequeño, puede ser incluso menor a 1nm, por tanto los colores se perciben mucho más puros respecto a la emisión de una fuente de luz LED.

**Luz  
incandescente**

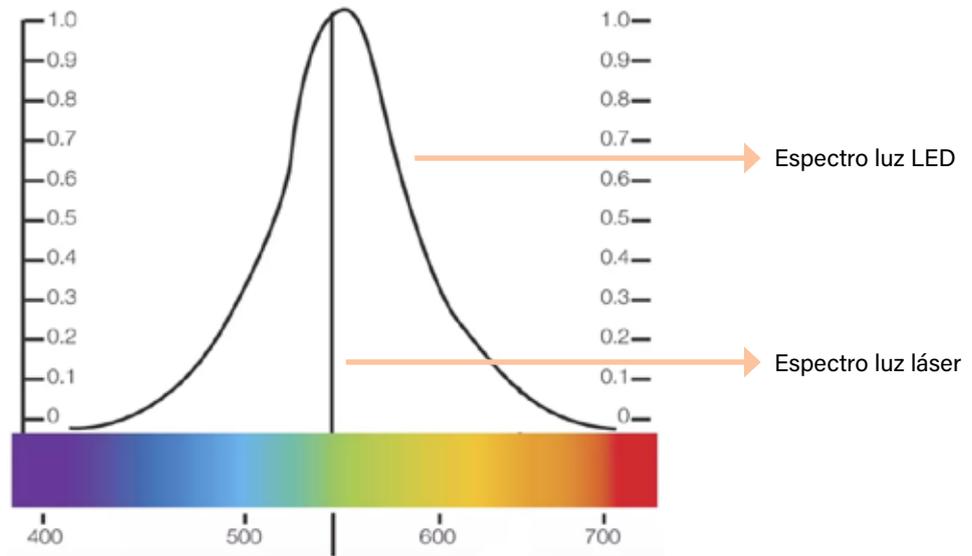


**Figura 2.14**

Diferencias entre fuente de luz blanca y un láser. En <https://ferrosplanes.com/tipos-laser/>

Otra característica de la luz láser es la coherencia espacial y temporal, la primera corresponde un haz que permanece con un tamaño pequeño al transmitirse por

el vacío por largas distancias, la coherencia temporal se refiere a la capacidad para concentrar la emisión en un rango espectral muy estrecho, observable en la Fig. 2.15.



**Figura 2.15**

Distribución espectral de un Led y un láser verde. En [www.sola.at](http://www.sola.at)

El uso de esta fuente, en el caso de la presente investigación, sirve para aplicaciones donde sea necesaria una fuente controlada con energía muy localizada, una luz muy brillante y puntual para lograr la proyección de imagen. Una aplicación y resultados estéticos basados en la calidad de esta luz, se podrán observar más adelante en el capítulo dedicado a las pantallas nulas por refracción, en donde las imágenes logradas tienen un alto contraste. También se observan en los resultados experimentales basados en la imagen evocativa del Sol (Capítulo 4), donde la proximidad estética se logra muy bien con el uso de un láser, resultado que no provocó el uso de una fuente LED.

## 2.4 Leyes físicas de la luz aplicadas a la metodología planteada

Es importante tener en cuenta que en la historia de la humanidad, el estudio de la naturaleza de la Luz se ha hecho desde diferentes perspectivas y disciplinas. La que aquí interesa es la revisión de la teoría de la luz desde la física y en especial desde la óptica, teorías que se han desarrollado paulatinamente desde aproximadamente el Año 3000 a. C. Se hará una revisión a partir de los fenómenos que tendrán lugar durante la fase experimental de esta investigación.

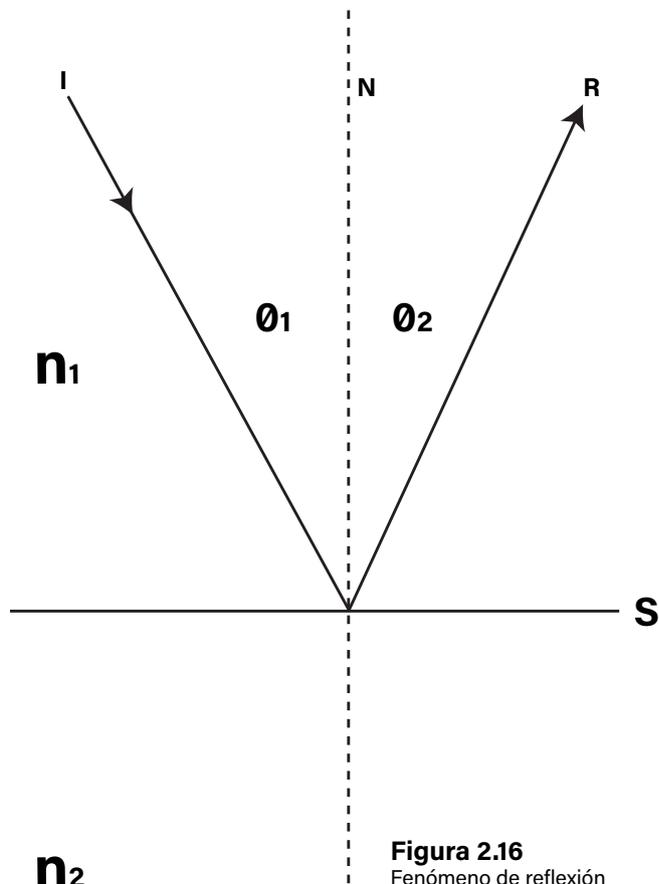
## 2.4.1 Reflexión

La reflexión es un cambio en el rumbo de la luz, que al llegar a una superficie de separación reflectante (S) regresa al mismo medio por el que se propagaba, con un ángulo igual al ángulo de incidencia. La ley de la reflexión es:

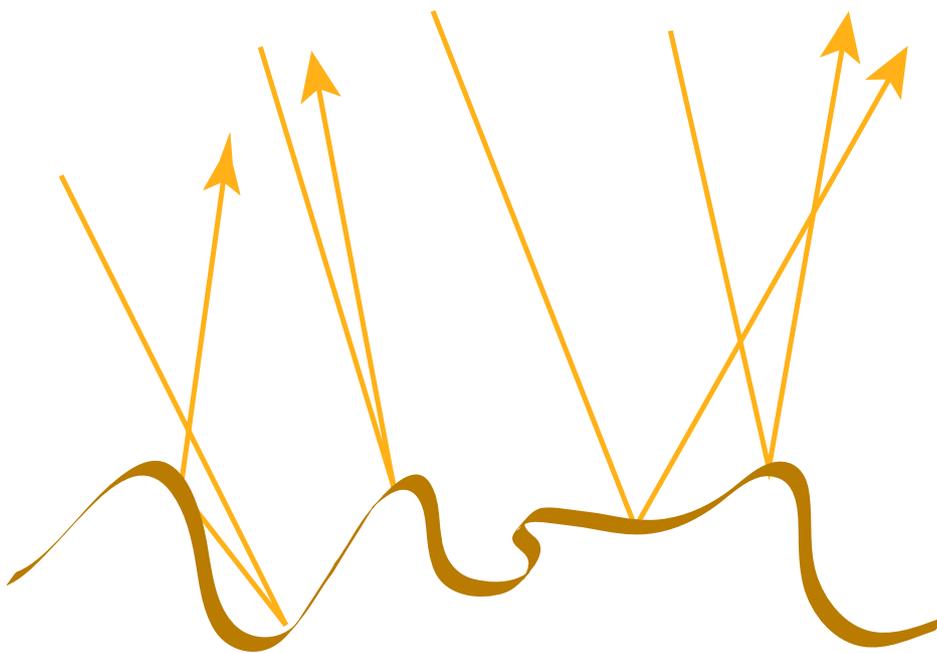
$$\theta_1 = \theta_2$$

El rayo incidente (I) al juntarse con la superficie (S) y ésta con la normal (N) forman lo que se denomina ángulo de incidencia. La normal es una recta imaginaria perpendicular a la superficie de separación de los dos medios en el punto de contacto del rayo. El rayo reflejado y la normal (RN) forman el ángulo de reflexión y el rayo refractado junto con la normal forman el ángulo de refracción. El rayo incidente, el rayo reflejado (R) y la normal están en el mismo plano, Fig. 2.16.

Cuando la superficie reflectora a la que llega el rayo de luz es lisa, éste se reemite por el mismo medio mientras forma un haz muy bien definido, a esto se le conoce como reflexión especular, mientras que la reflexión difusa Fig. 2.17, se da cuando la superficie reflectora no es lisa, en este caso, aunque el ángulo de incidencia seguirá siendo igual al de reflexión, es decir  $\theta_1 = \theta_2$  será para cada rayo incidente, por tanto el conjunto de rayos se verá reflejado por todos lados.



**Figura 2.16**  
Fenómeno de reflexión



**Figura 2.17**  
Reflexión difusa.

## 2.4.2 Refracción

La refracción *Fig. 2.19*, es un fenómeno físico que se puede entender fácilmente. Debemos tener en cuenta que existe una fuente emisora de luz, los rayos al transmitirse a través del aire lo hacen a una velocidad y cuando chocan con otra superficie (S), compuesta por un material distinto pero refringente, es decir que refracta la luz (agua, vidrio, plástico) se da un cambio en la velocidad. Esta variante se manifiesta por medio de un cambio de dirección en la propagación (R). Estos dos medios por donde pasa la luz son caracterizados por índices de refracción 1 y 2.

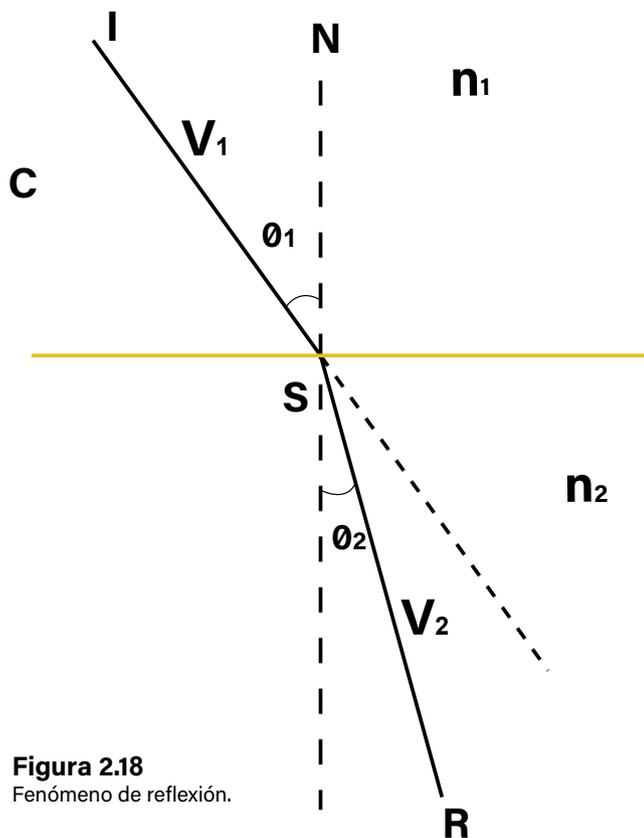
La luz viaja en los diferentes medios materiales con distinta velocidad ( $v$ ), siempre menor con la que lo hace en el vacío ( $c$ ). Ópticamente se caracterizan los medios transparentes por un escalar  $n$  que se define como:  $n=c/v$  [...]. ÍNDICE DE REFRACCIÓN ABSO-

LUTO de una sustancia es el cociente de dividir la velocidad de la luz en el vacío, por la velocidad de la luz en ella.<sup>15</sup>

En la *Fig. 2.18* los ángulos se forman con la línea normal (N), el rayo que incide corresponde a un ángulo  $\theta_1$  y el ángulo de la onda refractada es  $\theta_2$ . De modo que la refracción es el cambio de velocidad ( $v$ ) y por tanto de dirección de un rayo de luz al pasar de un medio refringente a otro. Matemáticamente se puede explicar este fenómeno con la ley de la refracción, para calcular la forma precisa en que los rayos cambian de dirección. Como lo explica Eugene Hecht<sup>16</sup>, esta ley es conocida como Ley de Snell, en honor al científico holandés nacido en el S XVI, Willebrord Snell van Royen, quien la propuso.

<sup>15</sup> Santiago Burbano, Física General, (Madrid: Tebar, 2003), 578.

<sup>16</sup> Hecht, *Óptica*, 102.

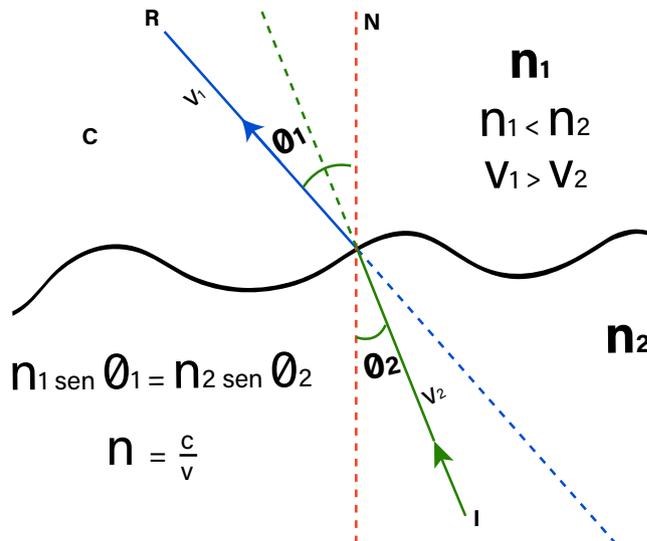


**Figura 2.18**  
Fenómeno de reflexión.

Al principio, los índices de refracción consistían en una serie de constantes del medio físico determinadas experimentalmente. Más tarde, Newton consiguió establecer la ley de Snell utilizando su propia teoría corpuscular. Por entonces ya era evidente el significado de  $n$  como medida de la velocidad de la luz.<sup>17</sup>

La Ley de Snell entiende que cuando la luz se propaga dentro del medio que tiene mayor índice de refracción, se mueve en dirección de la normal a la superficie, la velocidad de la luz en este medio es siempre menor, de

<sup>17</sup> Hecht, *Óptica*, 102.



**Figura 2.19**  
Refracción de la luz que incide desde un medio con menor índice de refracción hacia uno de mayor índice de refracción.

modo que a mayor índice de refracción menor velocidad. Así, esta ley establece que cuando  $n_1 < n_2$ , entonces  $n_1 \sin \theta_1 > n_2 \sin \theta_2$ .

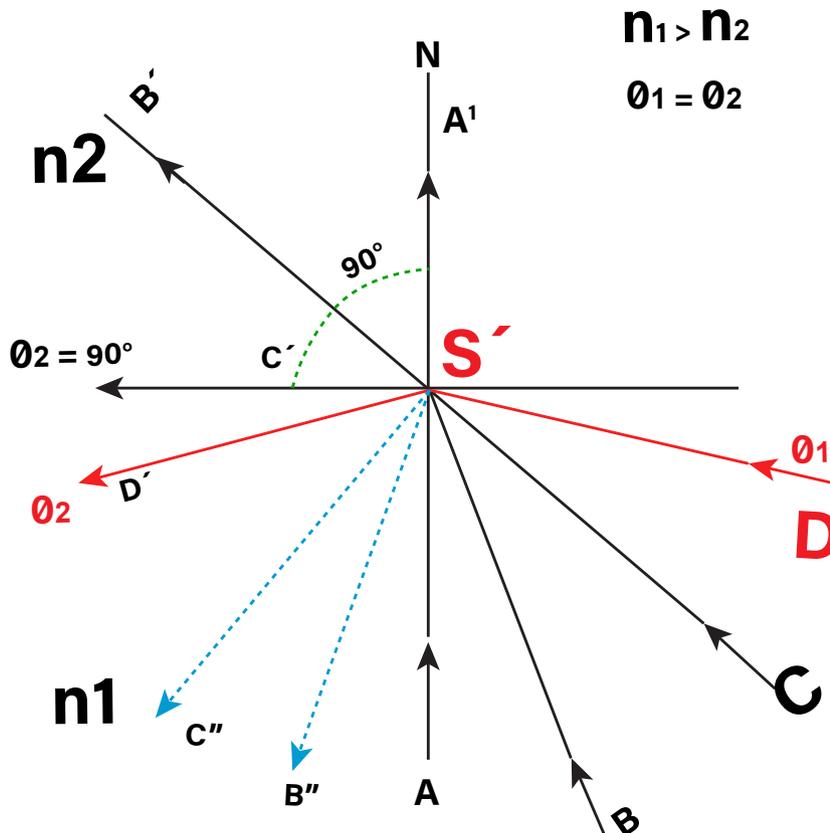
Esta Ley explica también un movimiento contrario *Fig. 2.19*, cuando el trayecto de un rayo de luz incidente (I) viaja desde un medio con índice de refracción mayor hacia un medio con menor índice de refracción, el rayo refractado (R) se alejará de la normal (N). Es importante tener en cuenta que cuando la luz cambia de un medio a otro, una parte de la energía luminosa se refracta y otra parte se refleja.

### 2.4.3 Reflexión total interna

Otra manera en que se propaga la luz es a través de la reflexión total interna, para entenderla es necesario tener en cuenta el ángulo límite o crítico, es un ángulo de incidencia al que corresponde uno de refracción de  $90^\circ$ . Si se considera que se hace incidir un rayo de luz dentro de un medio con mayor densidad que el aire, por ejemplo el vidrio, en donde  $n_1 > n_2$  este rayo regresará totalmente al medio de incidencia siempre que provenga desde un ángulo mayor al ángulo crítico ( $\theta_c$ ), de no ser así sucederá, como es sabido, que una parte de la luz se refractará y otra parte se reflejará.

La reflexión total interna se refiere a que el total de la intensidad contenida en el rayo incidente regresa al medio formando un ángulo del mismo tamaño y con la misma intensidad, como lo afirma Santiago Burbano "para que se verifique el fenómeno de la reflexión total son necesarios dos condiciones: que la luz vaya en un medio más hacia otro menos de refringente y que incida con un ángulo mayor que límite."<sup>18</sup>

<sup>18</sup> Burbano, *Física General*, 582.

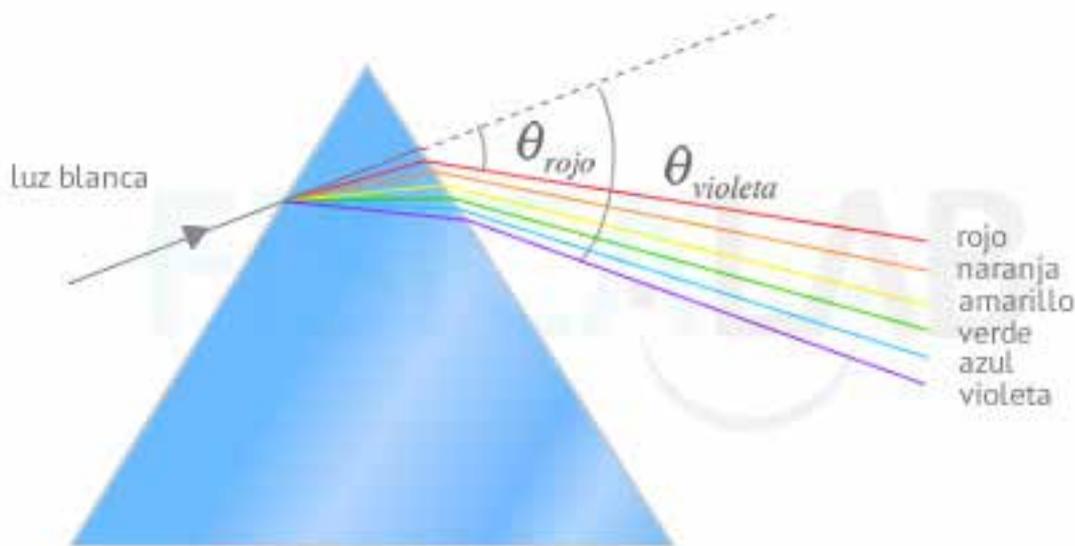


**Figura 2.20**  
Reflexión total interna.

Lo que observamos en la *Fig. 2.20* es la incidencia de cuatro rayos de luz desde un medio con densidad óptica mayor, es decir mayor índice de refracción que la del medio transmitido. En este caso la interfaz es vidrio-aire. El rayo incidente A corresponde al A' con el que se forma la normal N, a medida que el rayo de luz incidente se aleja de la normal en el medio más denso ( $n_1$ ), parte de la luz es refractada en el aire mientras se aleja de la normal (B') y otra parte se refleja (B''). El rayo incidente C es el que al chocar con la superficie que divide ambos medios (S') tiene un ángulo de refracción igual a  $90^\circ$ , éste representa el ángulo crítico ( $\theta_c$ ), igual que sucede con B, una parte de la luz de C se refleja. El rayo incidente D se transmite desde un ángulo mayor al ángulo crítico, por tanto, la potencia contenida en este rayo se refleja en su totalidad (D'), es decir regresa al medio por donde se transmite, dando así lugar a la reflexión total interna.

## 2.4.4 Dispersión

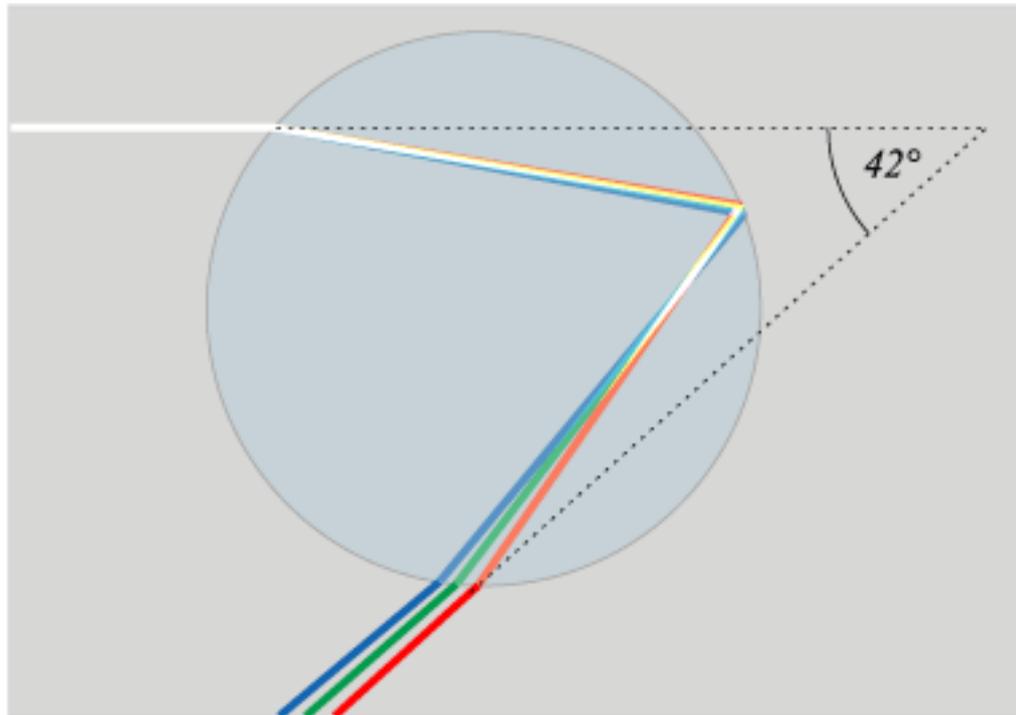
La dispersión se estudia a partir de la dependencia que tiene el índice de refracción con la longitud de onda. Este fenómeno genera entonces que las diferentes longitudes de onda (colores) que conforman un haz de luz blanca se refracten y viajen por un mismo medio con diferente velocidad. Cuando incide un haz de luz blanca sobre un prisma es muy evidente la dispersión, se separan las longitudes de onda y se forma el espectro visible con los colores que conforman la luz blanca: violeta, índigo, azul, verde, amarillo, naranja y rojo, VIBGYOR por sus siglas en inglés, *Fig. 2.21*.



**Figura 2.21**  
Dispersión de la luz en un prisma.

El arcoíris es una consecuencia de la dispersión, sucede cuando llueve porque las diferentes longitudes de onda que contiene la luz solar entran en gotas de agua esféricas que actúan como prismas en la atmósfera. Los rayos de luz pasan de la atmósfera al interior de la gota de agua, ahí se refractan y debido a que el índice de refracción es ligeramente distinto para cada longitud de onda se genera la separación de estas y por

eso es posible distinguir los colores separados. Cuando los rayos están dentro de la gota de agua viajan hacia el extremo opuesto de la misma, desde ahí se reflejan en el interior y vuelven a refractarse hacia fuera como colores individuales *Fig. 2.22*. El ángulo entre el observador y el rayo de sol incidente es un factor importante para permitir la observación de un arcoíris.



**Figura 2.22**

Dispersión de la luz solar a través de una esfera de agua. <https://bit.ly/2lPdGIU>

## 2.5 Las Lentes Ópticas

Una de las herramientas más importantes en el desarrollo de la presente investigación son las lentes ópticas, que junto con la luz constituyen la materia prima en la generación de imágenes con el carácter que ya he explicado anteriormente. Por tanto es vital saber qué es una lente, cómo funciona en relación con la luz y la importancia del parámetro que las caracteriza: su distancia focal, y aplicar estos conocimientos en el diseño de imágenes para aplicarlas a piezas escultóricas o inmersivas, para el caso de esta tesis, o para cualquier otra aplicación en el arte. A pesar de que existe una amplia complejidad para el estudio de las lentes en el terreno de la óptica, aquí me concentré en explicar las características fundamentales de aquellas que han sido utilizadas en la parte experimental de la investigación: convergentes, divergentes y cilíndricas.

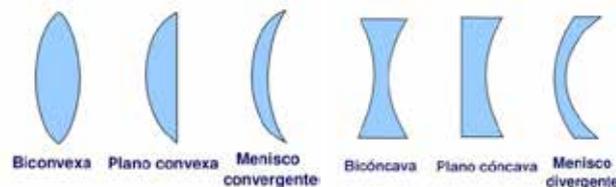
### 2.5.1 Lentes convergentes y divergentes.

