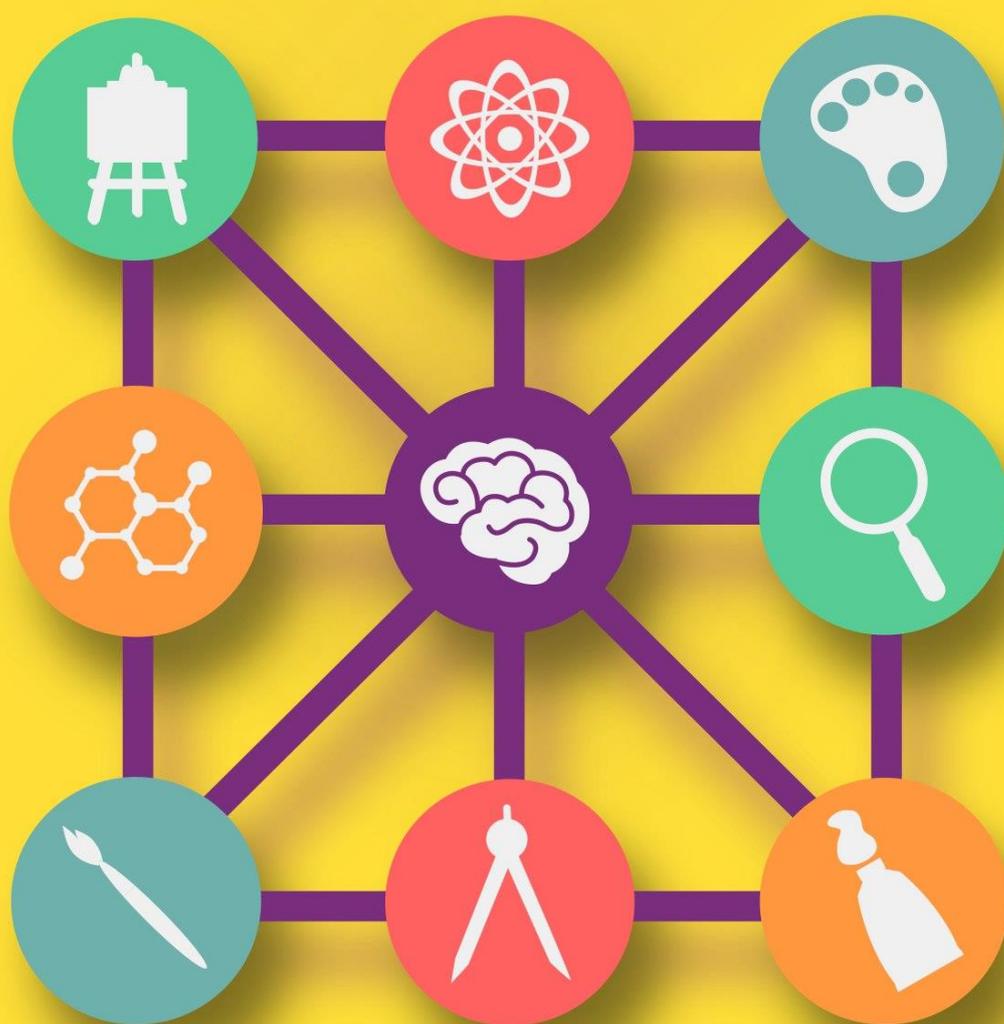


# TEJIENDO REDES ENTRE ARTE Y CIENCIA



PROF. ROSARIO DE MATTOS  
2015

## PRÓLOGO

Este trabajo es interactivo y fue concebido para ser utilizado con conexión a internet, contiene videos y links a páginas que no se aprovechan totalmente en un libro en papel, por esta razón se incluye un CD con la versión digital. También he incluido como pie de página las direcciones web por si el lector prefiere la versión en papel.

Quiero agradecer a todos los que de una u otra manera me han apoyado en este trabajo, especialmente a mis amigos Marcelo Zurita, Cléver Lara y Pablo García.

También agradezco a Karina Aguerre, quien realizó la mayoría de los esquemas que acompañan este trabajo, a Federico Ucha quien realizó la portada, y a los que amablemente dieron su consentimiento para incluir sus fotografías y esquemas en esta obra.

La mayoría de las imágenes obtenidas de internet y utilizadas son libres o se incluyeron con el consentimiento del autor y/o museo donde se encuentran, si alguna no cumple con estas condiciones le agradezco lo comunique y será retirada.



## CONTENIDO

Prólogo .....	1
Introducción .....	5
Un poco de Historia .....	6
Línea de tiempo .....	17
La Matemática y el arte .....	19
Proporciones .....	19
Relación entre largo y ancho del soporte .....	19
Proporciones entre las partes de la figura .....	22
Relación Áurea .....	23
$\phi$ En el arte .....	28
$\phi$ y Kepler .....	32
$\phi$ en la naturaleza.....	33
$\phi$ en objetos creados por el hombre .....	36
Investigación reciente .....	46
Figuras y cuerpos regulares.....	48
Figuras regulares .....	48
Cuerpos regulares .....	53
Perspectiva.....	61
Fractales.....	66
Química.....	77
Física .....	79
Luz.....	85
Consecuencias de su propagación rectilínea.....	85
Sombra .....	85
Cámara oscura .....	121
La Luz en su interacción con la materia.....	141
Reflexión.....	141
Reflexión Difusa.....	141

Reflexión Especular .....	153
Refracción.....	192
Reflexión tota linterna .....	245
Creación de ambeinte a través de la luz.....	257
Materiales y Técnicas de la pintura .....	269
Relación del índice de refracción con la opacidad de la pintura .....	269
Soporte y Barniz .....	270
Veladuras.....	273
Color .....	281
Características del color.....	284
Matiz.....	285
Intensidad o saturación.....	288
Valor .....	290
Mezclas de color .....	294
Mezcla Sustractiva .....	294
Mezcla Aditiva.....	309
Espacio de color RGB.....	316
Estudio de obras a través de métodos físicos .....	325
Técnicas que utilizan rayos X, ultravioletas e infrarrojos.....	325
Epílogo .....	343
Bibliografía.....	345
TABLA DE ILUSTRACIONES .....	351

# TEJIENDO REDES ENTRE CIENCIA Y ARTE

## INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de los tiempos, los creadores de arte han estado relacionados con la curiosidad del hombre que lleva al desarrollo científico.