Las lentes generalmente están hechas de vidrio, aunque también pueden ser de plástico, resina u otro material transparente, tienen por lo menos una de sus superficies curvas lo que genera un cambio en la dirección de la luz cuando ésta las atraviesa, es decir "es un dispositivo refractor [...] que reconfigura la distribución de la energía emitida."<sup>19</sup>

Existen dos tipos principales de lentes, las convergentes o positivas y las divergentes o negativas *Fig. 2.23*. Su uso dependerá del efecto que queremos generar con la luz incidente, "con frecuencia es necesario recoger rayos paralelos incidentes haciéndolos converger hacia un punto, enfocando así la energía."

<sup>19</sup> Hecht, *Óptica*, 152

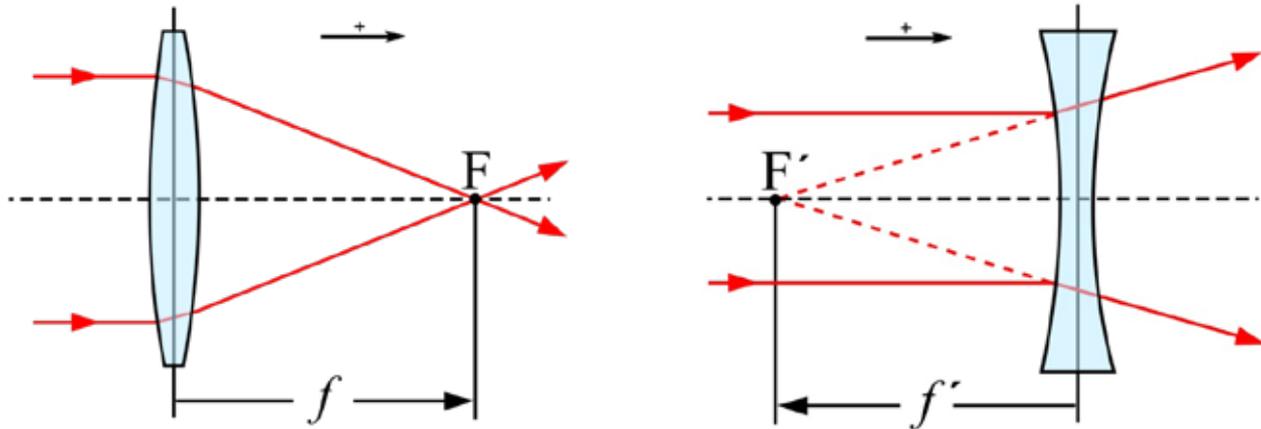
De acuerdo al radio de curvatura de las superficies se pueden identificar tres clases de lentes convergentes: biconvexa, planoconvexa, menisco convergente y tres clases de lentes divergentes: bicóncavas, planocóncavas y menisco divergente.



**Figura 2.23**

Tipos de lentes convergentes y divergentes. En <https://slideplayer.es/>

Las lentes ópticas refractan la luz y pueden formar una imagen. Las convergentes se identifican por ser más gruesas en la parte central y más delgadas en la parte periférica. Las divergentes son más gruesas en los bordes que en el centro y separan los rayos de luz que pasan por ellas.



**Figura 2.24**  
Lente convergente a la izquierda y lente divergente a la derecha.

Todas las lentes tienen un eje óptico representado por una recta perpendicular a la lente que cruza por su centro. En la lente convergente (izquierda), los rayos que inciden paralelos al eje óptico convergen en un punto (F) denominado foco. En la lente divergente (derecha), los rayos que inciden paralelos al eje óptico divergen al salir de la lente, cuando se trazan las prolongaciones estos rayos se unen en el foco (F').

La distancia que hay entre estos puntos focales y el centro de la lente es definida como distancia focal ( $f$ ) que es positiva, cuando se trata de una lente convergente y negativa, cuando es una lente divergente ( $f'$ ).

### 2.5.2 Lentes cilíndricas

Este tipo de lentes están diseñadas para aplicaciones que persiguen la distribución unidimensional de una fuente de luz. Se han realizado, al igual que el resto de las lentes, un número amplio de investigaciones sobre sus aplicaciones y características<sup>20 21 22</sup>. Este tipo de lentes está formada por dos superficies, una de las cuales es plana y la otra cilíndrica, se obtienen al seleccio-

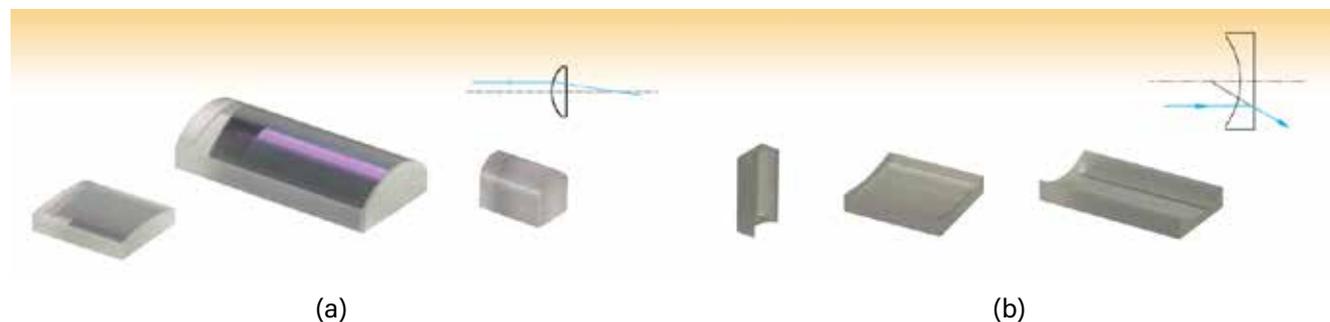
20 Joseph Shamir, "Cylindrical lens systems described by operator algebra," *Appl. Opt.* 18, 4195-4202 (1979).

21 Hsi-Chao Chen, et.al., "Rectangular illumination using a secondary optics with cylindrical lens for LED street light," *Opt. Express* 21, 3201-3212 (2013).

22 Colin J. R. Sheppard, "Cylindrical lenses—focusing and imaging: a review [Invited]," *Appl. Opt.* 52, 538-545 (2013).

nar un cilindro mediante un plano paralelo a su eje de revolución. En la *Fig. 2.25 (a)* se observa una lente cilíndrica positiva, que puede formar una imagen de línea desde un punto de luz, cambiar el aspecto de una imagen o enfocar la luz de entrada colimada en una línea y conformar haces anamórficos. En la *Fig. 2.25 (b)*

se representa una lente cilíndrica negativa, útil para expandir la luz en el eje, consigue desviar la luz de entrada colimada de una línea, puede servir para la compresión unidimensional de imágenes, también para la conformación de haces anamórficos y la generación de líneas láser.



**Figura 2.25**

(a) Lente cilíndrica positiva. (b) Lente cilíndrica negativa. En <https://www.thorlabs.com/>

Las lentes estudiadas en este capítulo corresponden al material óptico que se ha utilizado en esta investigación y con el cual se ha llevado a cabo el procedimiento experimental para la formación y proyección de imágenes, ligadas a una representación escénica llevada al diseño y construcción de experiencias visuales. Una aplicación diferente de las finalidades determinadas, para las que son generalmente construidas.

## 2.6 FILTROS

La luz es la única fuente de emisión de colores, la mayoría de las fuentes de luz emiten una amplia gama de longitudes de onda que cubren todo el espectro visible. En muchos casos, para el diseño de piezas de arte con luz, se quiere producir un tipo de luz con un espectro

de longitud de onda restringido, esto se logra utilizando filtros especializados que transmiten algunas longitudes de onda y absorben o reflejan selectivamente las longitudes de onda no deseadas. Estas características junto con diversas soluciones y aplicaciones de los filtros, en conjunto con el estudio de la luz blanca que incide en ellos, han sido ampliamente estudiadas para una diversidad de aplicaciones ópticas.<sup>23 24 25</sup>

23 Markku Hauta-Kasari, et. al., "Spectral vision system for measuring color images," *J. Opt. Soc. Am. A* 16, 2352-2362 (1999).

24 Kai Engelhardt and Peter Seitz, "Optimum color filters for CCD digital cameras," *Appl. Opt.* 32, 3015-3023 (1993).

25 Y. Kanamori, D. Ema, and K. Hane, "Transmissive metamaterial color filters," in *JSAP-OSA Joint Symposia 2017 Abstracts*, (Optical Society of America, 2017), paper 5p\_A410\_5.

Los filtros de color *Fig. 2.26* se construyen con piezas transparentes de vidrio teñido, plástico, polímeros sintéticos (plásticos) y gelatina lacada. Los dos tipos más comunes de filtros son los de absorción y los de interferencia, los primeros absorben las longitudes de onda no deseadas; los segundos eliminan las longitudes de onda no deseadas, pero lo hacen por interferencia destructiva interna y por reflexión. En cualquiera de estos filtros, la luz incidente se refleja en pequeñas cantidades desde la superficie y otra fracción pequeña de luz también se absorbe.

Por ejemplo, considerando que se hace incidir luz blanca a través de un filtro amarillo, éste permitirá solamente el paso del color amarillo y absorberá todos los demás colores. Por su parte, si se hace incidir una luz de color azul, se le interpone un filtro azul y se dirige sobre un objeto azul, el objeto seguirá reflejando este color, por lo tanto, su aspecto seguirá siendo azul. Pero si en lugar de un objeto azul se coloca uno rojo, el azul se absorberá y no se reflejará la luz, por tanto se tendrá un objeto aparentemente negro.



**Figura 2.26**

Filtros de diferente color. De <https://www.thorlabs.com/>

## CAPÍTULO 3

# HERRAMIENTAS PARA UN MÉTODO TECNO-CIENTÍFICO

### **3.1 La aplicación de los fenómenos físicos de la luz.**

Para el diseño de imágenes se han utilizado dos metodologías, la primera basada en el conocimiento de las leyes y los fenómenos físicos de la luz y el uso de LEDs especialmente, aunque también se han utilizado láseres. Se ha hecho una puntual observación de los resultados experimentales que, a partir de la comprobación de las leyes físicas, han determinado el camino para estudiar la luz, sus procesos de transformación espacio-temporal, mediante la producción y exhibición de imágenes que a su vez conforman el diseño de la pieza final.

Diversos laboratorios de óptica en la Facultad de Ciencias, Instituto de Física, Instituto de Ciencias Aplicadas y tecnología ICAT, el Laboratorio temporal de óptica en la Unidad de Posgrado, todo esto en la UNAM, y el Laboratorio de física de la Facultad de Ciencias de la Universidad del Valle han sido los espacios de experimentación y aplicación del método, en donde se ha realizado un entero análisis de la luz (LEDs, láser) y observado su evolución y modificaciones cuando la hacemos incidir en diversos materiales ópticos cuya selec-

ción surge de una ruta de luz diseñada con base en las imágenes que se desean generar, para lograr también una mayor sociabilización y fortalecimiento del vínculo entre las leyes físicas de la luz y el arte.

La selección de los elementos ópticos y optomecánicos que componen las herramientas básicas para trabajar con esta metodología, está basada en el ejercicio que se tuvo durante la investigación en los laboratorios de óptica mencionados, para lo cual se ha realizado un importante trabajo recopilación de material óptico recuperado de viejos objetivos fotográficos y cinematográficos. También se recuperó una buena cantidad de elementos optomecánicos que funcionan como soporte para piezas ópticas y otros soportes necesarios para la investigación. Estos materiales entran en discurso con un conjunto de luces LED, láser y en ocasiones podría intervenir la luz del sol.

### **3.2 Recuperación de material óptico de viejos objetivos de fotografía y cinematografía.**

Se ha logrado conformar un kit de lentes que en el mercado tendrían un costo elevado, especialmente porque

están destinados para uso científico, sea empresarial o académico. Se extrajeron cincuenta lentes que han sido funcionales para el estudio y observación de los fenómenos físicos y utilizadas para diseño de las imágenes que conforman la pieza diseñada para mostrar como resultado final de la investigación.

En el proceso de investigación se ha enfatizado el estudio de las leyes físicas de la luz pero se enriquece con los estudios específicos que ofrecen el sustento teórico de cada imagen diseñada para construir la pieza final. De tal modo que son tres estudios físicos los que se abordan: la formación de las cáusticas, el Sol y el Arcoíris. Estas imágenes generadas con soportes ópticos, luces LED y láser, dan forma a la muestra de resultados de la propuesta. Con la publicación de cada estudio se hace vigente la exhibición y divulgación del método por medio de planos que dejan claro el proceso de la investigación de la pieza y la explicación de las leyes de la óptica aplicadas.

Junto a la recuperación de material óptico, diseño y producción de material optomecánico está el diseño de un controlador de poder para manejar fuentes LED de 50w, que por su potencia requieren un control que re-

duzca el porcentaje de calentamiento de la fuente y que facilite el encendido por un tiempo prolongado.

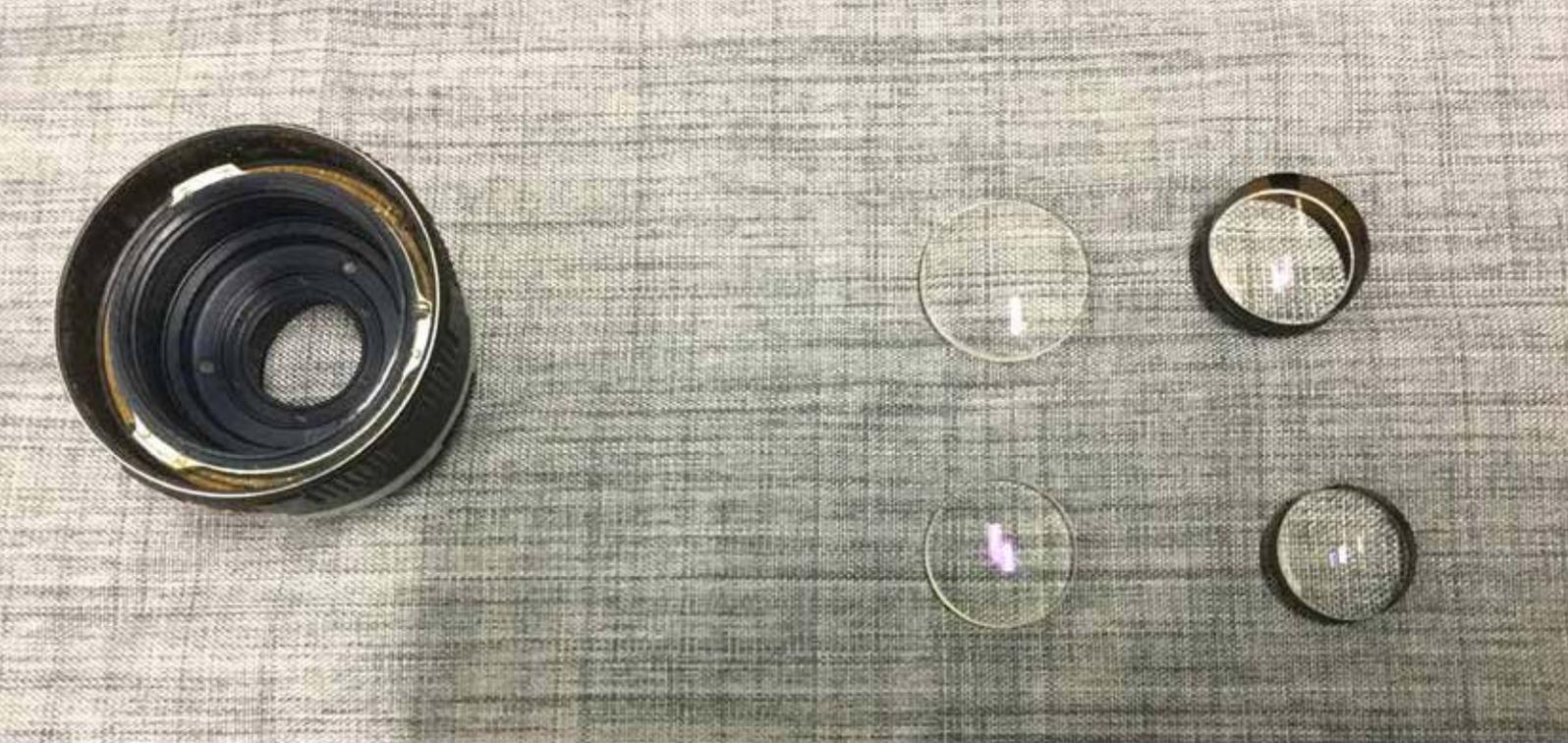
La recuperación de materiales ópticos se refiere a lentes convexos y cóncavos, de diferentes diámetros y distancias focales que rescaté de objetivos de fotografía y cinematografía que compré en mercados de antigüedades. Un total de 50 lentes forman parte del material óptico para esta investigación. Algunos elementos ópticos también fueron comprados, entre ellos filtros, espejos, polarizadores, divisores de haz y prismas.

Como se observa en la *Figura 3.1* son necesarias herramientas especiales para la extracción de los lentes que conforman cada uno de los objetivos en desuso comprados. De estos también se rescataron soportes para lentes, filtros o festejos, que pueden ser útiles para el montaje de los sistemas ópticos utilizados, una vez que son diseñadas las imágenes. La Tabla 3.1 es un enlistado de las lentes recuperadas, parte de ellas fueron utilizadas para mostrar los resultados de la metodología propuesta en la que se usaron junto con LEDs y láser. Otros elementos como filtros y prismas *Fig. 3.2* fueron comprados para cumplir con los objetivos de la investigación.

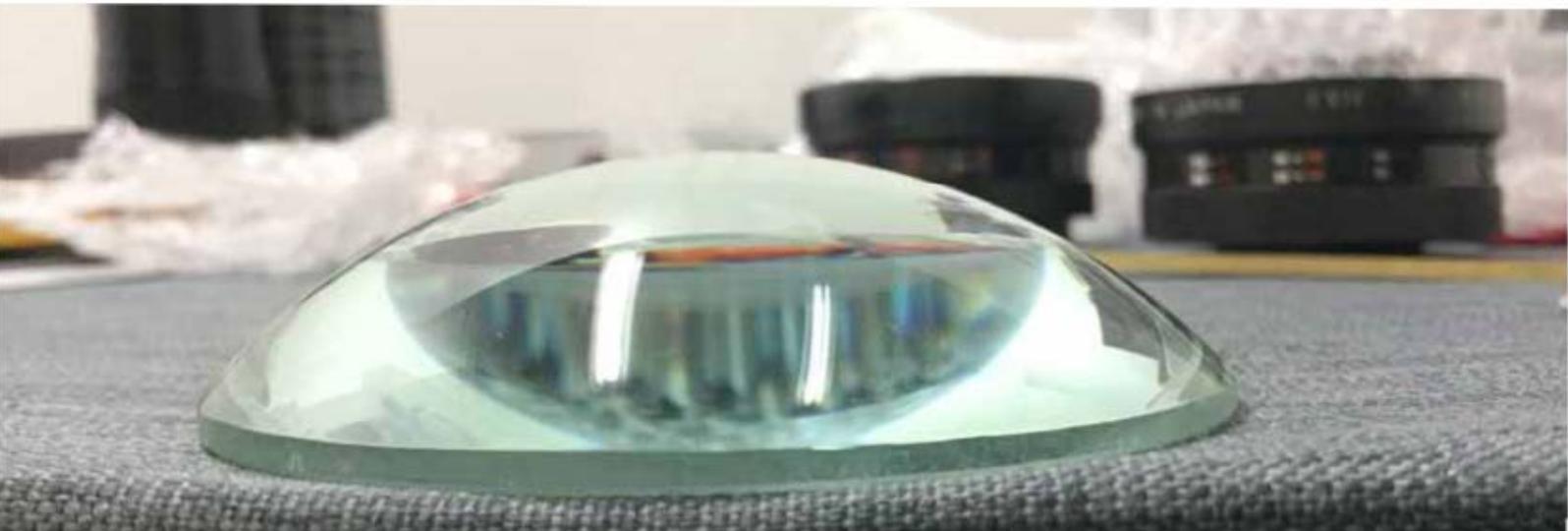


**Figura 3.1**  
Recuperación de material óptico.









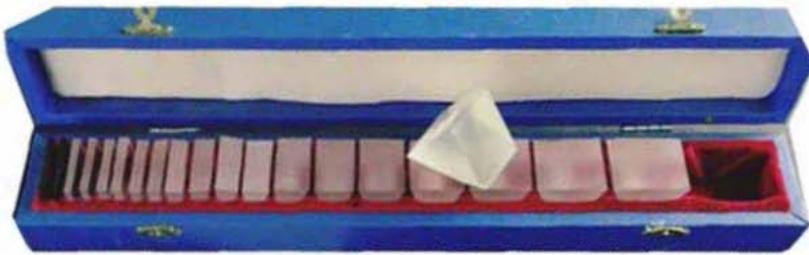
**Tabla 3.1 Lista de lentes recuperadas e inventariadas.**

	<b>Tipo de lente</b>	<b>D (Diámetro)</b>	<b>f (distancia focal)</b>
1	Lente plano convexa	100 mm	185 mm
2	Lente biconvexa	105 mm	230 mm
3	Lente convexo	50 mm	100 mm
4	Lente bicóncavo	90mm	
5	Lente plana	28 mm	
6	Lente plana	28 mm	
7	Lente plana con montura	20 mm	
8	Lente menisco positivo con montura	30 mm	
9	Lente convexo	30 mm	35 mm
10	Lente bicóncavo	30 mm	
11	Lente biconvexo con montura	25 mm	~95 mm
12	Lente plano-convexo	73 mm	115 mm
13	Lente plano-convexo	73 mm	105 mm
14	Lente convexo	50 mm	300 mm
15	Lente convexo	25 mm	100 mm
16	Lente cóncavo	20 mm	
17	Lente cóncavo	25 mm	30 mm
18	Lente cóncavo	30 mm	
19	Lente convexo	30 mm	55 mm
20	Lente menisco positivo	50 mm	200 mm
21	Lente convexo	30 mm	75 mm
22	Lente convexo	30 mm	35mm
23	Lente Minolta Close-up	No. 1 for SR 55N d=50 mm	~600 mm
24	Lente Fresnell	280 x210 mm	



**Figura 3.2**  
Filtros, lentes y otros  
elementos ópticos.









### 3.3 Diseño y producción de material optomecánico.

Parte importante de para la aplicación de este método y para el montaje correcto de los elementos ópticos, sean lentes, filtros, prismas o espejos es la conformación de un kit de elementos optomecánicos, que se refiere a soportes diseñados con base en las necesidades que surgieron durante los estudios en los Labo-

ratorios y durante el diseño de la pieza conformada por lentes, LEDs y láser. Igual que las lentes, estos sistemas son caros y se deben en su mayoría importar de Estados Unidos, debido a que son componentes de precisión utilizados por científicos.

Con base en las características de los elementos que se utilizaron en esta investigación se diseñaron y manda-

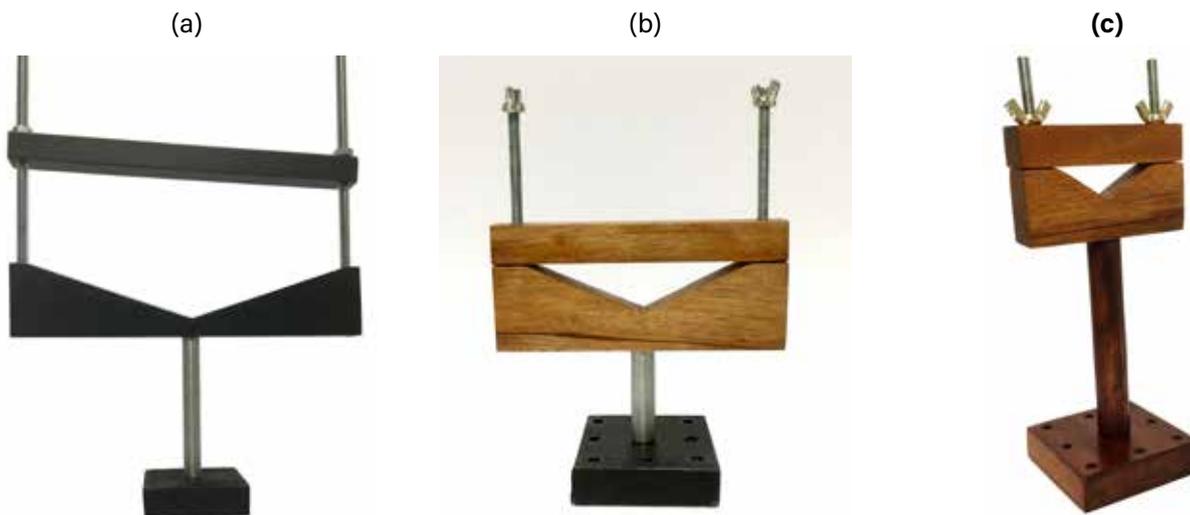
ron construir varios soportes para lentes esféricas y cilíndricas, espejos, filtros, prismas y porta LEDs, el trabajo se mandó hacer en talleres de herrería, carpintería y joyería, en donde el factor prueba – error determinó el éxito de cada una de las piezas.

Todas las piezas funcionan de acuerdo a su aplicación, en el caso de los porta lentes están diseñados con base en los diámetros de las lentes que se recuperaron *Fig. 3.3*. Los porta espejos y porta LEDs *Fig. 3.4*, están diseñados para lograr movilidad a las piezas montadas y poder diseñar un sistema compuesto por varios elementos iguales dirigidos hacia varias direcciones y con diferentes angulaciones. De igual manera para los LEDs, por su aplicación sobre los estudios de luz que se realizaron y los experimentos realizados para comprobar el método, era indispensable que tuvieran varias libertades de movilidad, además de que tiene incluido

un soporte dispersor de calor para evitar el calentamiento de las fuentes luminosas *Fig 3.4 (b)*.

Debido a que entre los lentes hay algunos de dimensiones muy pequeñas, 20 y 35 mm, fue necesario diseñar piezas especiales, con base en los diseños existentes en el mercado científico, las utilizadas en esta investigación están hechas en aluminio con diámetros variables, tornillos ajustables y una variable respecto a las que se utilizan en los laboratorios de óptica, representada por una base móvil que da un grado de libertad a la posición de los lentes montados sobre esas estructuras *Fig. 3.5*.

Los prismas que se compraron también son de dimensiones y funciones variables, por lo que se diseñaron y construyeron superficies ideales para colocarlos y lograr mantener su efecto al hacerles incidir una fuente LED o láser *Fig. 3.6*.



**Figura 3.3**

Bases, postes, porta lentes esféricas. Aluminio y acero inoxidable (a); aluminio acero inoxidable y caoba (b); caoba (c).

(a)



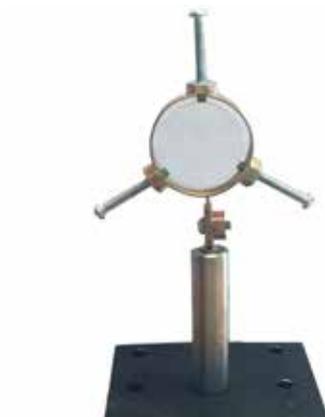
(b)



**Figura 3.4**

Base, postes, porta espejo (a) y porta LEDs (b) móviles. Aluminio y acero inoxidable.

(a)



(b)

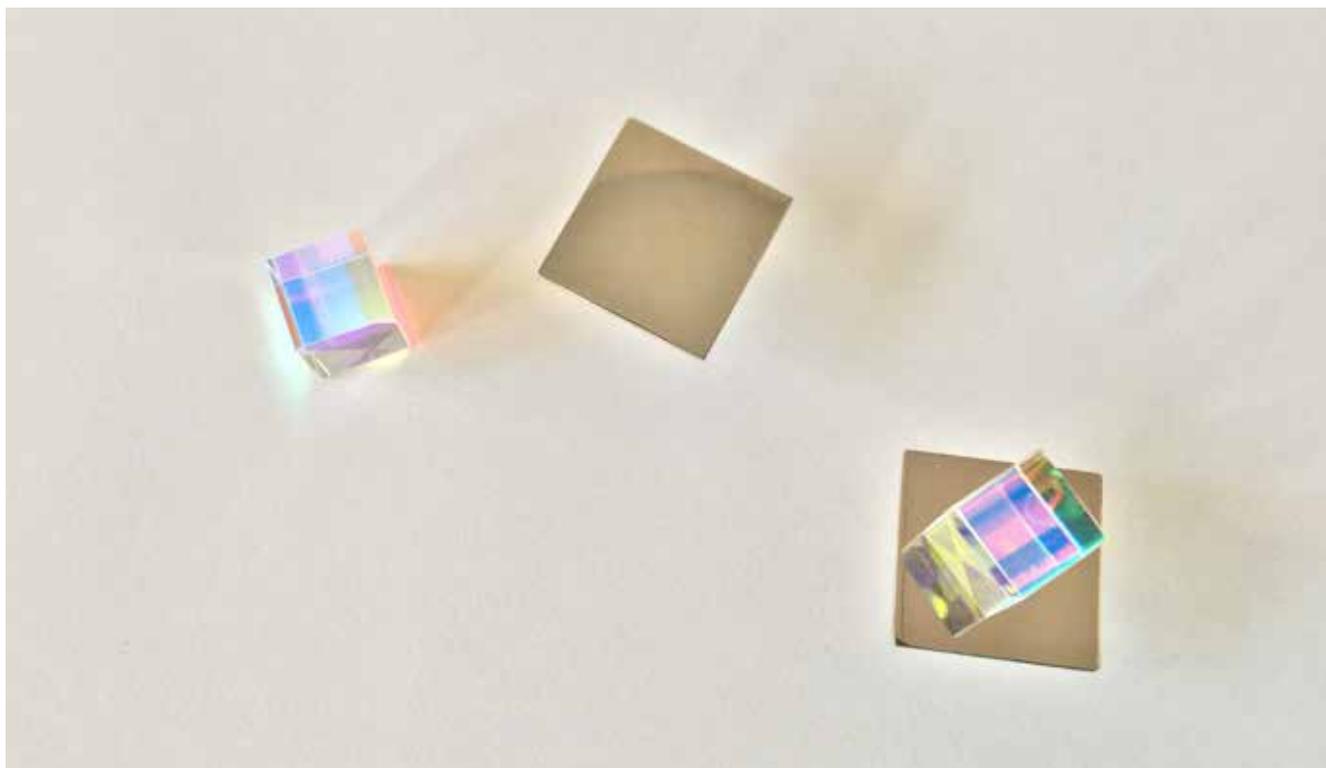


(c)



**Figura 3.5**

Bases, postes y porta lente esféricas, con cabezal móvil de diámetros variables. Aluminio y acero inoxidable.



**Figura 3.6**

Porta prismas, tamaños variables. Aluminio y acero inoxidable.

### 3.4 Diseño de controlador de potencia para LEDs de 50w

Los conocimientos de eléctrica y electrónica son necesarios para las piezas artísticas que sean planeadas para interactuar con fuentes de luz artificiales. Para hacer el controlador se partió de una fuente de poder de magnitud de tensión constante de 40v 600w, las cuales se encargan de alimentar fuentes de luz LED de 50w que trabajan a 12v. Se debe diseñar, construir y poner en funcionamiento un módulo electrónico que le permita variar el voltaje para variar la intensidad de la luz,

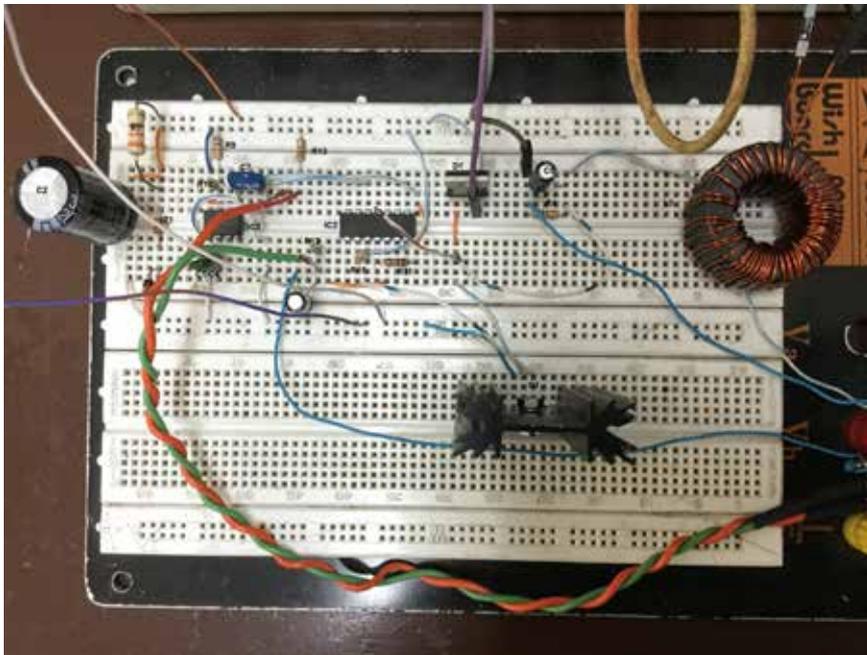
sin que esto comprometa la eficiencia energética entre la fuente primaria y la carga que son los LEDs.

El montaje del sistema fue un proyecto realizado en Escuela de Ingeniería, Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle de Cali, Colombia, durante la estancia de investigación desarrollada entre septiembre 2017 y enero 2018. Se hizo con la tutoría y colaboración del Mtro. Freyner Piedrahita Naranjo y Mtro. Jorge Eliécer Quintero Calvache. Todo proyecto electrónico inicia con una caracterización en una tablilla de laboratorio

*Protoboard Fig. 3.7*, donde se montan los elementos necesarios y se comprueba que funcione el sistema. Una vez comprobado se hace el dibujo esquemático *Fig. 3.8* y posteriormente se diseña el circuito en una tarjeta PCB *Fig 3.9*, se visualiza en 3D y se imprime *Fig. 3.10* para después soldarle cada uno de los elementos *Fig. 3.11 (a)*, a esto se le conecta la luz LED montada en el disipador de calor *Fig. 3.11 (b)* y con esto ya está lista la fuente para utilizarla en la mesa óptica *Fig. 3.11 (c)*.

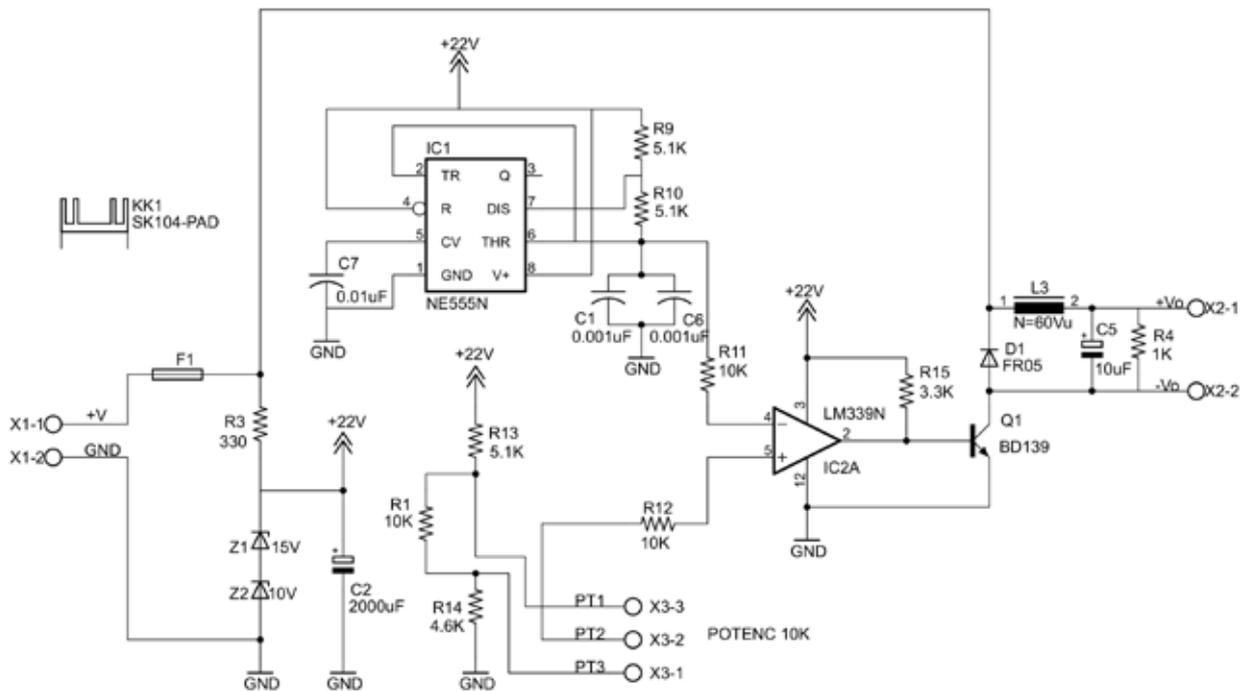
En este caso, se utilizó el programa *EAGLE* que significa *Easily Applicable Graphical Layout Editor*, un programa de diseño de diagramas y *PCBs* con auto-enrutador y de licencia *Freeware*. La tarjeta electrónica (PCB) fue impresa en México, en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología y ensamblado en el Ins-

tituto de Física de la UNAM. Los niveles de dificultad son amplios cuando se trabaja con luces LED de alta potencia, puesto que nos enfrentamos a una parte de la potencia que se convierte en calor, lo que lleva a un calentamiento rápido de la fuente, que alcanza el 80% de su nivel máximo de tolerancia al calor en 30 segundos. La solución a este tipo de circunstancias se enfrenta probando diferentes disipadores de calor y medir la temperatura constantemente, siguiendo siempre las indicaciones del fabricante de los LEDs que se utilizan. Para el caso de un LED de potencia igual a 50 watts que trabaja a 36 Voltios y a una corriente de 1.5 Amperios, se resolvió con un disipador de calor grande y no fue necesario añadir un ventilador, que es como también se pueden resolver estas problemáticas.

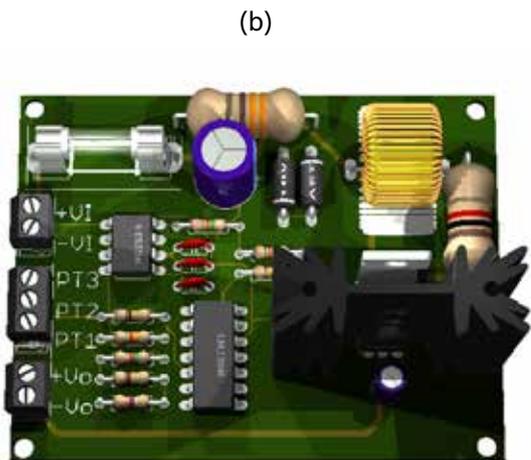
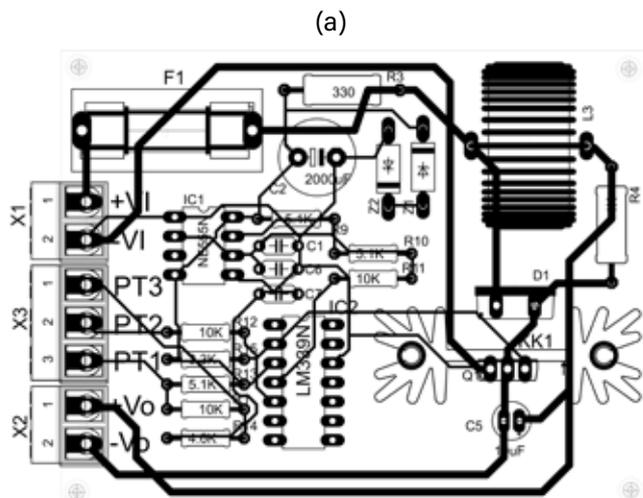


**Figura 3.7**

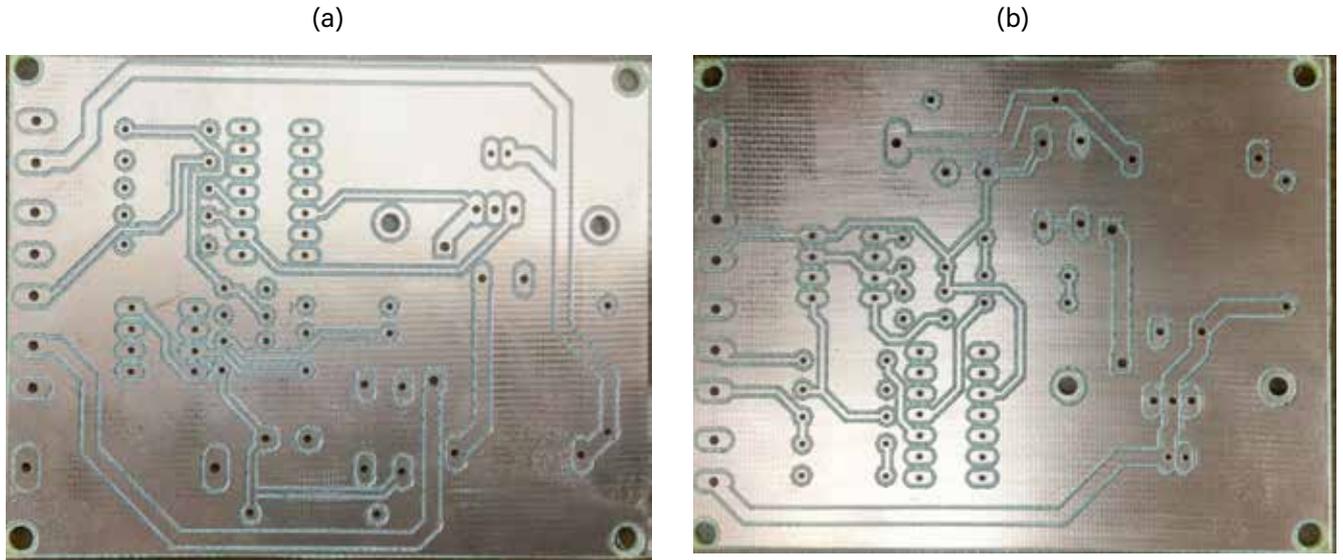
Caracterización de sistema en Protoboard.



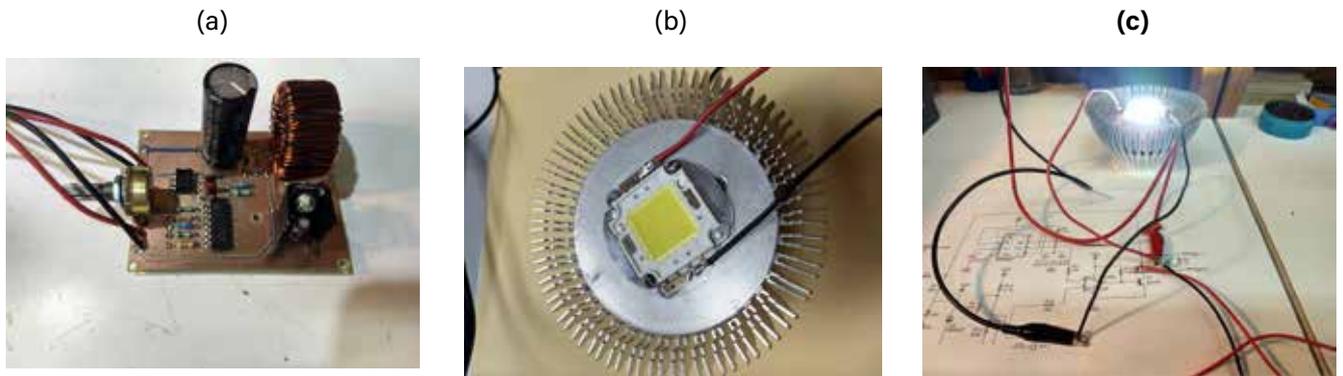
**Figura 3.8**  
Dibujo esquemático.



**Figura 3.9**  
Diseño (a) y visualización 3D de tarjeta electrónica (b).



**Figura 3.10**  
Tarjeta electrónica impresa a dos caras, frente (a) y vuelta (b).



**Figura 3.11**  
Pieza final, con elementos soldados (a), un LED de 50w colocado sobre un disipador de calor (b), y prueba de funcionamiento (c), lista para ser montada sobre base, poste de aluminio y mesa óptica.

El Regulador que se construyó está basado en un regulador 555, un mecanismo para regular la intensidad luminosa en LEDs de alta potencia, está hecho con un circuito integrado que existe en el mercado, fácil de comprender si se revisa la literatura.<sup>26 27 28</sup> Sería ideal construir varios módulos iguales, para controlar manualmente toda la gama cromática de uno o varios LEDs. La simplicidad del circuito permite operarlo con facilidad. El funcionamiento del dispositivo es por modulación de ancho de pulso que se conoce también como PWM o PDM<sup>29</sup> una señal de voltaje utilizada para enviar información o modificar la cantidad de energía que se dirige a una carga, un método al que se recurre generalmente en circuitos digitales que emulan una señal analógica.

El sistema es bastante eficaz puesto que desperdicia muy poca potencia y eso evita que se caliente demasiado. La modulación PWM utiliza un dispositivo de control que funciona como un interruptor que se abre y se cierra muchas veces por segundo, de este modo

26 Rashid Muhamad H., *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*, (México: Prentice Hall Hispanoamericana, 1995), 316- 320, 744-746.

27 Albert P. Malvino, *Principios de electrónica*, (España: McGraw-Hill Interamericana de España, 2000), 1111p.

28 Manuel Llamas et.al., "Development of Digital Application Specific Printed Electronics Circuits: From Specification to Final Prototypes." *J. Display Technol.* 11, 652-657 (2015).

29 Pulse Width Modulation o modulación por anchura de pulsos o Pulse Duration Modulation o modulación por duración de pulsos.

regula la potencia modificando el promedio entre el tiempo de conducción y el tiempo en que está abierto, a esto se le conoce como ciclo de trabajo o *duty cycle*. Sus unidades están representadas en términos de porcentaje.

El proceso de este regulador es muy simple: la potencia disipada en un dispositivo ( $P=I*V$ )<sup>30</sup> es la corriente que pasa por él, multiplicada por la tensión que cae en sus terminales. Por lo tanto, en este tipo de regulación, mientras el dispositivo deja pasar toda la corriente, la caída de tensión es mínima (alrededor de 0,7V con una corriente de 1.5 A) mientras que cuando la tensión es máxima (30V), la corriente es cero, es decir ninguna potencia será disipada.

En el Regulador se colocó un circuito integrado 555, es "un circuito temporizador, que puede trabajar tanto de forma monoestable (activa un circuito durante un período de tiempo determinado) o astable (se activa y desactiva cada cierto tiempo, a una frecuencia determinada)".<sup>31</sup> Es un circuito integrado bastante estable y su función primordial es producir pulsos de temporización con gran precisión y además puede funcionar co-

30 Ley de Watt en donde: P=Potencia en watts [W]

I=Corriente eléctrica en amperios [A] V=Voltaje o tensión en voltios [V]  **$P=I*V$** .

31 Rocío Leira R., y Jorge Gómez, "Práctica 9, Circuitos con C.I. 555, Temporizadores," *Tecnología Interactiva*, [https://www.edu.xunta.gal/centros/cafi/aulavirtual2/pluginfile.php/37974/mod\\_resource/content/3/PR9.pdf](https://www.edu.xunta.gal/centros/cafi/aulavirtual2/pluginfile.php/37974/mod_resource/content/3/PR9.pdf)

mo oscilador, divisor de frecuencia, modulador de frecuencia y generador de señales triangulares.

Uno de los detalles del 555 es que sólo entrega una corriente de salida de pocos mA<sup>32</sup>, como lo que se quiere es conectar varios LED de 50w, la demanda de corriente del dispositivo es bastante alta, por tanto no es posible conectar los LED directamente al 555. Se necesita lograr un aumento en la potencia para controlar corrientes elevadas, para ello se debe integrar un transistor de tipo MOSFET de canal N. Como también se controlará la luminosidad de cada una de las fuentes, para lograrlo se puede colocar un potenciómetro sobre el impreso; o se puede también colocar fuera de la placa impresa.

Para el diseño de obras y piezas con óptica y luz, es necesario lograr que las fuentes de luz utilizadas tengan también una planificación de acuerdo a la potencia de luminosidad que deberán emitir, así como el tiempo que deberán estar encendidas. En el caso de algunas piezas será necesario que estén encendidas durante más de ocho horas, algunas tal vez menos, pero por ejemplo podremos tener fuentes de diferente intensidad y color en la misma pieza y cada una estar programada para que emita determinada intensidad de iluminación por un tiempo específico. Esta es una aplicación que se prevé para las piezas en un futuro cercano, pero es importante que desde ahora se tenga la capacidad de diseñar, construir y controlar las fuentes de luz, para que cuando se desarrolle la programación y control de distintas fuentes, las construidas desde el inicio de la investigación sigan siendo útiles.

<sup>32</sup> mA es el símbolo del miliamperio, unidad de intensidad eléctrica.

El diseño depende no solamente de los sistemas ópticos montados y las rutas de luz que se diseñen, sino de la luz emitida que finalmente es lo que hace posible que suceda lo planeado en la pieza. Como se ha mencionado anteriormente, la propuesta metodológica tiene varias aplicaciones, entre ellas las presentaciones en vivo, donde una pieza con luz y sistemas ópticos se diseñen para una presentación frente al público con una duración determinada. Una puesta en escena con luz, en donde se ponen en juego las herramientas ópticas, optomecánicas y electrónicas que se han estudiado, construido y desarrollado a lo largo de esta investigación y que darán cuerpo a la pieza entera.

EDITH VÁZQUEZ. FÍSICA ÓPTICA APLICADA AL ARTE 87

## CAPÍTULO 4

# DISEÑO DE IMÁGENES CON SISTEMAS ÓPTICOS Y LEDs

**E**l uso de sistemas ópticos, luz LED y láser, lo aplico en mi obra especialmente para diseñar una serie de imágenes que se proyectan de manera consecutiva y a veces al unísono, sobre diferentes soportes, espejos y telas especialmente, aunque en ocasiones podrá variar la superficie de proyección, siendo agua, humo u otros materiales, esto depende del espacio físico en donde se realice el montaje de la pieza, parte del plan futuro de la presente investigación. Es importante el estudio de los materiales de proyección que intervienen con el discurso de la luz, los cuales deben tener características ligadas a la percepción tridimensional del espacio y al concepto con el que fue diseñada.

Las imágenes que he planeado proyectar haciendo uso de lentes, espejos, filtros, prismas, LEDs y láser, para mostrar en esta parte experimental de la investigación, son el resultado de un proceso artístico que ha estado en constante transformación y que trae consigo la memoria de las experiencias personales que expuse en *De la noche a la mañana*, al inicio de la tesis. De modo que la experiencia que deseo dar al espectador es muy ín-

tima y quisiera con ello tocar las memorias de cada individuo en torno a sus momentos de oscuridad y dolor frente a la pérdida física de alguien amado.

Son imágenes que juntas, en su estado de proyección en movimiento, con sus tiempos específicos, sus pausas y sus momentos de oscuridad total, para después visualizar de nuevo luz, están planeadas para ser vistas en vivo y acompañadas de sonido diseñado para la pieza. Por tanto las fotografías que se publican en la tesis son una aproximación estética a lo que se vive en el espacio de proyección y responden a la documentación de la fase experimental.

Lo que propongo es que el espectador construya un discurso con su propia experiencia, que a través de su memoria e imaginación tome un lugar con su *estar*, a través del ojo o con el cuerpo entero, frente a imágenes que pueden ser metafóricas, oníricas o explícitas en un espacio que puede ser muchos espacios y a la vez ninguno.

En la parte experimental de la investigación trabajo con las apariencias del mundo visible y aludo a la formación

de mundos que no necesariamente se parecen a lo que vemos habitualmente, de modo que se ejerce la disposición de experimentar otros universos y otras maneras de moverse en el espacio, incluso moverse sólo con el ojo y la imaginación. Con esto formulo un encuentro entre lo artístico y lo experimental, en donde se vuelve primordial el fenómeno de la percepción, donde la realidad y el tiempo se ponen en estado de suspensión, mientras se subraya la incerteza inmersa en las representaciones del mundo, la eliminación temporal de las verdades comunes, en medio de la tridimensionalidad construida con elementos ópticos, con el diseño de rutas de luz y su cruce con la materia, en un espacio que adquiere un volumen envolvente por medio de una secuencia de imágenes y situaciones prediseñadas.

#### **4.1 Especificaciones técnicas**

Las imágenes para la demostración de la metodología planteada las diseñé con base en varios estudios: reflexión y refracción; el estudio específico de la formación de cáusticas; la observación del Sol en telescopio y la dispersión para la visualización de uno o varios arcoíris.

Los elementos ópticos y optomecánicos necesarios para la generación de las imágenes, son montados en la mesa óptica junto con las fuentes de luz necesarias para lograr las imágenes y los efectos ópticos planificados, como se puede ver en las fotografías que muestro más adelante. Como lo dije anteriormente, y me parece importante reiterar, las imágenes están diseñadas para ser observadas en vivo y en movimiento, por tanto las fotografías atienden al proceso de documentación durante la fase experimental.

Durante esta fase primero hice un diseño de secuencia de imágenes, parto de la oscuridad para después entrar a un proceso de visualización de formas en movimiento, entre las cuales surgen en primera instancia tonalidades graduales que van de 476 a 380 nanómetros en el espectro visible, que para el ojo humano se percibe desde el color cian hasta el violeta, para lo cual se planificó el uso de lentes esféricas, cilíndricas, divisores de haz y luz LED, esto hace que se marque de manera contundente una línea que alude a la perspectiva de profundidad que se tiene cuando observamos hacia el infinito.

A través del movimiento este entorno se va transformando en una pieza con ritmos visuales dictados por la formación de diferentes patrones y por cáusticas envolventes, por lo que hice un estudio sobre la formación de cáusticas, para lograr estas imágenes decidí utilizar prismas y elementos refringentes con superficies de diferentes características geométricas y esferas de vidrio transparente.

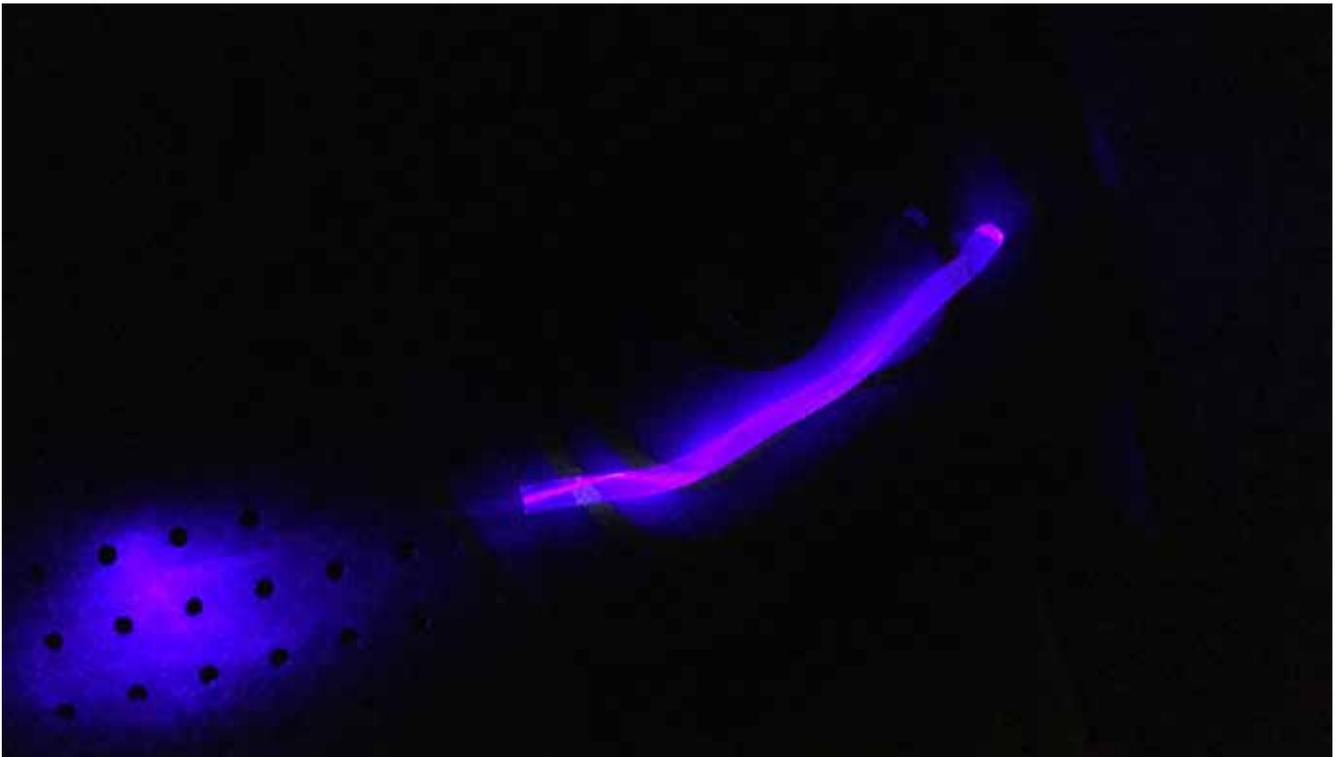
El espacio de experimentación sufre una tercera variante basada en la proyección de una figura que alude a la imagen del Sol vista desde el Telescopio Schmidt-Cassegrain hecho en 1670 y que está en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, de Puebla, México. Para lograr dicha imagen utilicé un láser rojo, en su lugar se puede utilizar un LED de la misma longitud de onda, cuyo haz se debe colimar haciéndolo pasar por un *pinhole* y una lente colimadora. Para finalizar diseñé la formación de uno o varios arcoíris que suceden a periodos breves de penumbra, este efecto se logra utilizando prismas. Es en ese

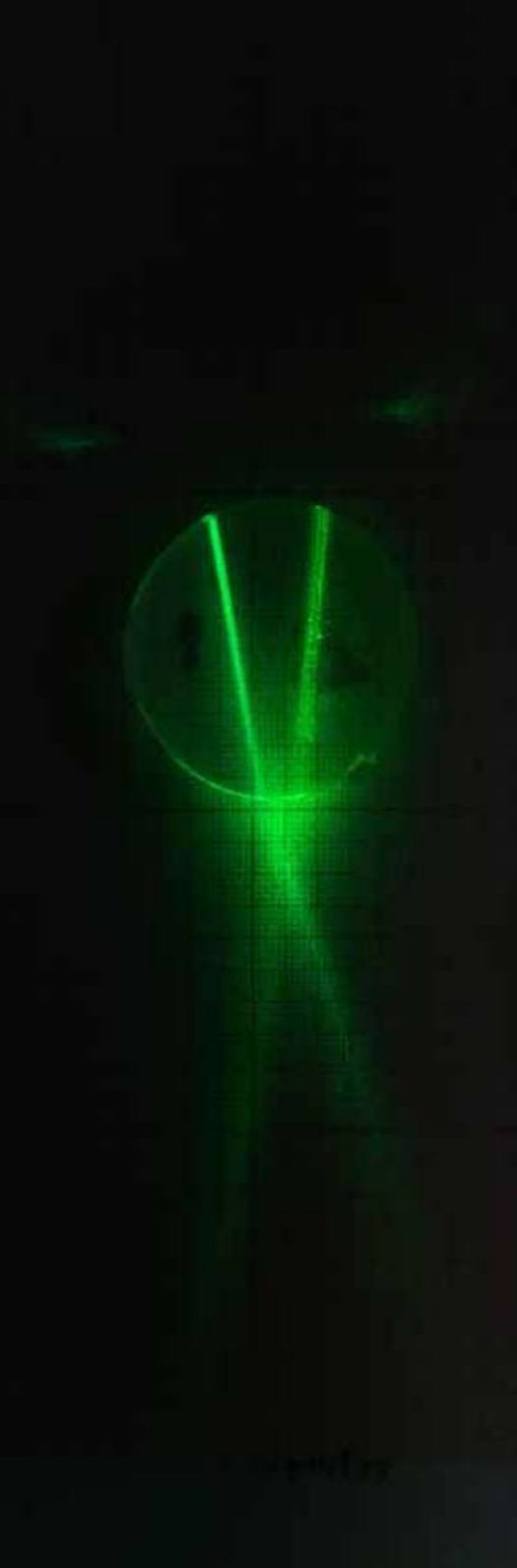
momento que entra en juego la esferita de cristal "mágica", obsequio de mi madre, motivación directa para la realización de esta investigación sobre óptica y luz.

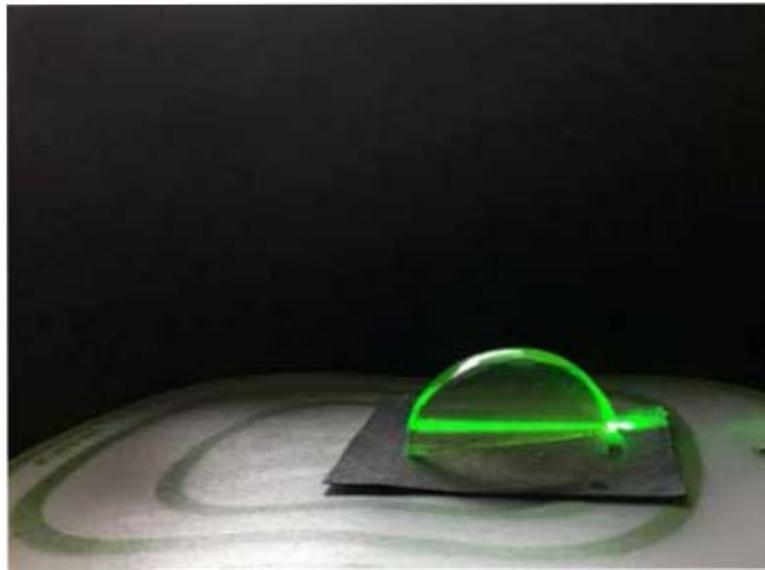
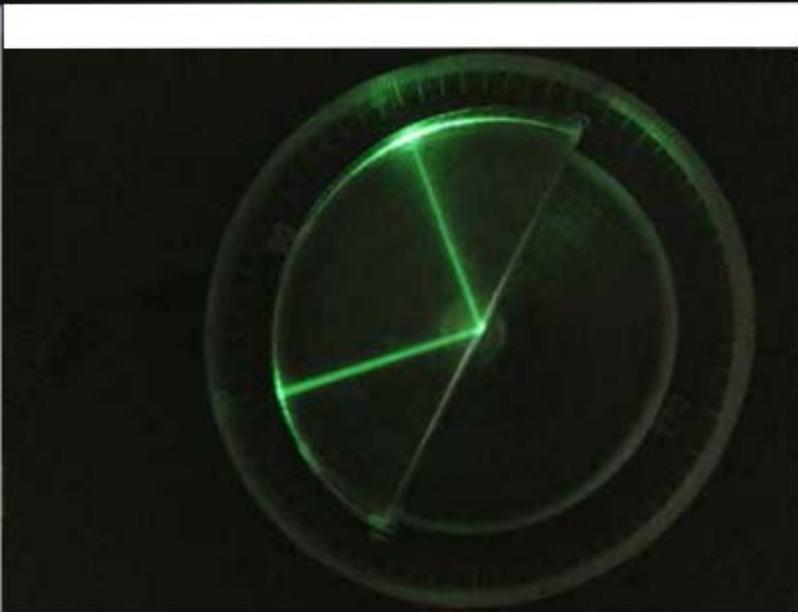
#### **4.2 Fase de investigación y experimentación en Laboratorios de Óptica.**

La fase de investigación y experimentación se realizó en diferentes Laboratorios de óptica dedicados especialmente a estudios científicos, en donde realicé los estudios pertinentes sobre los fenómenos físicos y las leyes físicas de la luz, pero también aproveché para ir planificando y decidiendo el tipo de materiales ópticos

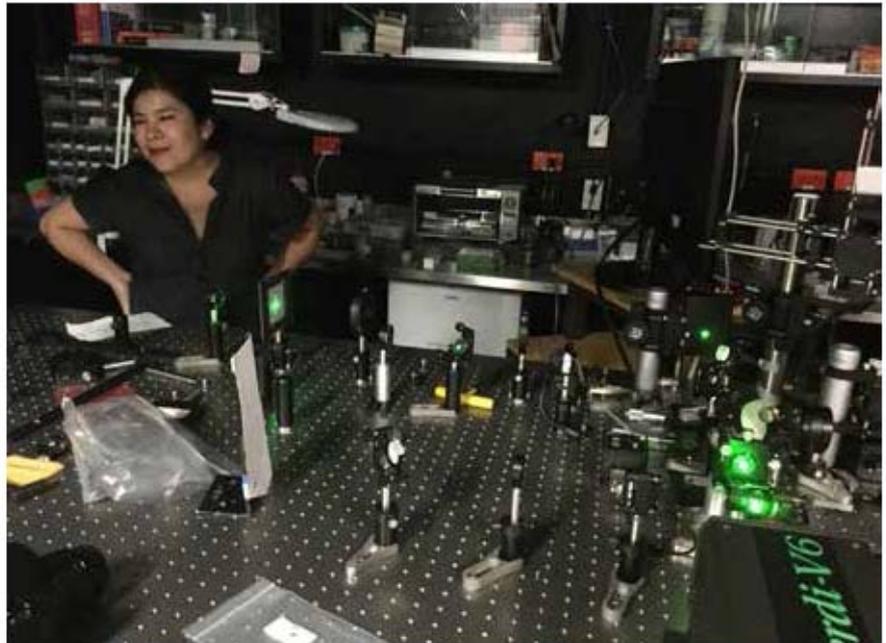
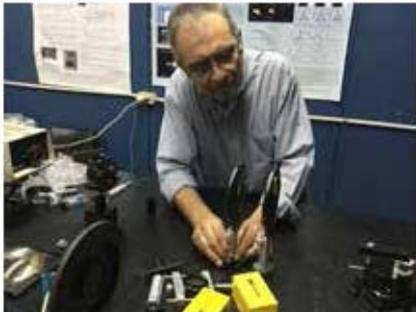
y fuentes de luz que utilizaría en la metodología propuesta. En las siguientes imágenes se observa la documentación del proceso de investigación dentro de los laboratorios de óptica de la Facultad de Ciencias, UNAM con el Fis. Raúl Caudillo Viurquez y la Fis. María José González Vázquez; con el Dr. Reinher Pimentel-Domínguez en la misma Facultad; en el Laboratorio del grupo de investigación de la Dra. Karen Volke del Instituto de Física, UNAM; en el Laboratorio del grupo de investigación del Dr. Efraín Solarte de la Facultad de Ciencia, Universidad del Valle de Cali, Colombia, y en el grupo de investigación del Dr. Maximino Avendaño, del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, UNAM.



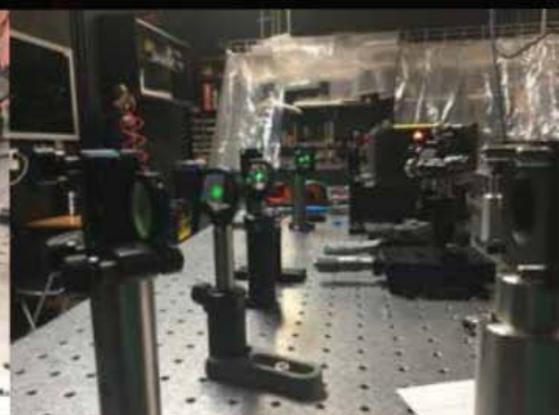
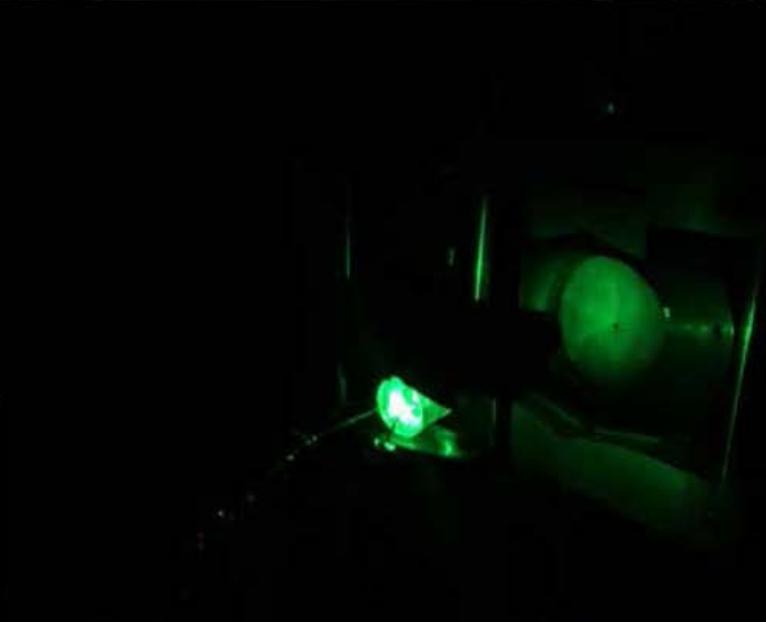
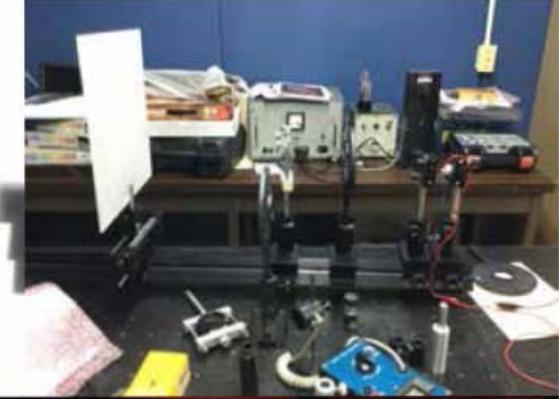


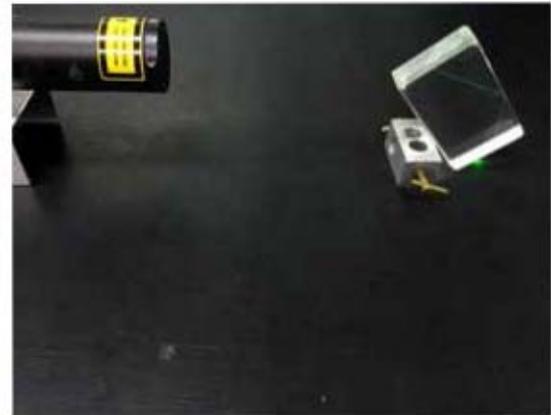
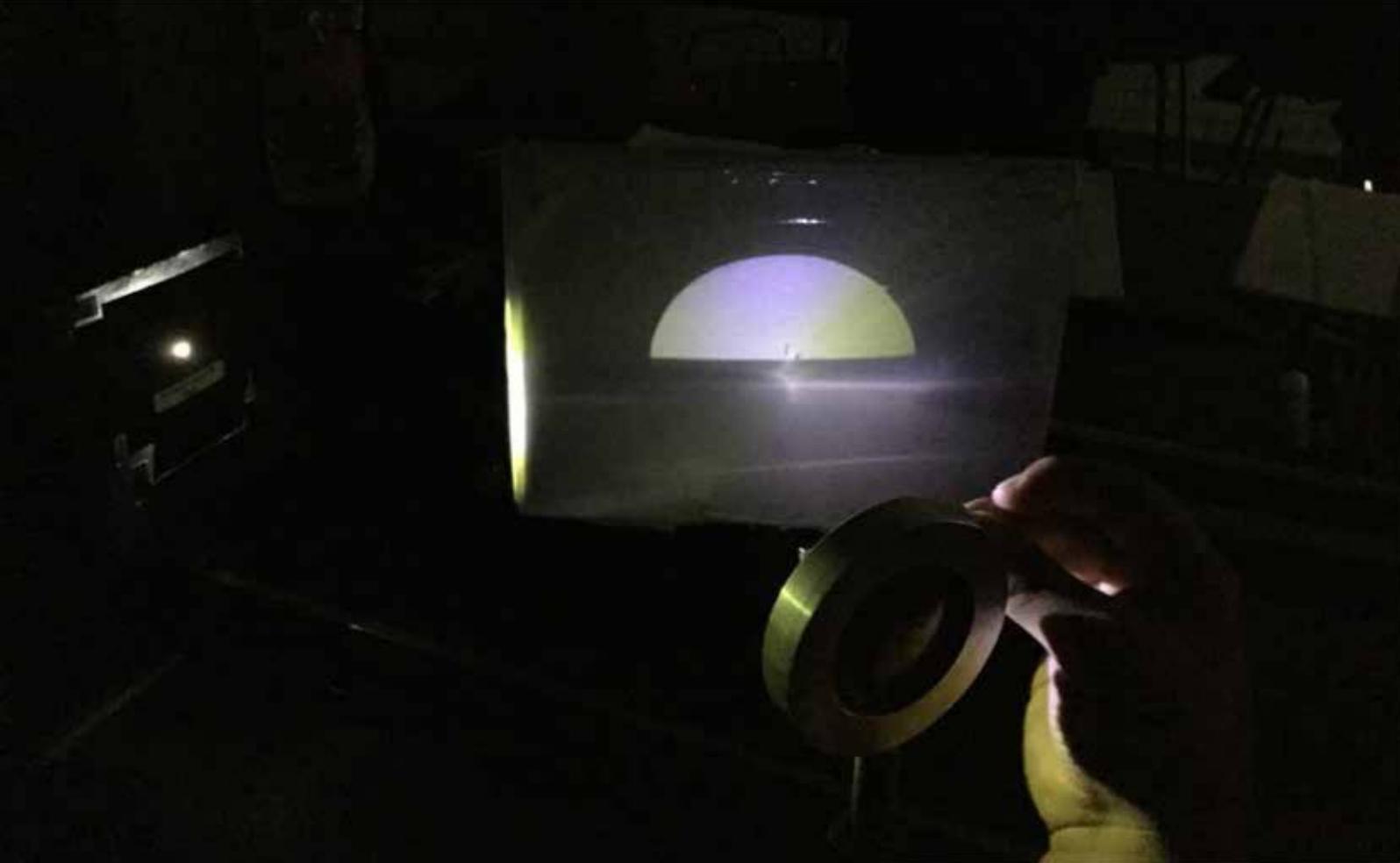






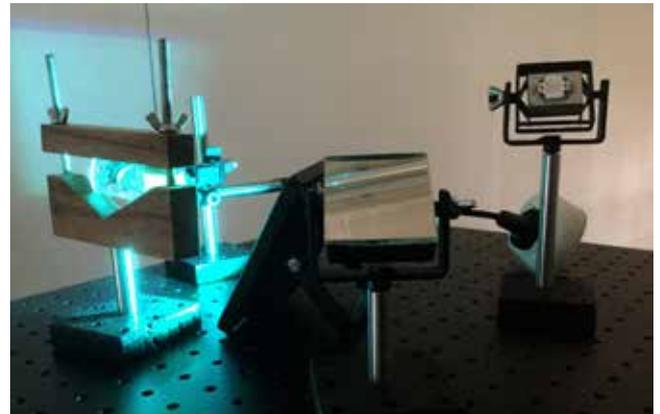
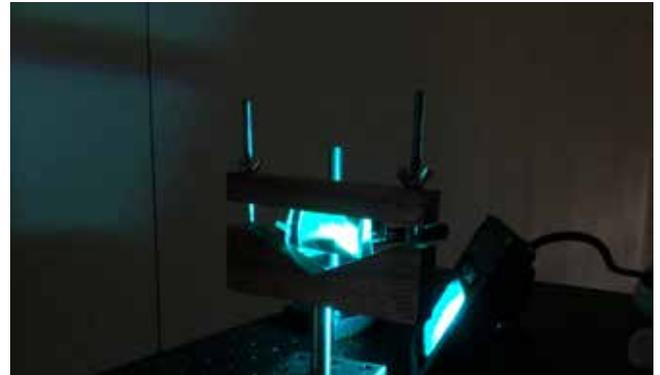


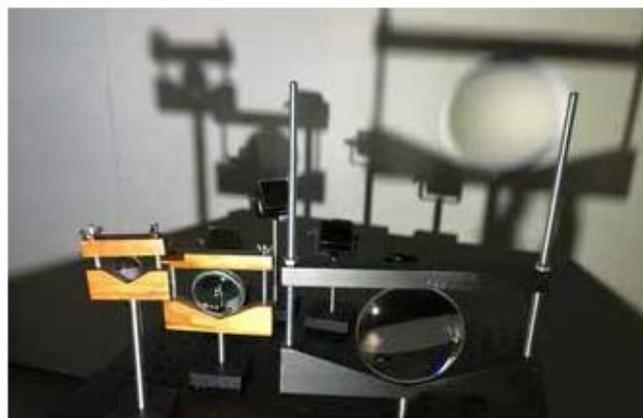
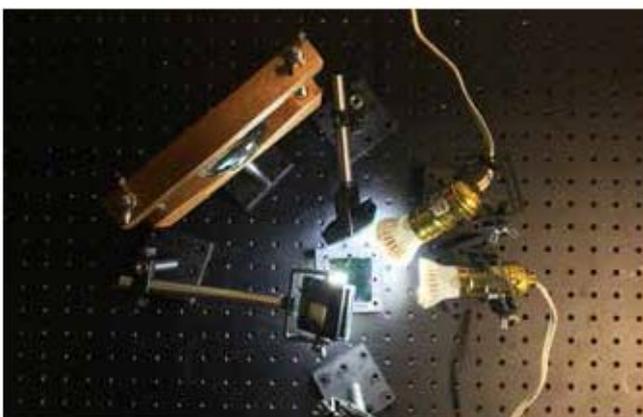
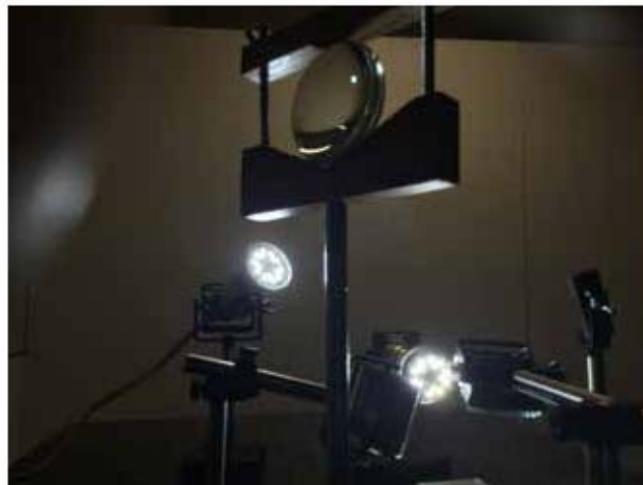
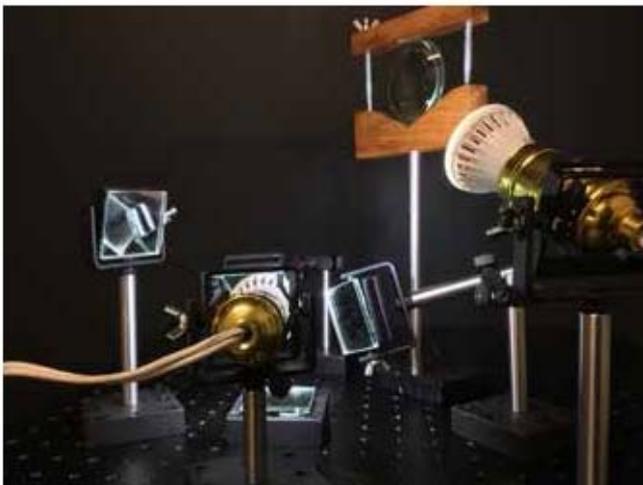




### 4.3 Fase de experimentación con herramientas propias del método propuesto.

La documentación gráfica de la puesta en práctica durante la fase experimental y de comprobación del método, haciendo uso de elementos ópticos recuperados y comprados, junto con los elementos optomecánicos construidos, montados en la mesa óptica para proyectar las imágenes, las luces LED y láser, se muestra en las imágenes a continuación. Esta etapa se realizó en las instalaciones del Posgrado en Artes y Diseño, en la Unidad de Posgrado, UNAM.





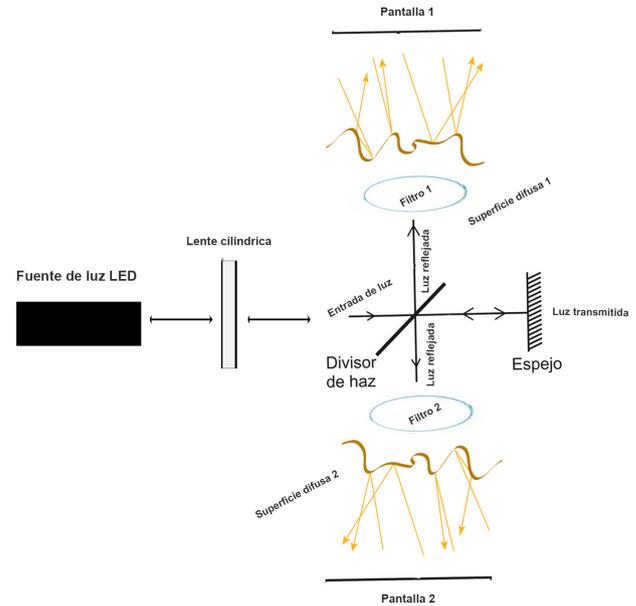
## 4.4 Fase experimental para la proyección de imágenes en movimiento.

En este apartado se expone la documentación realizada durante la fase experimental, desarrollada en gran parte en la Unidad de Posgrado, UNAM. Es importante recordar que esta fase está diseñada para proyectar imágenes diseñadas previamente para que el espectador viva una experiencia visual a través de escenas, en donde se encuentre envuelto 360 grados por la luz y las imágenes en movimiento, en ocasiones podrá transitar en medio o alrededor de ellas, a veces podrá solamente sentarse a observar la secuencia que dicta las distintas modificaciones del espacio.

### 4.4.1 Fase de experimentación #1

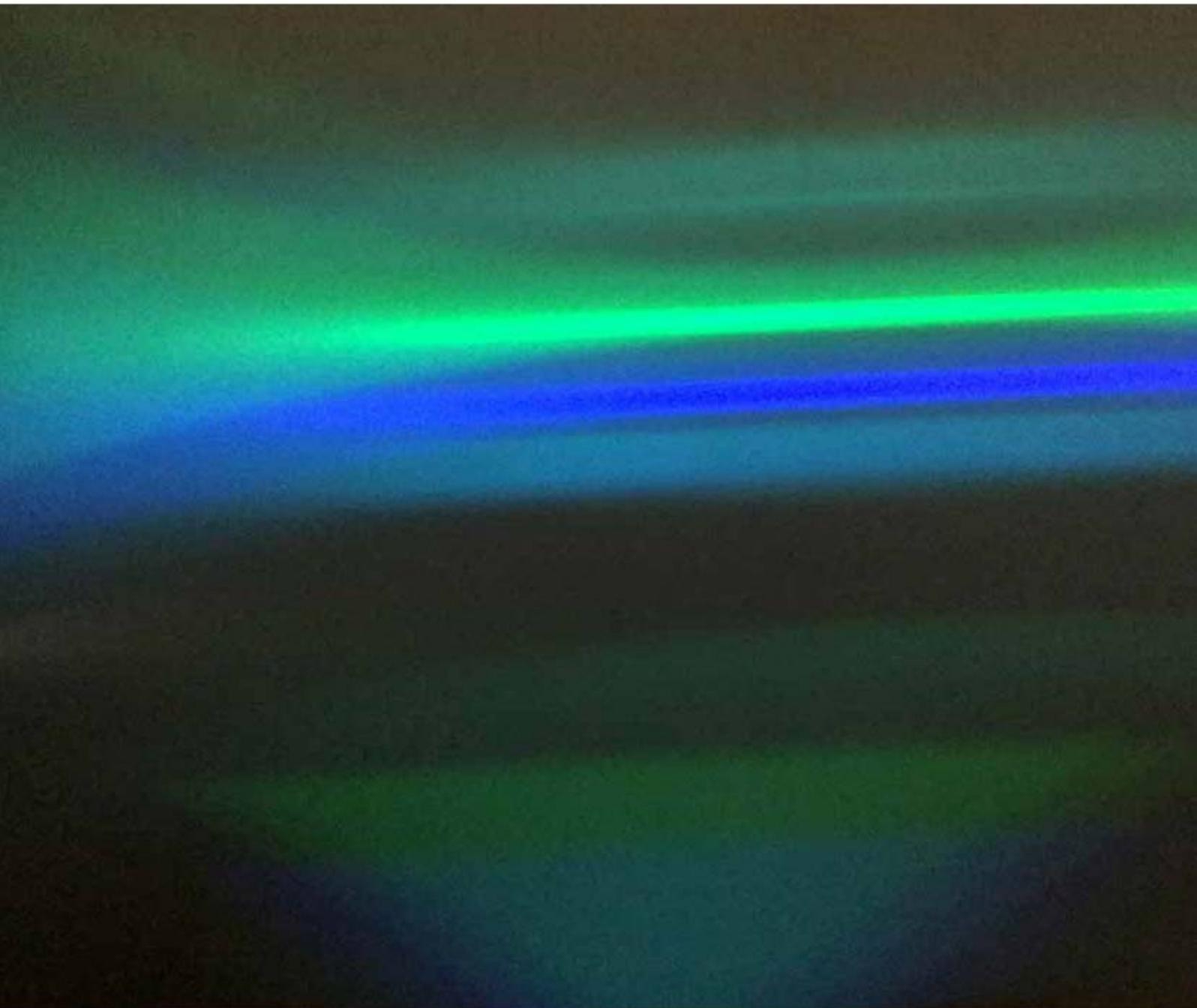
El esquema *Fig 4.4.1* diseñado para realizar la primera parte de la experimentación, se refiere al proceso de visualización de formas en movimiento, entre las cuales surgen en primera instancia tonalidades graduales que van de 476 a 380 nanómetros, en donde se logran posiciones de luz horizontal con ondulaciones y diferentes longitudes de onda que abarcan todo el espacio de proyección. Los materiales ópticos y fuentes de luz que se utilizaron son:

- 2 Lentes cilíndricas positivas
- 5 LEDs de diferente longitud de onda
- 1 Filtro verde
- 1 Filtro rojo
- 1 Lente de superficie difusa
- 1 Divisor de haz
- 2 Espejos planos



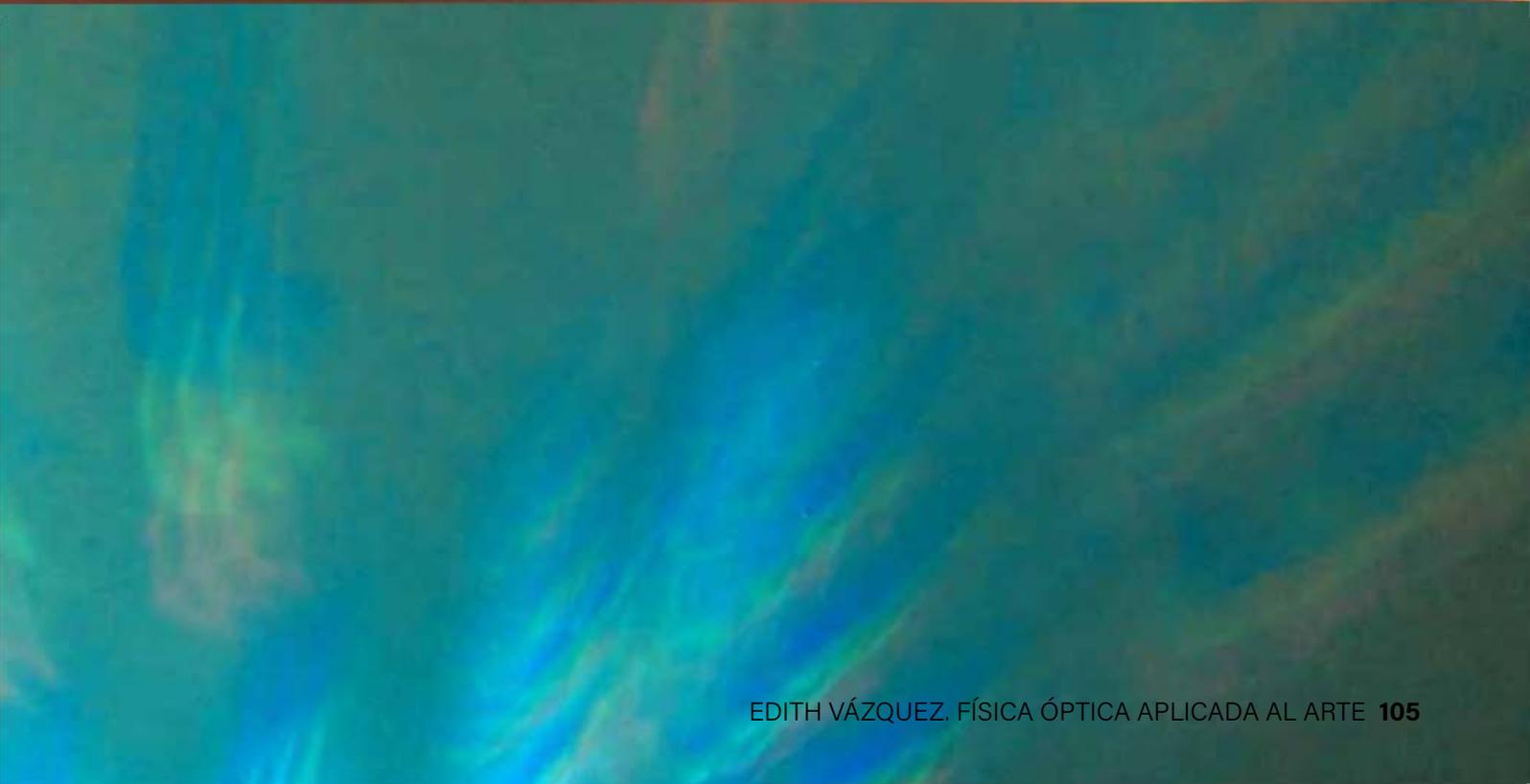
**Figura. 4.4.1**

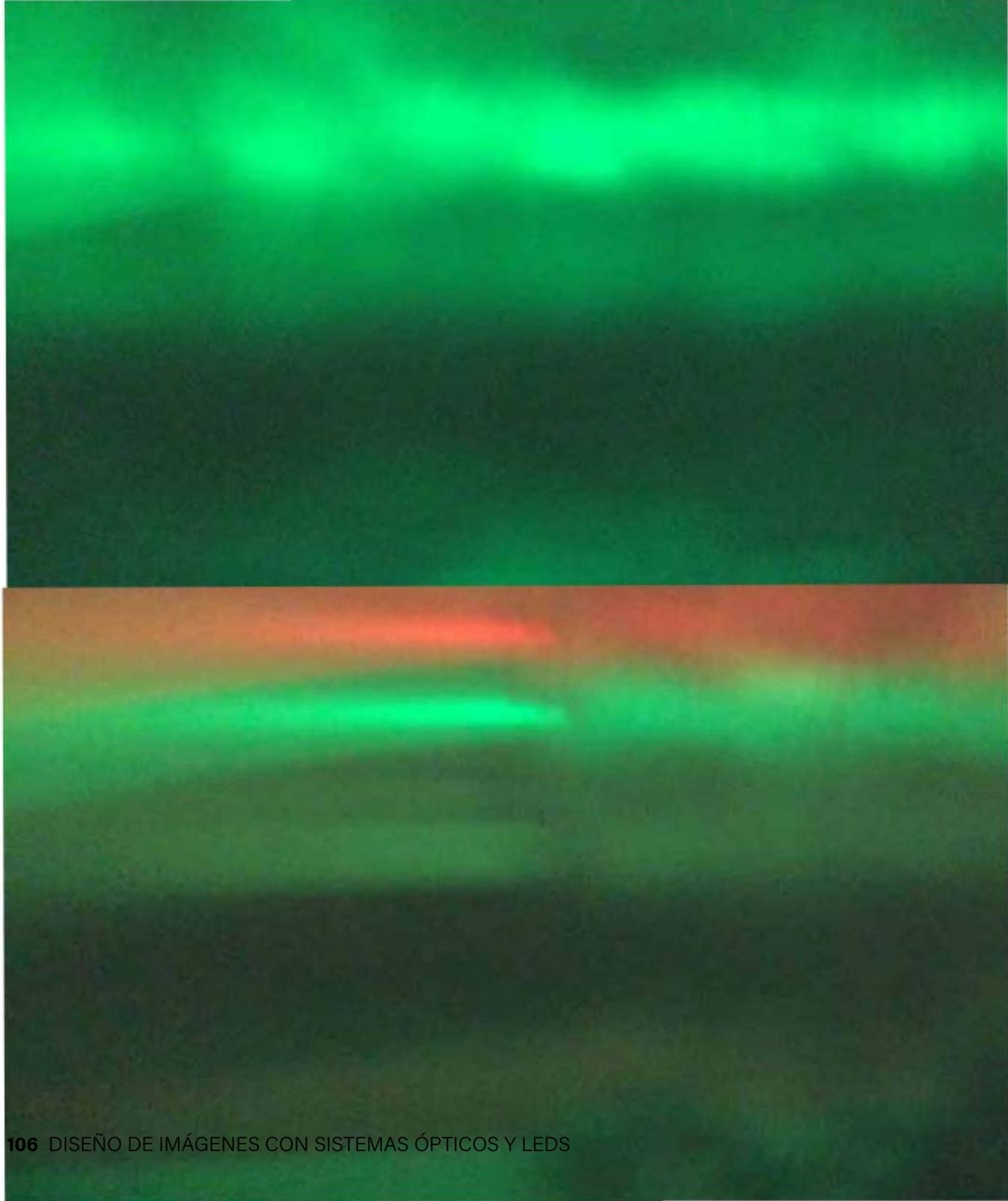
Esquema #1 para montaje en Laboratorio.

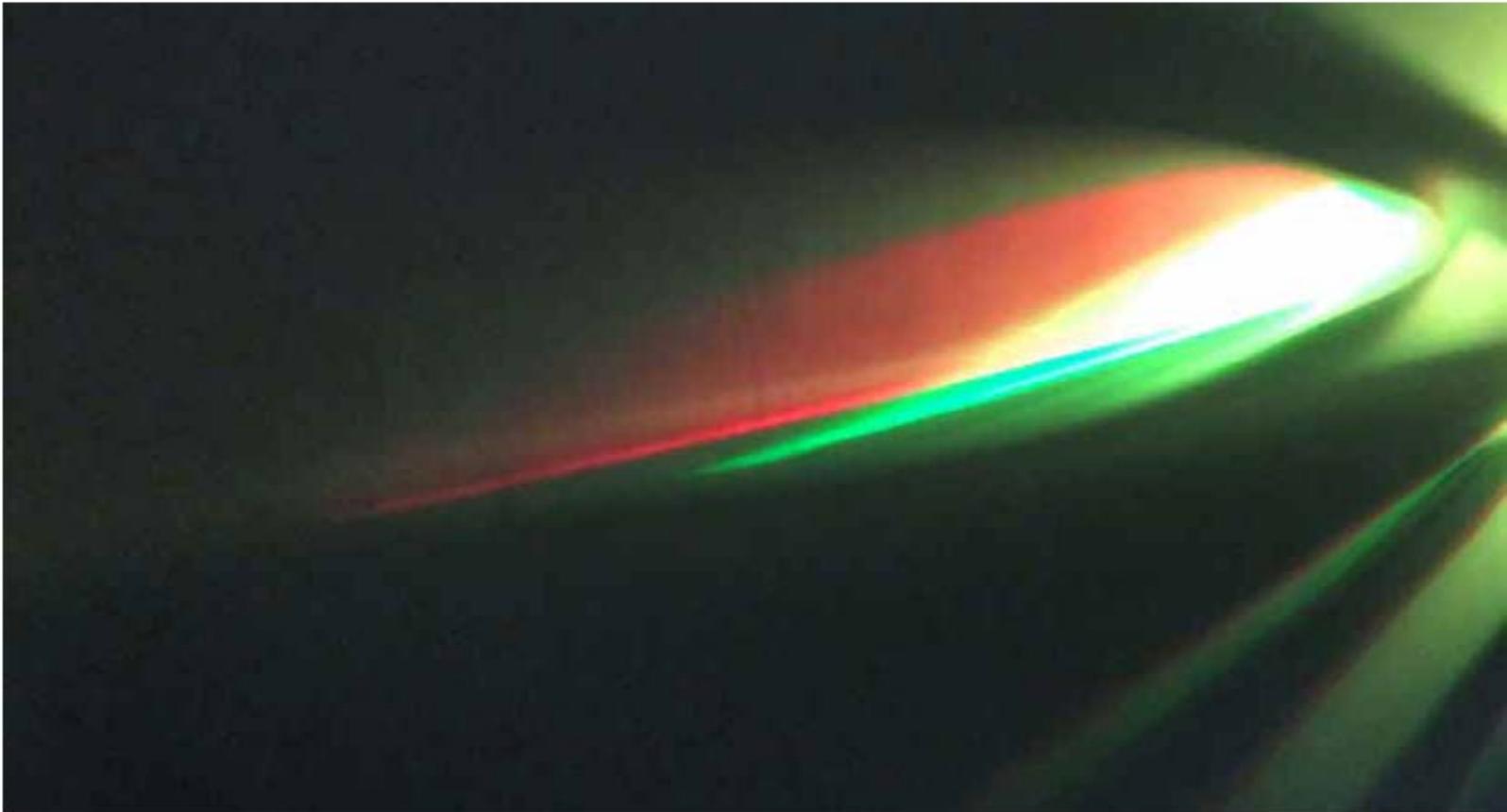












#### 4.4.2 Fase de experimentación #2

La segunda fase experimental y como continuidad a la proyección secuencial de las distintas tonalidades y fi-guras prediseñadas, se observaron modificaciones del espacio y la evolución de la luz cuando viaja a través de los sistemas ópticos. Con el movimiento generado de manera mecánica en los elementos y las fuentes, se fueron construyendo pautas con ritmos visuales que dieron forma a patrones indeterminados y cáusticas envolventes, para ello realicé un estudio sobre la cáustica *Fig. 4.4.2* que se refiere a la envolvente de los rayos de luz reflejados o refractados por una superficie curva u objeto. En *la Fig. 4.4.3* es donde se enfoca el haz de luz entrante, desde el exterior del anillo.

Los materiales ópticos y fuentes de luz que se utilizaron en esta fase son:

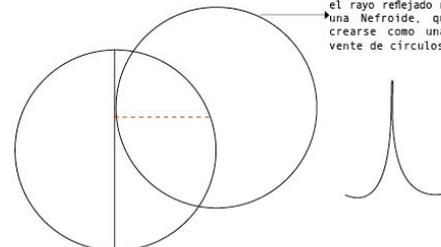
- 1 Lente plano convexa, diámetro 100 mm
- 1 Lente biconvexa, diámetro 105 mm
- 1 Lente convexo, diámetro 50 mm
- 1 Lente bicóncavo, diámetro 90mm
- 5 LEDs de diferente longitud de onda
- 1 Lente de Fresnel, 280 x 210 mm
- 2 Espejos planos
- 1 Divisor de haz
- 2 Lentes rellenas con agua o aceite
- 1 superficie con ondas esféricas

Lo que en el esquema *Fig. 4.4.4* se señala como lentes rellenas de agua o aceite, se refiere a lentes que mandé a construir para lograr que con la incidencia de luz se generaran cáusticas en movimiento. Respecto a la pantalla, se refiere a telas

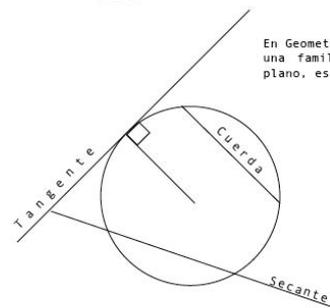
acrílicos, paredes, agua o cualquier superficie en donde se proyectan las imágenes. Los espejos en este caso funcionan para lograr reflexión pero también como pantalla, debido a que se considera que el espectador puede circular alrededor del espacio e incluso alrededor de la mesa óptica. La superficie con ondas esféricas se refiere a una superficie construida por ondulaciones en una placa de vidrio o plástico y por canicas de diferentes diámetros y colores.

CÁUSTICA: Se refiere a la curva en la cual los rayos de luz son tangentes.

Si un círculo refleja rayos paralelos de luz, el rayo reflejado nos daría una Nefroide, que puede crearse como una envolvente de círculos

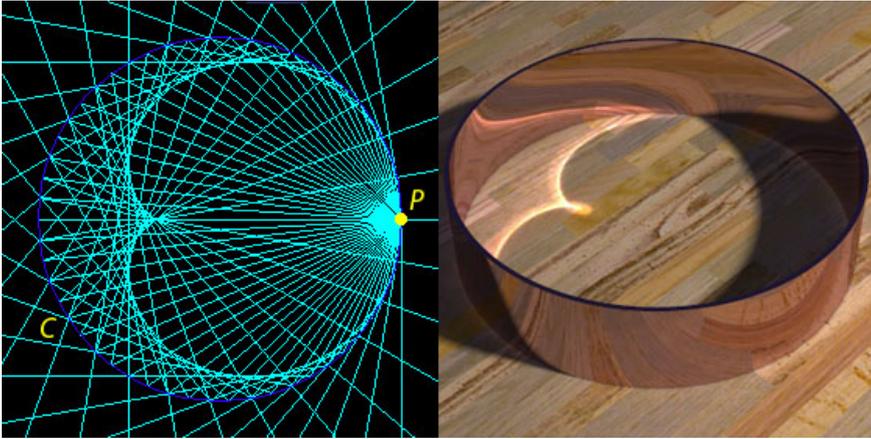


En Geometria una envolvente de una familia de curvas en el plano, es una curva Tangente.



**Figura 4.4.2**

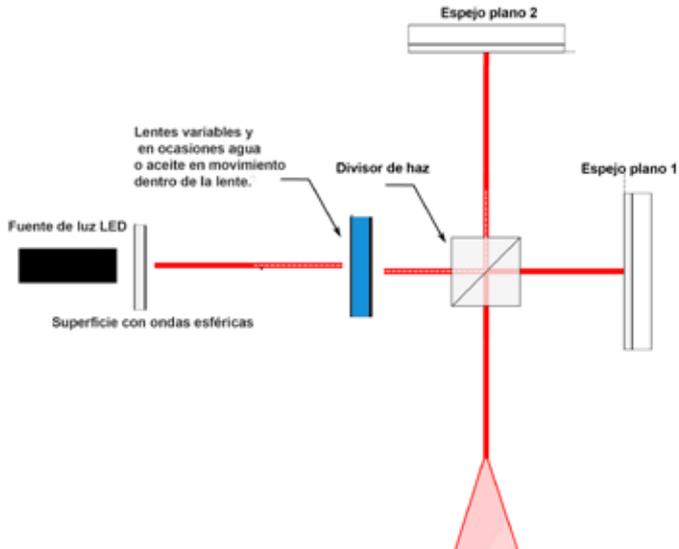
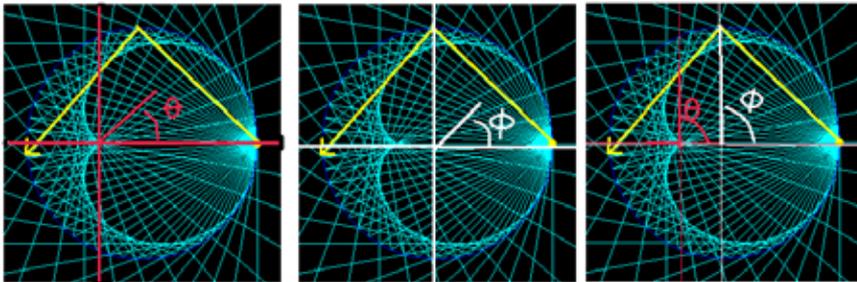
Cáusticas.



**Figura 4.4.3**

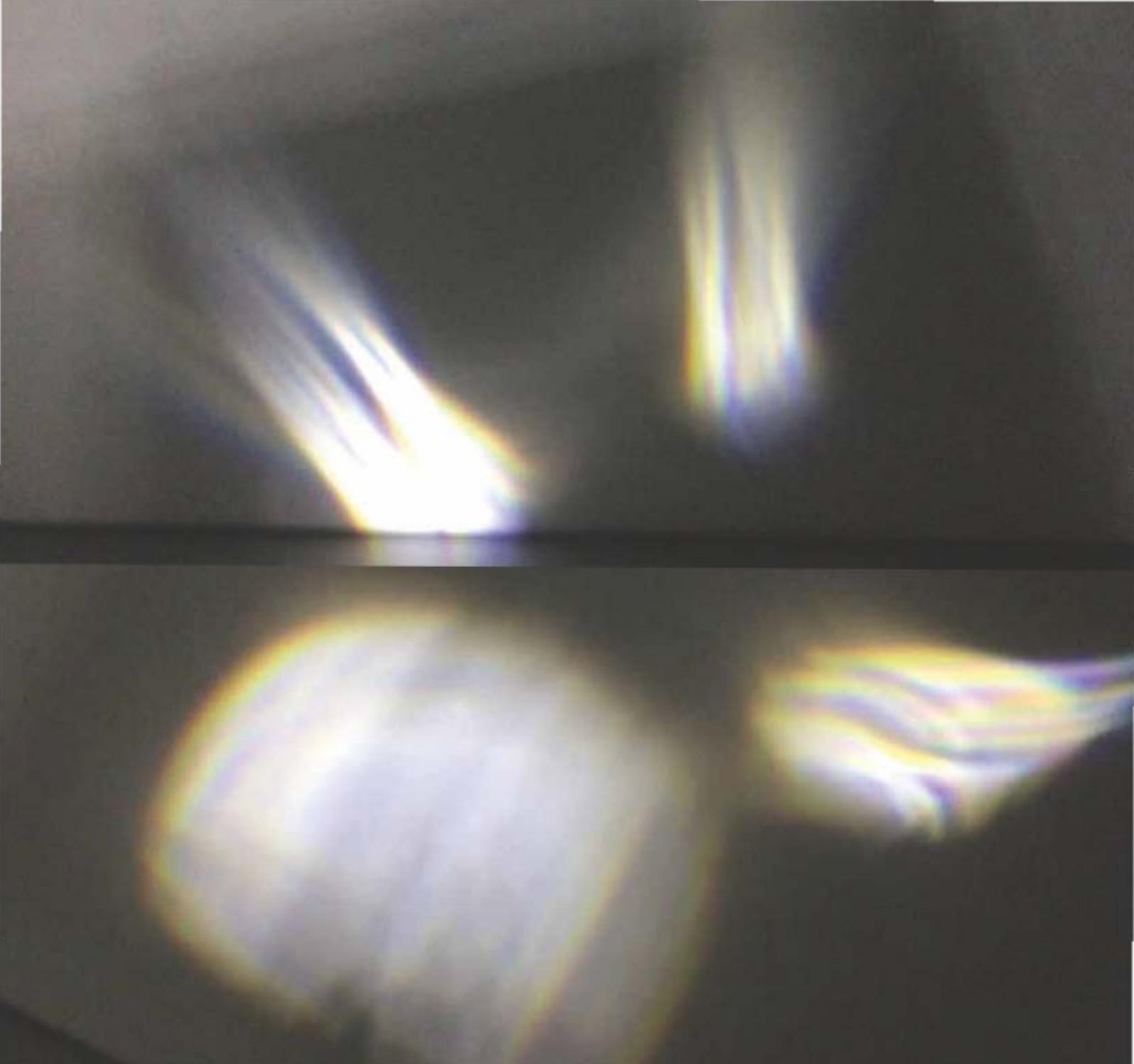
Cáusticas.

<https://www.datuopinion.com/fotosfera>

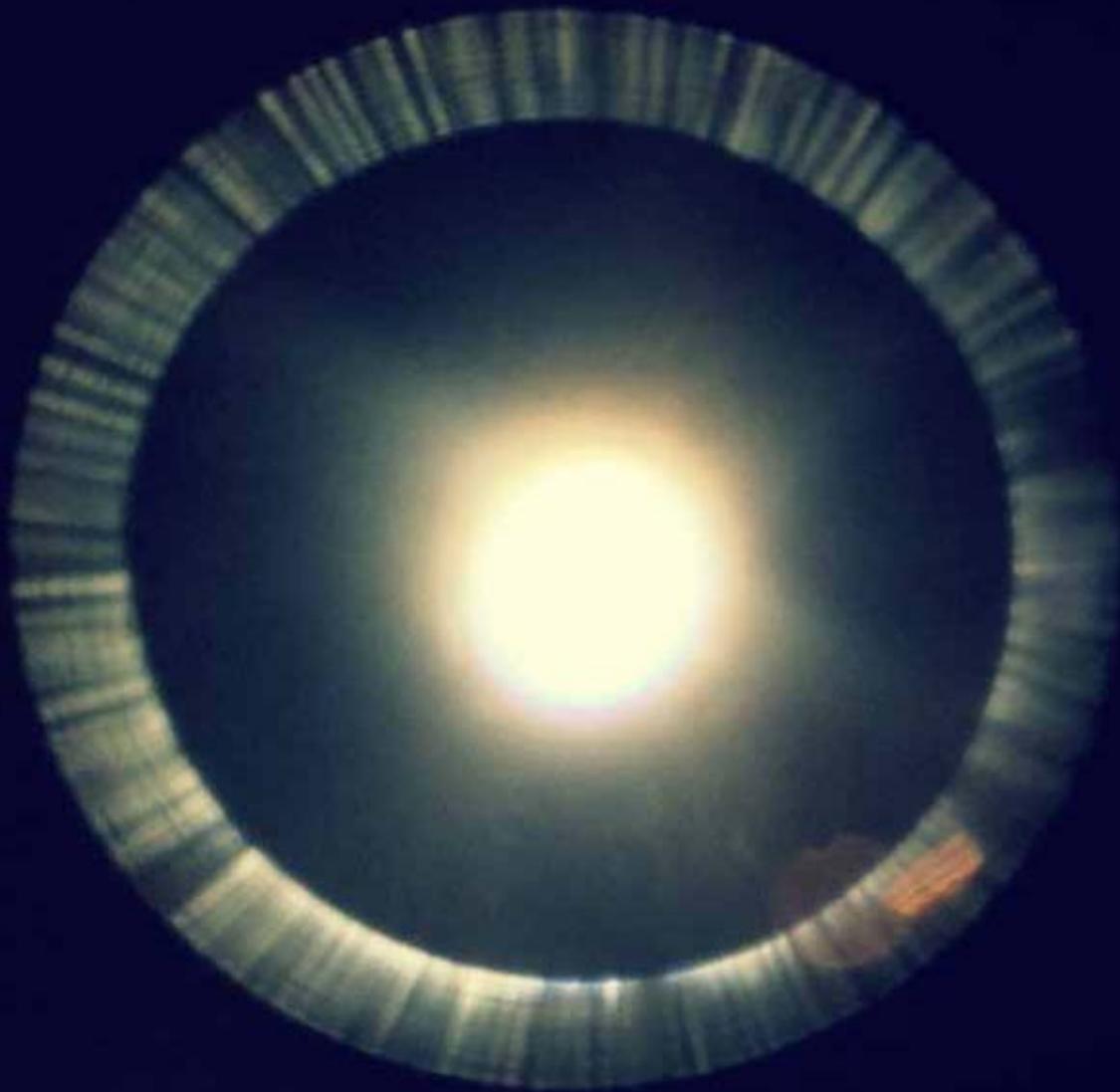


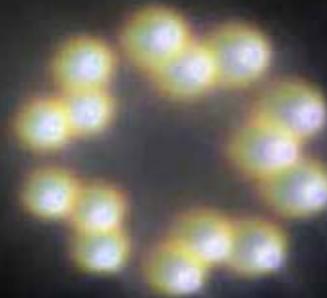
**Figura. 4.4.4**

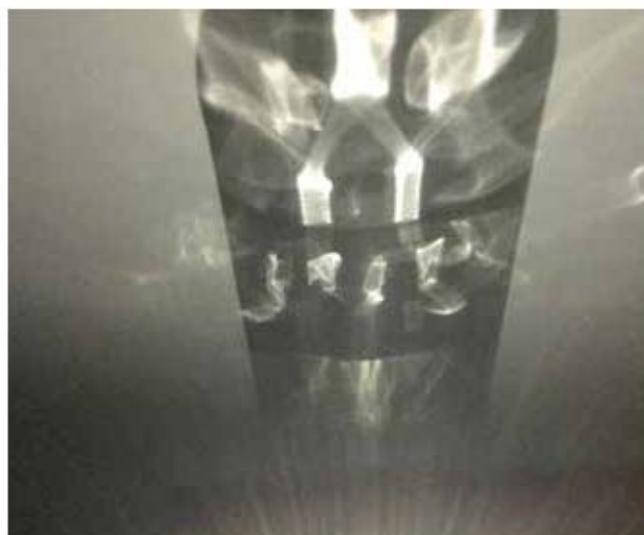
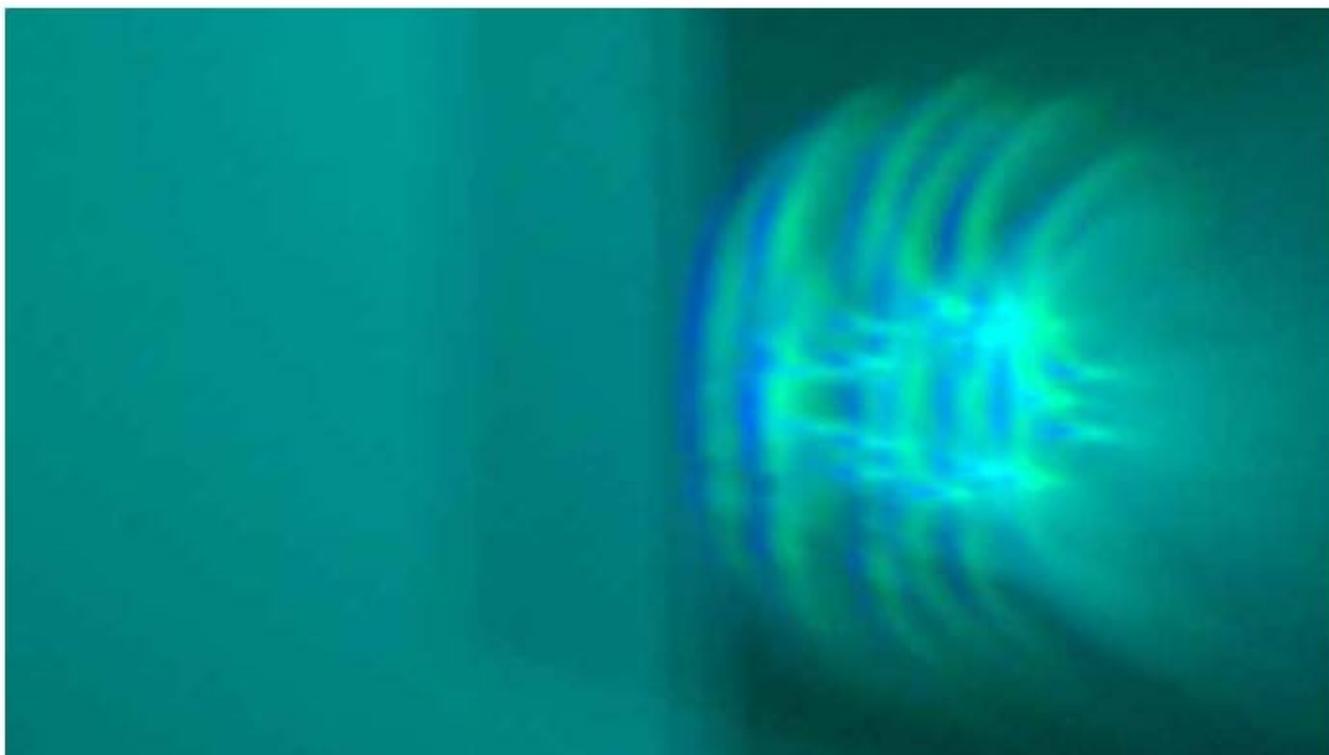
Esquema #2 para montaje en Laboratorio.

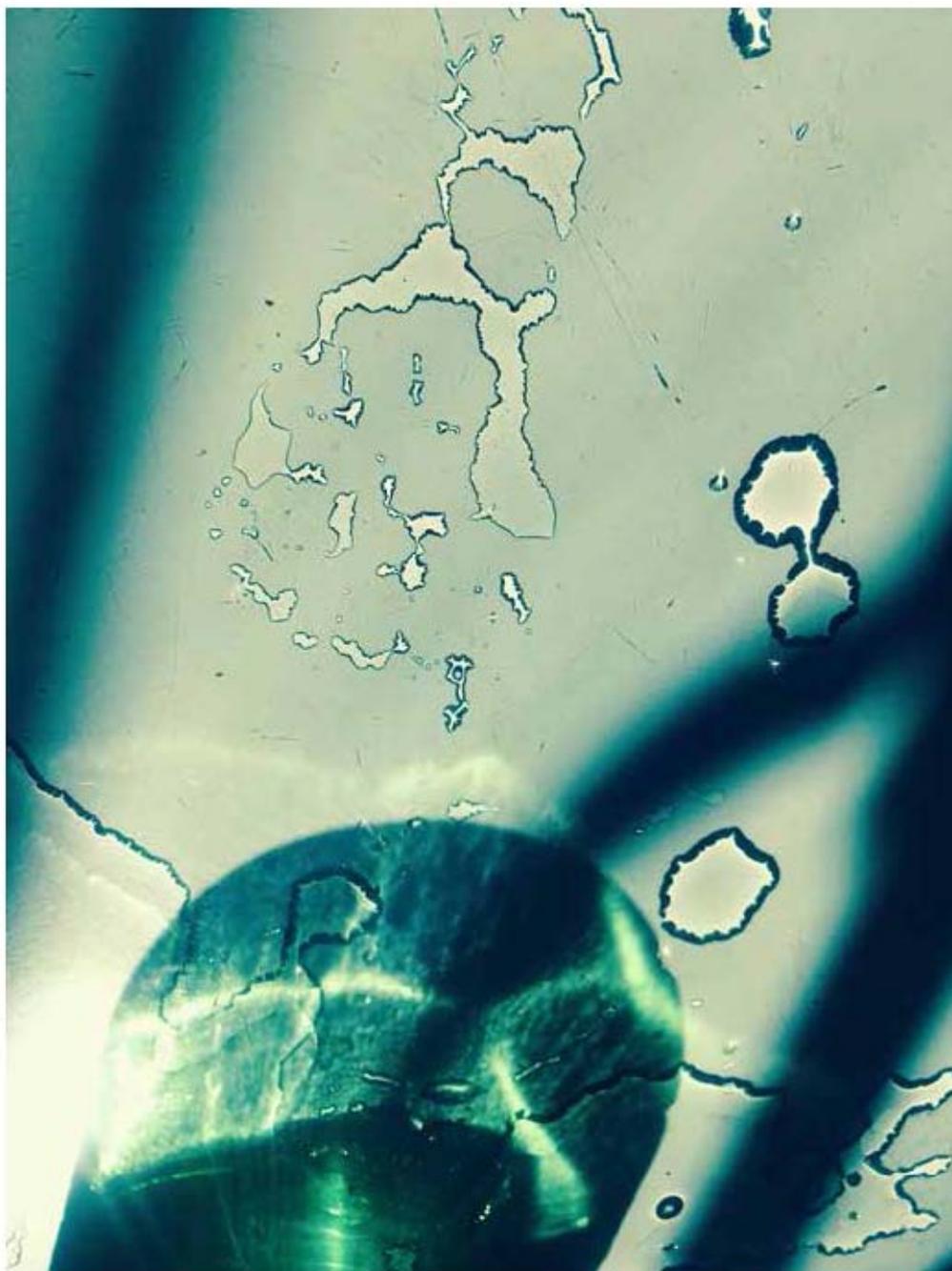


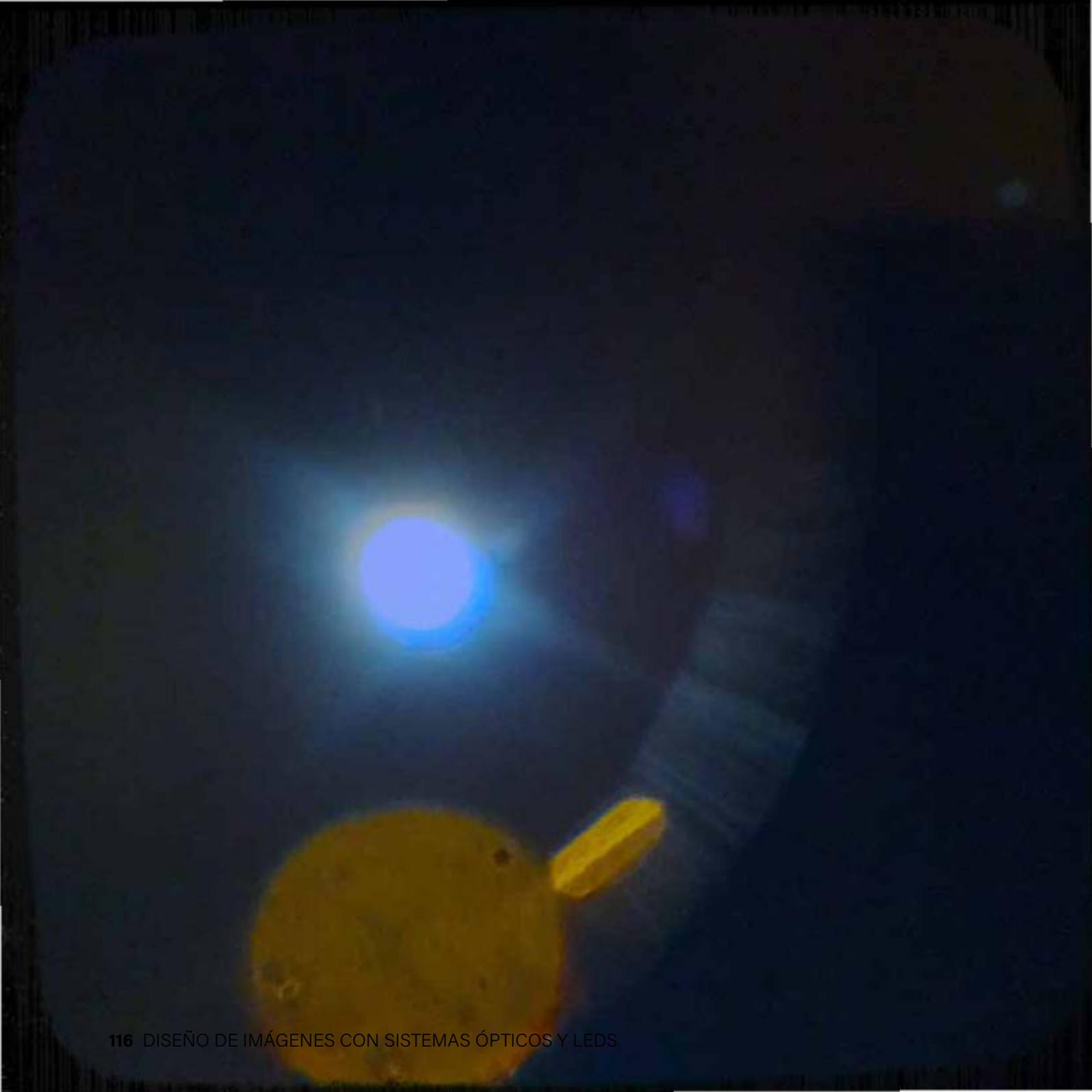




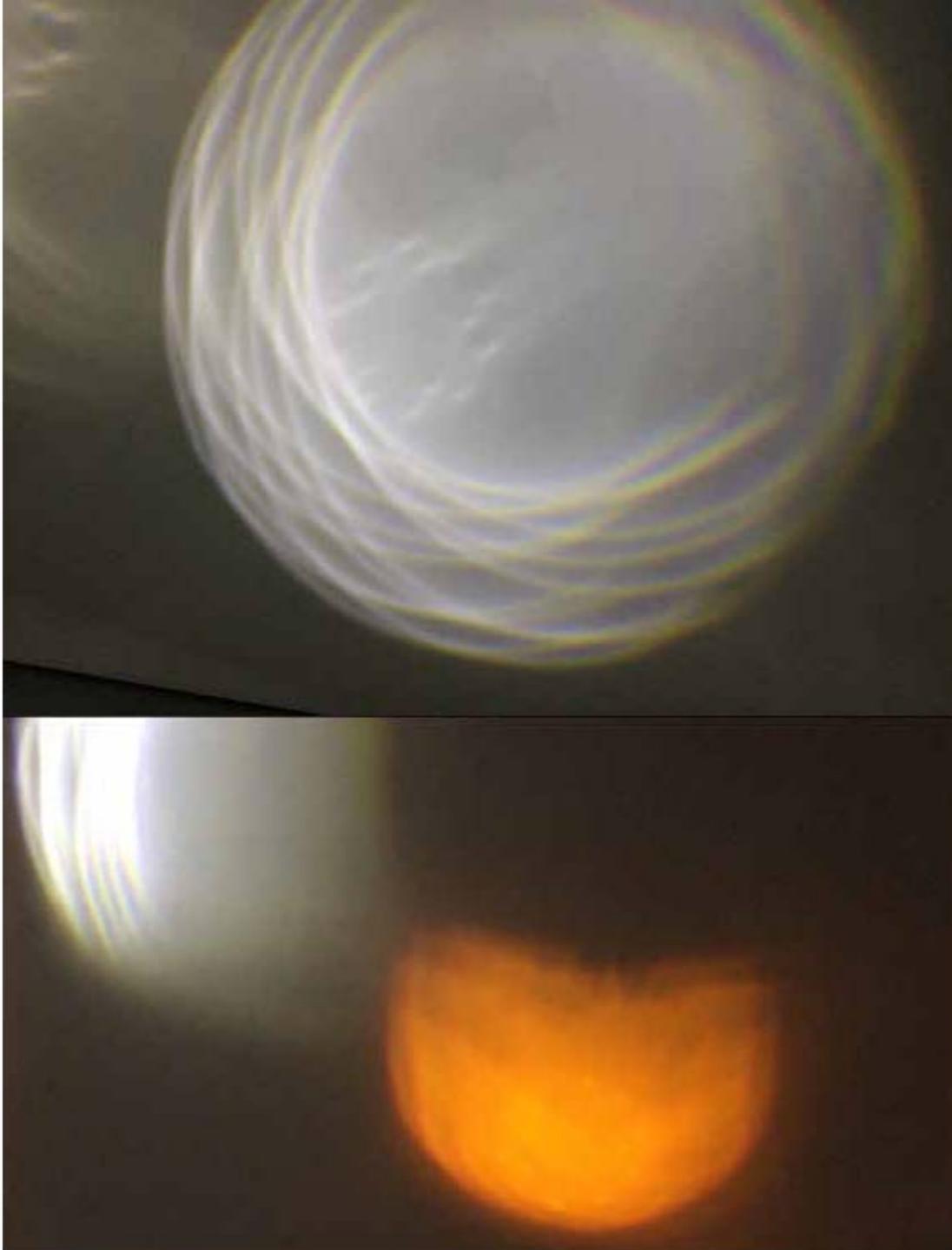


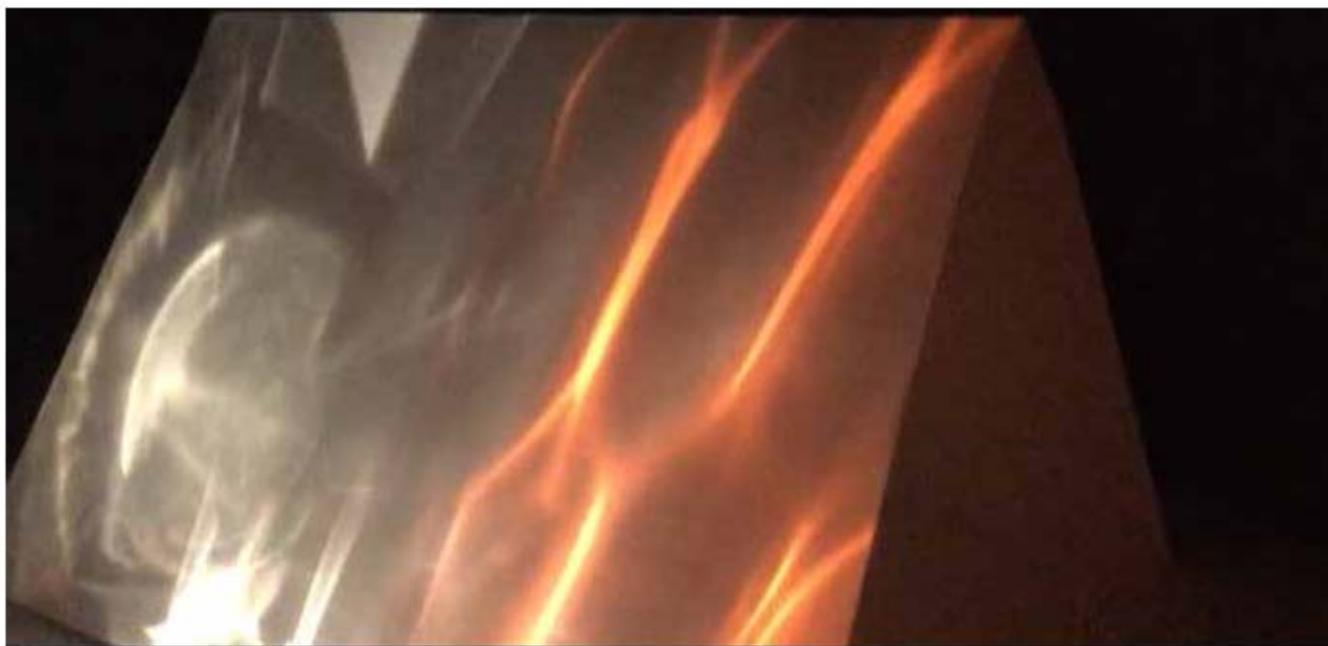












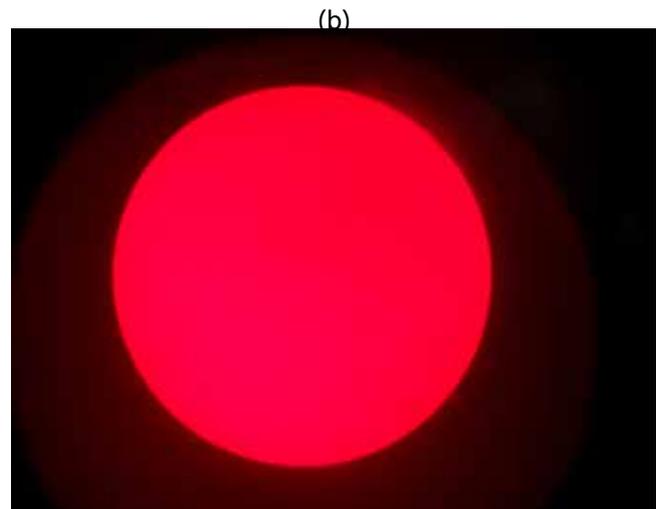
### 4.4.3 Fase de experimentación #3

Para la tercera fase experimental trabajé con la representación de la imagen del Sol, basada en la experiencia de visualización del Sol y las Estrellas con el Telescopio Schmidt-Cassegrain del año 1970 Fig. 4.4.5 en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México, durante el curso *Psicofísica del color* impartido por la Dra. Jazmín Carranza Gallardo. La idea de la proyección de la imagen del sol en una pieza como la que se plantea en esta investigación, está relacionada con la tridimensionalidad del espacio, en donde se construye

un escenario preciso mediado por la percepción que vive el espectador de cercanía con el sol, a través de una proyección no plana, que se logra utilizando materiales de proyección ideales para lograr el objetivo.

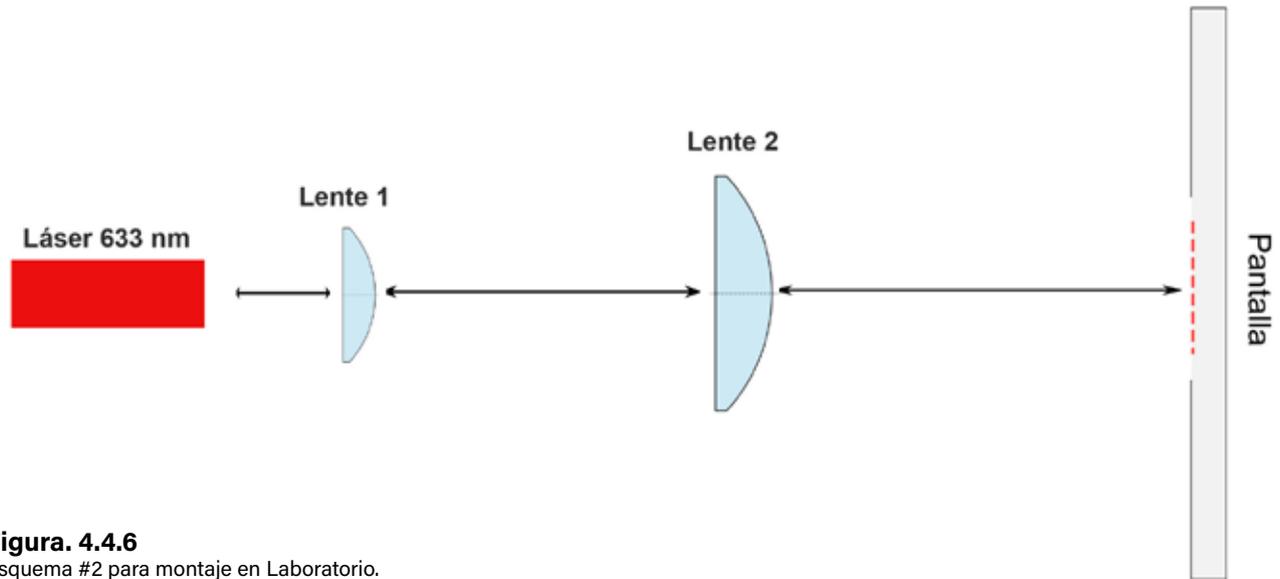
Los materiales ópticos y fuentes de luz que se utilizaron en esta fase son:

- 1 Laser 633 nm
- 1 Lente plano-convexa
- 1 Lente plano-convexa
- 1 Pantalla de proyección para pruebas



**Figura 4.4.5**  
Observación en Telescopio Schmidt-Cassegrain (a) y fotografía que le hice al Sol a través del objetivo (b).

#### 4.4.4 Fase de experimentación #4



**Figura. 4.4.6**  
Esquema #2 para montaje en Laboratorio.



La fase experimental número 4 estuvo dedicada a la generación de uno o varios patrones en donde se delimita bien la presencia de los colores de todo el espectro, lo que deviene en la proyección de uno o varios arcoíris. Para ello utilicé diferentes lentes y prismas y el estudio se basa en la dispersión, cuyo principio fue explicado en el apartado 2.4.4 del capítulo dos y para el cual no es necesario generar un esquema de montaje óptico en Laboratorio. Es en esta última fase experimental que entró en juego la esferita mágica de la que he hablado a lo largo de la

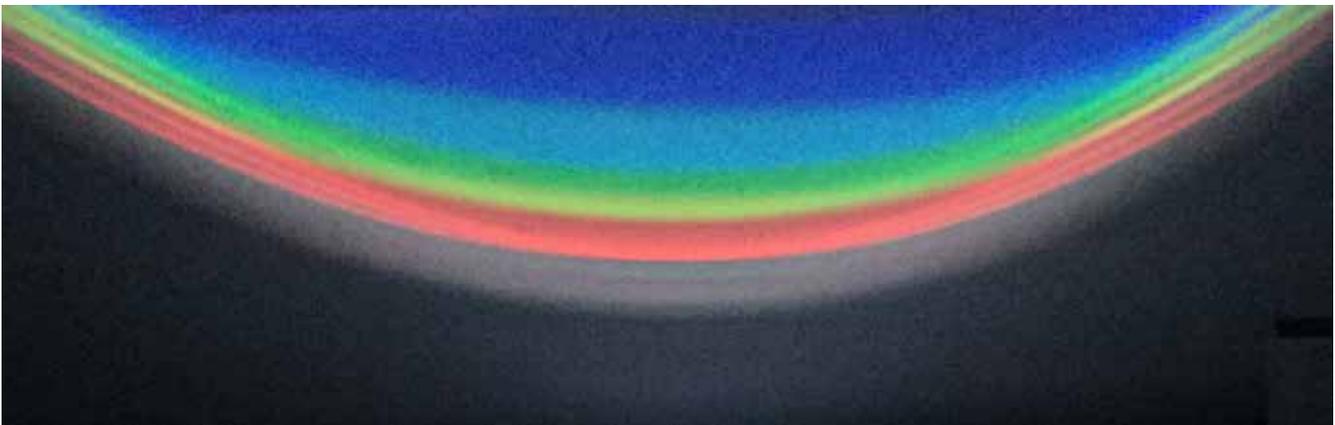
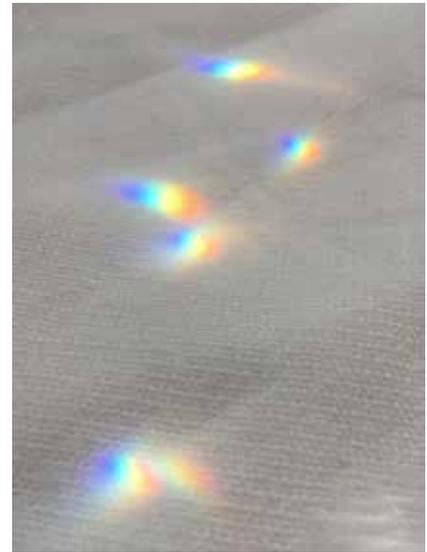
tesis, la cual al ser incidida por luz blanca da forma a una infinidad de arcoíris. Al igual que en los experimentos anteriores, las imágenes son ideadas para ser generadas con movimientos mecánicos en el espacio expositivo, por tanto resulta necesario vivir la obra.

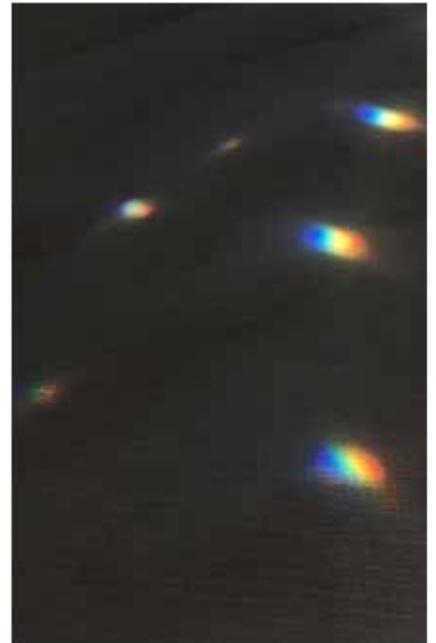
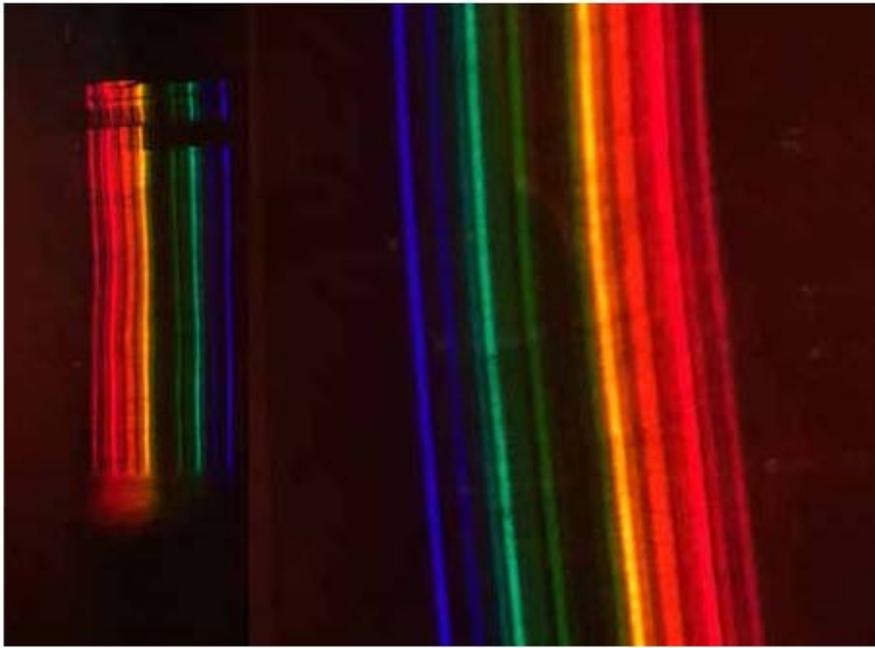
Los materiales ópticos y fuentes de luz que se utilizaron en esta fase son:

Luz LED blanca, 50 w.

Prismas varios

Diversas pantallas de proyección







## CAPÍTULO 5

# DISEÑO DE IMÁGENES POR REFRACCIÓN CON EL MÉTO- DO DE PANTA- LLAS NULAS

**E**ste capítulo está escrito con base en la investigación realizada en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, UNAM, con la tutoría del Dr. Maximino Avendaño Alejo y en colaboración con el M en I. Gabriel Castillo Santiago. El resultado del trabajo fue presentado en Póster Científico durante el Segundo Congreso Internacional CILCA II Luz Ciencia Arte, del 13 al 17 de mayo de 2019, Puebla, México. Se presentó también como ponencia oral durante el Encuentro Internacional de Óptica RIAO 2019, el 25 de septiembre de 2019 en la ciudad de Cancún, México.

### **5.1 Pantallas Nulas por refracción para su aplicación en piezas de arte.**

Las pantallas nulas se utilizan en el terreno de la ciencia para evaluar y medir las aberraciones de superficies ópticas cóncavas y convexas. Se reconocen como prueban tipo Ronchi, por el físico italiano Vasco Ronchi, y Hartmann por el alemán Johannes Hartmann. El principio básico de estas pruebas consiste en diseñar una pantalla, a partir de patrones tipo Ronchi, realizadas con patrones en forma de líneas o tipo Hartmann, patrones hechos en forma de orificios, las cuales

al ser colocadas en un arreglo óptico, darán forma a la proyección de una imagen ordenada en el plano de observación predefinido. Existen a la fecha muchas investigaciones que explican con detenimiento las características, metodología y matemática para llevar a cabo estas pruebas.<sup>33 34 35</sup>

Para esta investigación se retomó el diseño de pantallas nulas pero no a partir de patrones, sino a partir de una fotografía en donde aparece un rostro con el cual trabajamos en el procesamiento de imágenes, para definir un conjunto de puntos distribuidos no uniformemente y con el cual se dará forma a un patrón predefinido que atiende al diseño de imágenes para piezas de arte. En este caso se plantea que las imágenes pueden

33 G.Castillo Santiago, "Diseño y evaluación de lentes plano-convexas esféricas rápidas", (Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2015).

34 Jesús A. Del Olmo Márquez, "Interferómetro utilizando un modulador de fase para evaluar lentes esféricas", (Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2017).

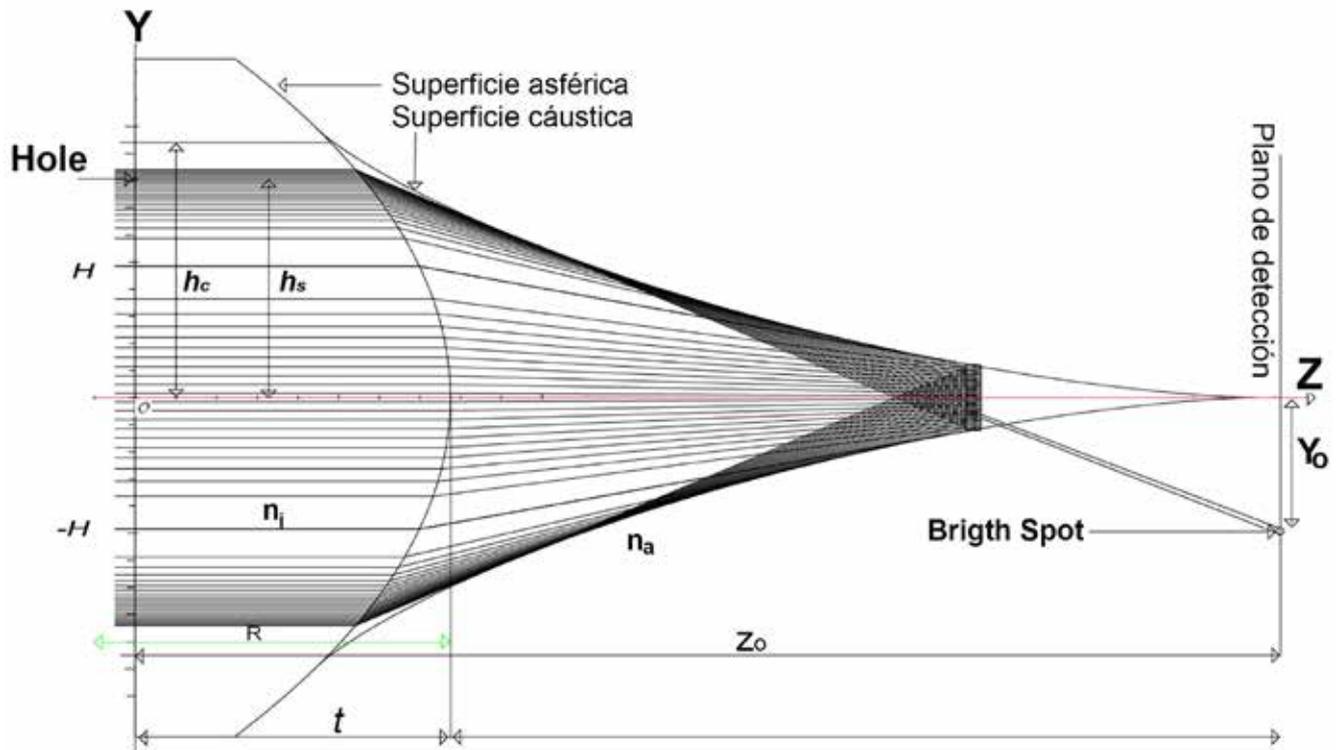
35 G. Castillo-Santiago, D. Castán-Ricaño, M. Avendaño, et al. "Design of hartmann type null screens for testing a plano-convex aspheric lens with a ccd sensor inside the caustic," *Optics Express* 24, 19405 (2016).

aplicarse a piezas escultóricas o en piezas inmersivas, que se refiere a un espacio arquitectónico modificado en su totalidad por luz e imágenes al cual entra el espectador para vivir una experiencia visual.

Este método abre posibilidades de exploración artística, ya que a partir de una fotografía se pueden obtener patrones para ser observados bajo un proceso de formación y deformación de la imagen en diferentes planos de detección. Con esto, se propone la construcción

de nuevos modelos de representación en el arte con base en la teoría científica. El diseño de imágenes con el método de pantallas nulas propone que un retrato fotográfico venga deconstruido para ser observado bajo un proceso de deformación, en donde también entran en juego las posibilidades discursivas en torno a la identidad y a las prácticas de ocultamiento de la misma por medio de sistemas ópticos y pantallas nulas.

## 5.2 Teoría



**Figura 5.1**  
Trazo exacto de rayos en una lente esférica.

Consideramos el plano de incidencia Y-Z, que es una sección transversal de la lente simple, con simetría de revolución alrededor del eje Z y se hace incidir un frente de onda plano que viaja de izquierda a derecha. Entonces, definimos que el eje Z es paralelo al eje óptico, asumimos que el plano Y - Z es el plano de incidencia, que es una sección transversal de una lente esférica plano-convexa con un número arbitrario de coeficientes esféricos, cuyo radio paraxial es R, y ubicamos el origen del sistema en el vértice de la lente plano convexa.

Suponemos que hay una simetría rotacional sobre el eje Z. Sin pérdida de generalidad, suponemos que los

rayos de luz entran desde la izquierda y que la fuente puntual se coloca en el infinito, y una onda plana incide en la lente a lo largo del eje óptico. Consideramos idealmente un haz de rayos que cruzan la cara plana de la lente sin desviarse, y se propagan a la superficie esférica<sup>36</sup>. En este caso la ecuación del trazo exacto de rayos es:<sup>37</sup>

36 M. Avendaño-Alejo, "Caustics in a meridional plane produced by plano-convex aspheric lenses," *J. Opt. Soc. Am.* A 30, 501-508 (2013).

37 Castillo-Santiago, G., et. al. "Design of Hartmann type null," 19405-19416.

$$S_{h_N} = \frac{ch^2}{1 + \sqrt{1 - (k+1)c^2h^2}} + \sum_{i=1}^N A_{2i} h^{2i}$$

$$z_d(h) = t + S_{h_N} + \frac{\left[ n_a^2 + (n_a^2 - n_i^2) S'_{h_N}{}^2 \right] \left[ n_a^2 + n_i \sqrt{n_a^2 + (n_a^2 - n_i^2) S'_{h_N}{}^2} \right]}{n_a^2 (n_a^2 - n_i^2) S''_{h_N}}$$

$$y_d(h) = h - \frac{\left[ n_a^2 + (n_a^2 - n_i^2) S'_{h_N}{}^2 \right] S'_{h_N}}{n_a^2 S''_{h_N}},$$

$$y_0 = \frac{[n_a^2 - n_i^2] [z_0 - (t + S_{h_N})] S'_{h_N}}{n_a^2 + n_i \sqrt{n_a^2 + (n_a^2 - n_i^2) S'_{h_N}{}^2}} + h.$$

$$[(z_0 - t - S_{h_N})^2 + (y_0 - h)^2] S'_{h_N}{}^2 = n_a^2 [(z_0 - t - S_{h_N}) S'_{h_N} - (y_0 - h)]^2$$

La superficie cáustica puede definirse como el lugar geométrico de los principales centros de curvatura de la familia de frentes de onda refractados o, de manera equivalente, como la envoltura de todos los rayos de luz refractados<sup>38</sup> y juega un papel elemental en la formación de imágenes.

Los principios de reflexión y refracción de la luz han sido ampliamente estudiados a lo largo de la historia de la óptica. El desarrollo teórico funcional de estos fenómenos siguen en constante evolución. En particular la reflexión y la refracción de la luz siguen siendo objeto de estudios realizados por varios autores que han desarrollado numerosos procedimientos para describir adecuadamente la evolución de los rayos y frentes de onda, ya sea reflejados o refractados a través de sistemas ópticos arbitrarios<sup>39</sup>. En años recientes han sido publicados un número importante de investigaciones sobre cáusticas por refracción, que también se denominan como diacáusticas.

Hablando específicamente de la refracción, se han investigado ampliamente las propiedades que se observan cuando un sistema óptico se ilumina con una fuente puntual instalada en una posición arbitraria. Para fines prácticos, se ha considerado que un frente de onda plano es incidente y se refracta fuera de las lentes simples.<sup>40 41 42 43</sup>

---

38 O. N. Stavroudis, *The Mathematics of Geometrical and Physical Optics, The K-function and its Ramifications* (Wiley-VCH, 2006), pp. 179–186, Chap. 12.

39 M. Avendaño-Alejo, et al., "Huygens principle: exact and approximate wavefronts propagated through conic lenses." *Applied Optics* Vol. 58, No. 4. 934–947 (2019).

En referencia al tipo de lente utilizado, que fue una lente esférica, se considera que este tipo de lentes (3) pueden ayudar a simplificar el diseño del sistema óptico al minimizar la cantidad de elementos requeridos, y producen imágenes más nítidas que las lentes convencionales. Los elementos esféricos son particularmente útiles para corregir la distorsión en lentes gran angular. En resumen, las superficies ópticas esféricas ofrecen sistemas de mayor rendimiento, más compactos y más ligeros en una amplia gama de aplicaciones.

### **5.3 Pantallas nulas por refracción a partir de una imagen fotográfica**

En este trabajo la pantalla nula se trabajó a partir de una imagen fotográfica en donde aparece un rostro indefinido, se realizó una selección de zonas y análisis de imagen; cada cuadro en el arreglo predefinido se diseña de acuerdo a su entorno, compuesto por  $m$  puntos cada uno de los cuales define un cierto radio  $y_o$ , y un ángulo de inclinación de la dirección del rayo entrante al plano de detección, con estos valores es posible encontrar las alturas de entrada en el plano de incidencia, (posición del agujero), utilizando las ecuaciones exactas para rayos. Posteriormente se determina el patrón monocromático o arreglo predefinido de visualización

40 M. Avendaño-Alejo, "Caustics in a meridional," 501–508.

41 M. Marciano-Melchor, et al., "The point-characteristic function, wavefronts and caustic of a spherical wave refracted by an arbitrary smooth surface," *J. Opt. Soc. Am. A* 29, 1035–1046 (2012).

42 S. Juárez-Reyes, et al., "Wavefronts, caustic, ronchigram and null ronchigrating of a plane wave refracted by an axicon lens," *J. Opt. Soc. Am. A* 31, 448–459 (2014).

43 M. Avendaño-Alejo, et al., "Huygens principle: exact wavefronts produced by aspheric lenses," *Opt. Express* 21, 29874–29884 (2013).

final que debería observarse en el monitor, a través del sensor CCD.

Diseñamos una pantalla nula que produce una distribución uniforme en las que las áreas oscuras y brillantes tienen el mismo ancho en el plano de detección<sup>44</sup>. Debido a la posición en la que se coloca la pantalla nula, el procedimiento puede considerarse una prueba de Hartmann en lugar de una prueba de Ronchi, aunque se ha demostrado en trabajos anteriores que ambas pruebas son equivalentes<sup>45</sup>. Por ello, podemos denominar a esto una pantalla nula tipo Ronchi-Hartmann.

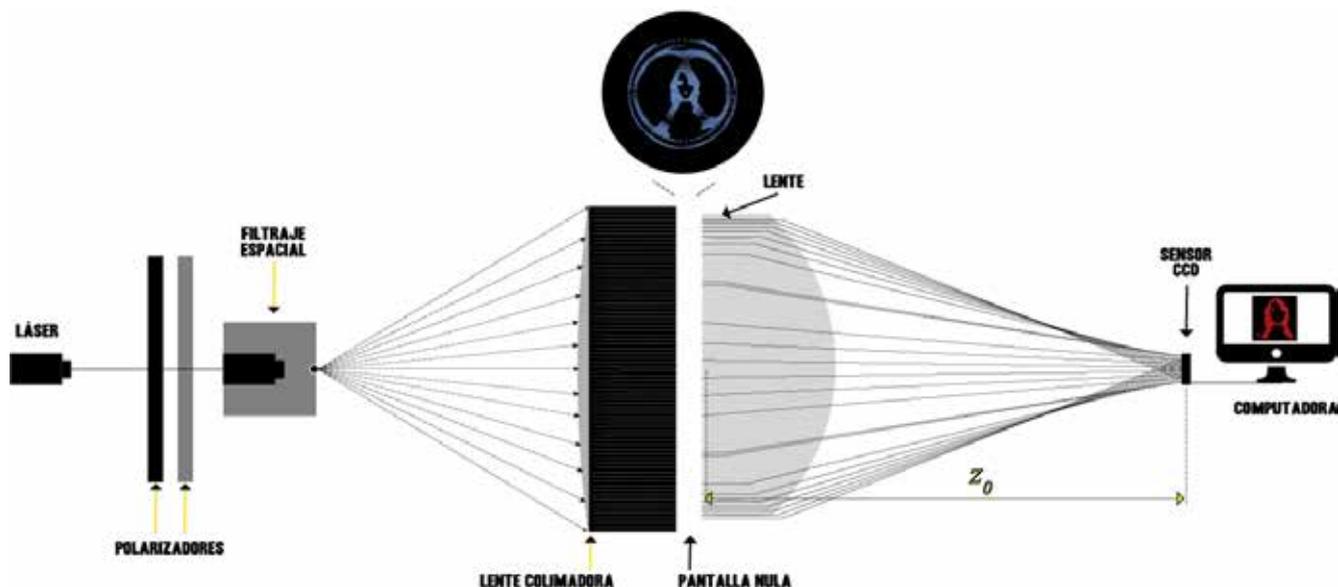
44 M. Avendaño-Alejo, et.al., "Caustics caused by refraction in the interface between an isotropic medium and a uniaxial crystal," *J. Opt. Soc. Am. A* 25, 1586–1593 (2008).

45 Maximino Avendaño-Alejo, et.al., "Null Ronchi-Hartmann test for a lens," *Optical Society of America. Paper Optics Express* 21137. (2010).

El diseño de esta pantalla se basa en el conocimiento de la superficie cáustica por refracción o diacústica, y no requiere la aberración polinomial TA. Como es bien sabido, la prueba de un sistema óptico se realiza mejor si no se necesitan ópticas adicionales<sup>46</sup>. Es importante mencionar que para este trabajo se utilizó solamente un sensor CCD en el plano de detección, como se muestra en la *Fig. 5.2*.

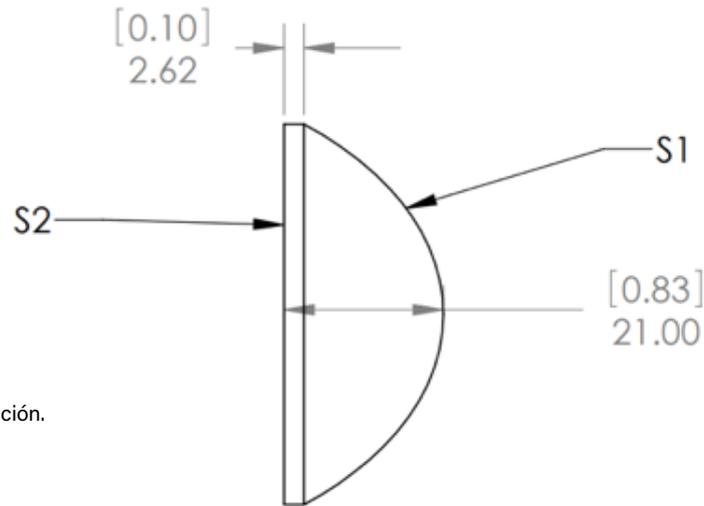
Para este ejercicio se trabajó con una lente esférica con diámetro de 50 mm y DFE=40mm, cuyas características se se presenta en las *Fig. 5.3* y *Fig. 5.4*.

46 A. Cordero-Davila, et.al., "Ronchi and Hartmann tests with the same mathematical theory," *Appl. Opt.* 31, 2370–2376 (1992).



**Figura 5.2**

Diagrama de la configuración experimental para una lente esférica utilizando pantallas nulas.



**Figura 5.3**  
Lente esférica utilizada para la investigación.

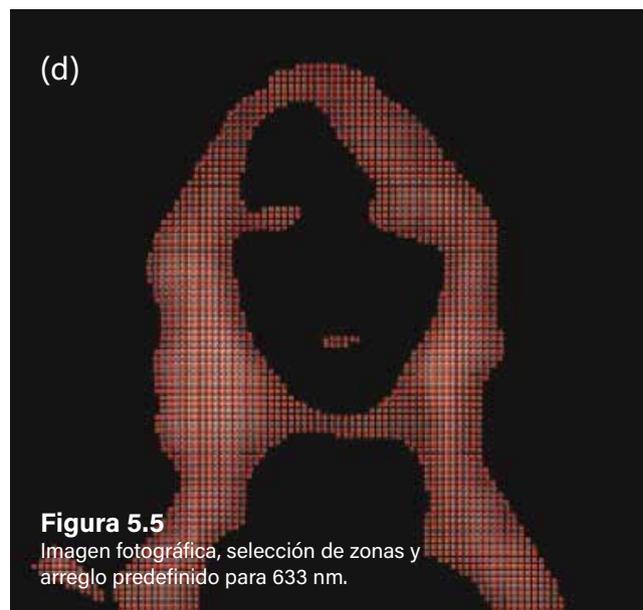
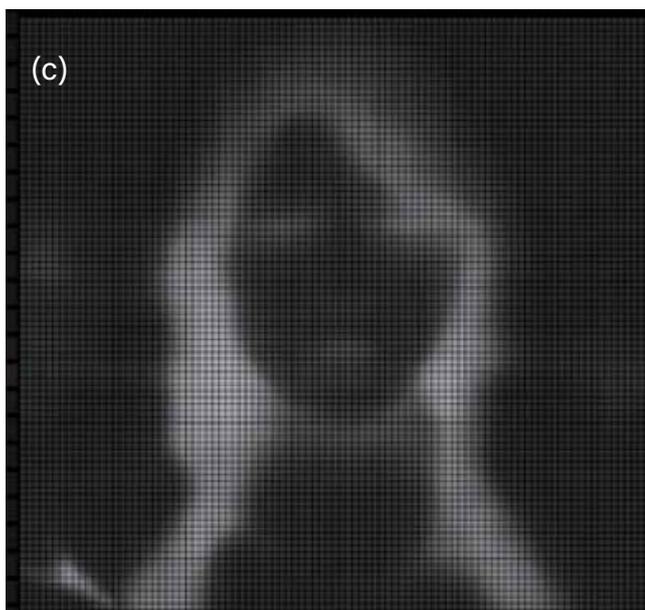
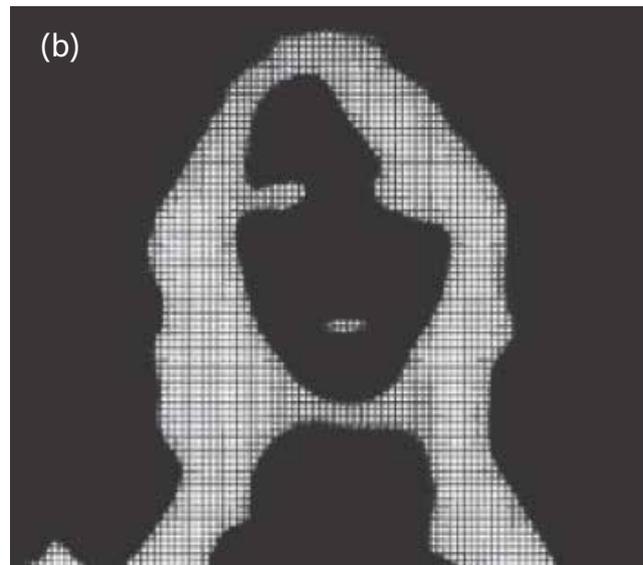
$n_a$	$n_l$	$R_1$	$R_2$	$D$	$t$	$k_1=k_2$
1	1.515	-31.07mm	20.92mm	50 mm	21 mm	0
$f$	$l$	$L$	$z_0$	$ppx$	Área CCD	$\lambda$
40 mm	4.76 mm	5.95 mm	41.14 mm	4.65 $\mu$ m	1024 x 1280 ppx	633 nm

**Figura 5.4**  
Características físicas de la lente esférica.

Es importante mencionar que en la región de la cáustica, hasta tres imágenes distintas en la pantalla nula se pueden unir para formar una sola pieza en el plano de detección. Finalmente se graba la imagen con un sensor CCD que nos proveerá como medio de transmisión a proyecciones digitales.

El diseño de las imágenes supone que las pantallas nulas están impresas en acetato y que se colocan frente a una lente esférica rápida, un frente de onda plano monocromático incide en la pantalla y en la primera superficie de la lente, entonces por el proceso de refracción formará las imágenes que componen la pieza.

Obtuvimos tres pantallas nulas y el resultado de las imágenes en la recuperación del retrato fotográfico son las siguientes.



**Figura 5.5**  
Imagen fotográfica, selección de zonas y  
arreglo predefinido para 633 nm.

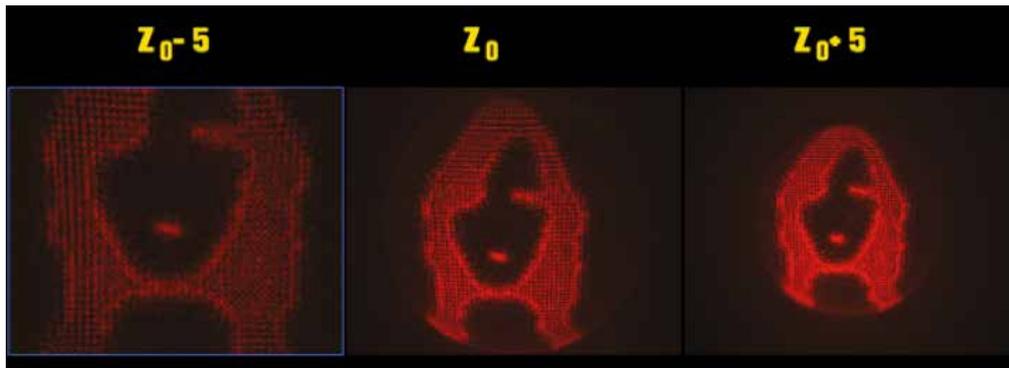


**Figura 5.6**

Pantallas Nulas utilizadas en la parte experimental.

Se obtuvieron resultados a partir de tres variantes en posición y distancia entre la lente, la pantalla nula y el sensor CCD. En donde  $Z_0$  es la imagen esperada y capturada en la región de la cáustica.  $Z_0 - 5$  correspon-

de a la captura de imagen 5 cm. antes de la región de la cáustica y  $Z_0 + 5$  corresponde a la toma de la imagen colocada 5 cm. después de la cáustica.

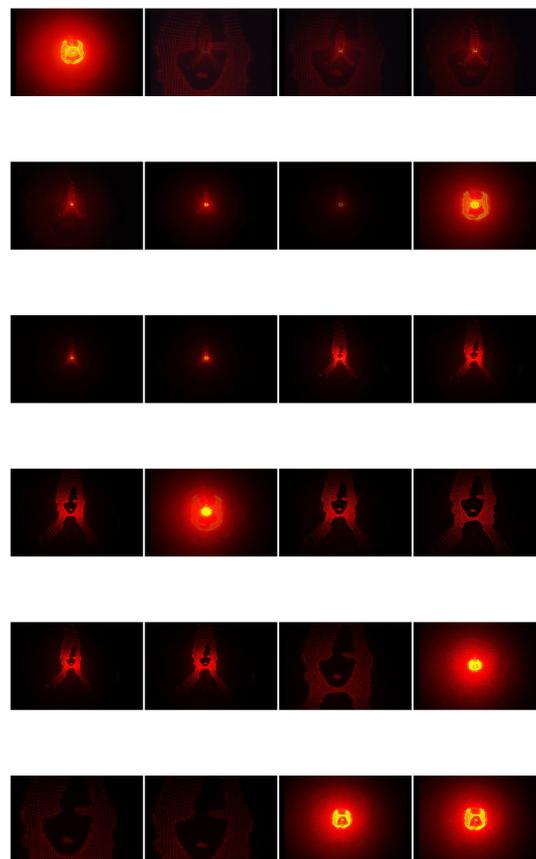


**Figura 5.7**

Resultados experimentales con tres variantes en posición y distancia.

Con del diseño de pantallas nulas por refracción, a partir de una fotografía y alineación de sistemas ópticos, a las que se les aplican variables en posicionamiento y alineación, se pueden generar patrones para imágenes fijas y en movimiento que se pueden utilizar en piezas de arte inmersivas. Se pueden utilizar diferentes longitudes de onda y diferentes imágenes para una misma pieza de arte. Se considera que la inmersión depende no solamente de las imágenes que se diseñan, dependen también de la arquitectura del espacio, de los materiales que se utilizan para proyección y en última instancia, de fuentes de sonido diseñadas en 3D para lograr la total inmersión de las piezas.

Este trabajo ha sido muy bien recibido en el ámbito científico, tanto en Puebla como en Cancún el público manifestó que es la primera vez que, en años de asistir a este tipo de congresos, se presenta un trabajo académico de arte con el carácter científico riguroso que tiene la presente investigación.



**Fig. 5.8** Secuencia de imágenes en diferentes planos de detección dentro de la región de la cáustica.

CON-

CLU-

SIO-

NES

**E**n este trabajo he presentado un estudio completo sobre la aplicación de la óptica y las leyes físicas de la luz en el terreno del arte. En el transcurso se desarrollaron dos métodos de trabajo que entienden, por un lado, la disposición de sistemas ópticos compuestos por lentes, espejos, filtros, prismas y otros materiales ópticos, que al ser incididos con luz dan forma a imágenes previamente diseñadas. Por otro lado, el estudio y aplicación del método de Pantallas Nulas por refracción, aplicado a un retrato fotográfico. En los resultados estéticos de ambos procesos se visualizan imágenes ligadas más a lo onírico e imaginario, que a una representación puntual de lo que percibimos en la realidad y se pueden aplicar a la construcción de situaciones escénicas y a lo que en esta tesis he denominado *experiencias visuales*.

Fue objetivo específico de esta investigación formular dos métodos de trabajo que, con base en la teoría científica, aporten una posibilidad de acción en el terreno del arte. En este documento expongo una metodología integral de carácter tecno-científico y queda planteada la mecánica de funcionamiento de ambos procesos, los

estudios de óptica indispensables, las leyes físicas de la luz primordiales que se deben conocer, las características físicas y ópticas de las lentes y la luz para generar el tipo de imágenes previamente planteadas.

Durante la investigación fui desarrollando el mecanismo para dar respuesta a las dos preguntas de investigación que se plantearon desde el principio. Por un lado, expongo que sí es posible encontrar una forma alternativa para para diseñar, formar y proyectar imágenes no convencionales, que den lugar a escenas o experiencias visuales con base en la teoría científica de la luz, a través de sistemas ópticos. En este método se trabaja en un espacio con características ligadas a la estética de un laboratorio de óptica, con herramientas específicas conformadas por elementos ópticos y optomecánicos, en conjunto con fuentes de luz analizadas y manipuladas para los fines prácticos de esta tesis.

También muestro que sí es posible diseñar, formar y proyectar imágenes a partir de un retrato fotográfico, utilizando el método de Pantallas Nulas por refracción. Para este método también se trabaja en labora-

torio con un sistema óptico preciso y Mathematica, un software necesario para hacer el trazo exacto de rayos y las pantallas nulas. El resultado es una imagen, captada fija o en movimiento, con una estética definida que cumple con el diseño planificado para su aplicación en nuestra área.

A medida que progresaba la investigación se encontraron problemáticas fundamentales enlazadas a la ejecución de esta metodología que implica el uso de material científico. En primer lugar, el costo de los elementos ópticos y optomecánicos es alto, igual que las luces LED y láser. En segundo lugar es necesario trabajar en condiciones óptimas, se necesita un lugar limpio, libre de polvo, oscuro, una mesa de óptica y sobre todo herramientas de trabajo, es decir material óptico, optomecánicos, luces LED, láser, computadora, software, sensores CCD, entre otras herramientas elementales. En cuanto a la electrónica, también es preciso contar con herramientas esenciales para el análisis y montaje de las luces LED.

Para dar solución a estas problemáticas fue importante el trabajo cercano, constante y colaborativo con investigadores en el área de física y electrónica, con quienes conseguí no sólo el conocimiento teórico sino experimental dentro de los laboratorios, donde tuve contacto con las herramientas de trabajo básicas para la metodología que planteo. Sin embargo, fue significativo emprender la tarea de recuperar material óptico de viejos objetivos de fotografía y cinematografía. Igualmente valioso fue diseñar y fabricar mis propias herramientas optomecánicas, en este último ejercicio surgieron colaboraciones importantes con artesanos que las construyeron.

A pesar de lo caro que pueda resultar para el artista tener acceso a material óptico, optomecánico y electrónico, todo se facilitó con los enlaces interdisciplinarios que se establecieron a través de las colaboraciones académicas entre arte, ciencia y tecnología. También se facilitó el acceso a las herramientas, a través de procesos de recuperación, diseño y fabricación de materiales. Es importante manifestar que el rigor y la constancia implicados son armas substanciales para el cumplimiento y establecimiento del lenguaje tecno-científico que se desarrolló en este trabajo.

La práctica interdisciplinaria que se llevó a cabo a lo largo de la investigación deja en evidencia la existencia de un campo fértil con múltiples posibilidades de acción y desarrollo en el área de las artes. Los resultados no solamente pueden emplearse en el diseño y proyección de imágenes aplicadas a piezas de carácter inmersivo o escultórico, pueden también utilizarse en artes escénicas, arquitectura, performance, instalaciones y otros estudios en donde la luz y la imagen construida con sistemas ópticos sea el hilo conductor de la propuesta técnica, estética y conceptual.

Durante el proceso de investigación que tuvo lugar por cuatro años, se delató frente a mí un lenguaje artístico que nunca había utilizado, evidenció y me hice de nuevas herramientas de trabajo, diseñé y mandé construir piezas optomecánicas, aprendí el lenguaje básico para trabajar con la óptica física y luz, experimenté, visualicé, descubrí y registré. Aprendí a trabajar con el método de las Pantallas Nulas por refracción a partir de un retrato fotográfico, con lo cual planeo seguir experimentando en el futuro. Los investigadores físicos con quienes trabajé nunca habían trabajado con imagen fo-

tográfica, lo hacen con patrones basados en líneas y círculos. Por tanto haber logrado una Pantalla Nula con un retrato fue un logro importante.

Se construyó un lenguaje sólido, donde se evidencia la reconfiguración visual, analítica, técnica y conceptual en mi práctica artística. Lo que expuse en esta tesis son los resultados de ese proceso, del método con sus herramientas, que en el futuro se pueden utilizar para dar cuerpo a cualquier manifestación artística interdisciplinaria.

Planteo para el futuro inmediato, la aplicación de esta metodología en la construcción de piezas escultóricas e inmersivas. La idea inmediata es continuar el desa-

rollo de este lenguaje tecno-científico que implica por un lado el estudio de la teoría óptica, de las leyes físicas y del comportamiento de la luz, por otro lado, la parte tecnológica se refiere al estudio y aplicación de la electrónica trasladada a la ejecución de movimiento.

En síntesis, planeo el diseño de piezas con luz y sistemas ópticos, complementadas con movimiento y sensores que aporten una participación activa al espectador. Para esto será fundamental la continuidad en la construcción de relaciones colaborativas que faciliten el desarrollo de proyectos, lo cual sin duda implicará mayores recursos no solamente humanos y técnicos, sino económicos.

BIBLIO-

GRA-

FÍA

Avendaño-Alejo, M. "Caustics in a meridional plane produced by plano-convex aspheric lenses," *J. Opt. Soc. Am. A* 30, 501–508 (2013).

\_\_\_\_\_, M., L. Castañeda, A. Maldonado, and N. Qureshi. "Huygens principle: exact wavefronts produced by aspheric lenses," *Opt. Express* 21, 29874–29884 (2013).

\_\_\_\_\_, M., M. R. Daz-Urbe, and I. Moreno. "Caustics caused by refraction in the interface between an isotropic medium and a uniaxial crystal," *J. Opt. Soc. Am. A* 25, 1586–1593 (2008).

\_\_\_\_\_, M., Dulce González-Utrera, Naser Qureshi, Luis Castañeda, y César L. Ordoñez-Romero. "Null Ronchi-Hartmann test for a lens," *Optical Society of America. Paper Optics Express* 21137. (2010).

\_\_\_\_\_, M., M. Carmen López-Bautista, Luis Castañeda, And Samuel Maca-García. "Huygens principle: exact and approximate wavefronts propagated through conic lenses," *Applied Optics* Vol. 58, No. 4. 934-947 (2019).

Barreiro López, Paula. *La abstracción geométrica en España 1957-1969*. España: CSIC Press, 2009.

Burbano, Santiago. *Física General*. Madrid: Tebar, 2003.

Butterfield, Jan. *The Art of Light and Space*. New York: Abbeville Publishing, 1993.

Castillo Santiago, Gabriel. "Diseño y evaluación de lentes plano-convexas esféricas rápidas" Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM. 2015.

\_\_\_\_\_, D.Castán-Ricaño, M.Avendaño-Alejo, L.Castañeda, and R.Díaz-Urbe. "Design of hartmann type null screens for testing a plano-convex aspheric lens with a ccd sensor inside the caustic," *Optics Express* 24, 19405 (2016).

Cordero-Davila, A., A. Cornejo-Rodriguez, and O. Cardona-Nunez. "Ronchi and Hartmann tests with the same mathematical theory," *Appl. Opt.* 31, 2370–2376 (1992).

Corróns, Antonio., Joaquín Campos, y Manuel Melgosa. "La Comisión Internacional de Iluminación (CIE)": *Comité Español de Iluminación*. [Citado en julio de 2019]: <https://www.ceisp.com>

Del Olmo Márquez, Jesús Alberto. "Interferómetro utilizando un modulador de fase para evaluar lentes esféricas" Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería, UNAM. 2017.

Hecht, Eugene. *Óptica*. Madrid: Adisson Wesley, 2010.

Hsi-Chao Chen., Lin, Jun-Yu, and Hsuan-Yi Chiu. "Rectangular illumination using a secondary optics with cylindrical lens for LED street light," *Opt. Express* 21 (2013).

International Agency for Research on Cancer (IARC). *Non-ionizing radiation, Part II: Radiofrequency electromagnetic fields / IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. (2011 [citado en octubre de 2018] Lyon, France): <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/mono102.pdf>

Juárez-Reyes, S., M. Marciano-Melchor, M. Marcelino-Aranda, P. Ortega-Vidals, G. Silva-Ortigoza, E. Román-Hernández, R. Silva-Ortigoza, R. Suárez-Xique, G. Torres del Castillo, and M. Velázquez-Quesada. "Wavefronts, caustic, ronchigram and null ronchigrating of a plane wave refracted by an axicon lens." *J. Opt. Soc. Am. A* 31, 448–459 (2014).

Kai Engelhardt and Seitz, Peter. "Optimum color filters for CCD digital cameras." *Appl. Opt.* 32 (1993).

Kanamori, Y., Ema, D, and Hane, K. "Transmissive metamaterial color filters." in *JSAP-OSA Joint Symposia 2017 Abstracts*, (Optical Society of America, 2017), paper 5p\_A410\_5.

Leira R. Rocío, y Jorge Gómez. "Práctica 9, Circuitos con C.I. 555, Temporizadores." *Tecnología Interactiva*. (2016 [citado en agosto de 2018]): [https://www.edu.xunta.gal/centros/cafi/aulavirtual2/pluginfile.php/37974/mod\\_resource/content/3/PR9.pdf](https://www.edu.xunta.gal/centros/cafi/aulavirtual2/pluginfile.php/37974/mod_resource/content/3/PR9.pdf)

Llamas, Manuel, Mohammad Mashayekhi, Ana Alcalde, Jordi Carrabina, Francesca, Jofre, Pallarès Vila, Adrià Conde, and Lluís Terés. "Development of Digital Application Specific Printed Electronics Circuits: From Specification to Final Prototypes." *J. Display Technol.* 11, 652-657 (2015).

Malvino, P. Albert. *Principios de electrónica*. España: McGraw-Hill Interamericana de España, 2000.

Marciano-Melchor, M., E. Román-Hernández, J. G. Santiago- Santiago, G. Silva-Ortigoza, R. Silva-Ortigoza, and R. Suárez- Xique. "The point-characteristic function, wavefronts and caustic of a spherical wave refracted by an arbitrary smooth surface." *J. Opt. Soc. Am. A* 29, 1035–1046 (2012).

Markku Hauta-Kasari, Miyazawa, Kanae, Toyooka, Satoru, and Jussi Parkkinen. "Spectral vision system for measuring color images." *J. Opt. Soc. Am. A* 16 (1999).

Martinoya, Carlos, and Nahum Joël. "The Chromatic Abstractoscope: An Application of Polarized Light." *Leonardo* 1, no. 2 (1968 [citado en marzo de 2017]): [www.jstor.org/stable/1571956](http://www.jstor.org/stable/1571956)

Muhamad H. Rashid. *Electrónica de potencia circuitos, dispositivos y aplicaciones*. México: Prentice Hall Hispanoamericana, 1995.

O´Donell, M., Beatriz, José D. Sandoval, y Fernando Poukse. "Fuentes luminosas" [Citado en agosto 2019]: <http://www.edutecne.utn.edu.ar/eli-iluminacion/cap04.pdf>

Shamir, Joseph. "Cylindrical lens systems described by operator algebra." *Appl. Opt.* 18 (1979).

Sheppard, Colin J. R. "Cylindrical lenses-focusing and imaging: a review [Invited]." *Appl. Opt.* **52 (2013)**.

Stavroudis, O. N. *The Mathematics of Geometrical and Physical Optics, The K-function and its Ramifications*. Wiley:VCH, 2006.

Veciana Schultheiss, Stella. *Research arts: la intersección arte, ciencia y tecnología como campo de conocimiento*. Barcelona: Universidad de Barcelona, 2014.

**Diseño Gráfico realizado por Agustín Martínez**  
**agusto19@gmail.com**  
CDMX, 2020