Existen múltiples textos de arte que relacionan física o matemática y arte, desde el punto de vista de sus contenidos teóricos y de los actores que influyeron en su desarrollo como Young, Newton, Maxwell o Pitágoras.

La idea del presente trabajo es hacer visible esta relación sin profundizar en los temas de física que ya están ampliamente tratados en textos de la asignatura.

El arte es comunicación y carece de sentido sin el otro, sin alguien a quien transmitir el mensaje. Nos comunicamos a través de los sentidos, el oído y la vista son fundamentales, son transductores que se accionan a través de ondas; mecánicas el oído y electromagnéticas nuestros ojos. La física estudia las ondas, los elementos a través de los que nos comunicamos, por eso está en el principio de la comunicación y los artistas la han sabido utilizar en todos los tiempos.

En cuanto al arte, la física se encuentra en todas, a pesar de ello me referiré fundamentalmente, dentro de las artes plásticas, a la pintura.

## UN POCO DE HISTORIA

A pesar de que para muchos, arte y ciencia se consideran opuestos, están íntimamente relacionados desde la antigüedad.

Ya Plinio aseguraba que los efectos plásticos se obtienen modelando las figuras con luces y sombras (tema de estudio en ciencias). También Cennino Cennini (1370-1440) explica en su obra *EL LIBRO DEL ARTE* como se dan relieves y sombras siguiendo el haz de luz que incide en los objetos, “la luz es timón y guía” según Cennini, y en el renacimiento Leonardo da Vinci (1452-1519) va más allá, no solamente relaciona ciencia con arte sino que en el *TRATADO DE LA PINTURA*<sup>1</sup> los tres primeros temas son:

“Acerca de si es o no una ciencia la pintura”  
“Primer principio de la ciencia de la pintura”  
“Principio de la ciencia de la pintura”

Leonardo, quien sentó las bases del método científico como forma de analizar causas y efectos, de unir teoría y práctica con argumentos, afirmaba que no podía dominarse con propiedad ningún aspecto de la pintura sin comprender el fundamento de la ley natural que la rige<sup>2</sup>, o sea que, sin el conocimiento de lo que actualmente llamamos ciencias físicas no podría dominarse totalmente la pintura.

Leonardo reafirma lo dicho con el ejemplo, demostrando en su obra el dominio del conocimiento acerca del comportamiento de la luz y de las leyes de la reflexión.

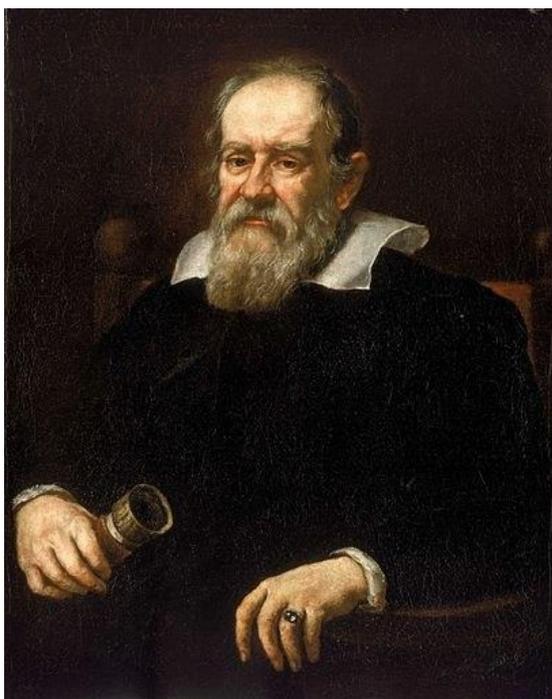
---

<sup>1</sup> Leonardo Da Vinci- Tratado de la pintura- traducción Rafael Galvano- Ediciones Libertador Argentina 2004 pag. 13

<sup>2</sup> En el capítulo XXII de *TRATADO DE LA PINTURA* que se titula “ De aquellos que usan solo la práctica sin exactitud y sin ciencia” expresa:

“aquellos que se enamoran de sola la práctica, sin cuidar de la exactitud, ó por mejor decir, de la ciencia, son como el piloto que se embarca sin timón ni aguja; y así nunca sabrá a donde va á parar. La práctica debe cimentarse sobre una buena teórica, á la cual sirve de guía la perspectiva; y en no entrando por esta puerta, nunca se podrá hacer cosa perfecta ni en Pintura, ni en alguna otra profesión.”

Leonado Da Vinci- Tratado de la pintura – Traducción por Diego Antonio Rejon De Silva- Imprenta Real Madrid 1827



*fig. 1 Galileo Galilei (1564-1642)  
Pintura realizada por J.Sustersmans (1636)*



*fig. 2 Ludovico Cigoli (1559-1613)  
Pintura realizada por su discípulo  
Sigismondo Coccapani*

Estos ejemplos representan una mínima muestra de la inmensa red de relaciones entre ciencia y arte, vínculo que se produce en los dos sentidos: algunas veces el arte influye en la ciencia y otras la ciencia contribuye e inspira a los artistas, retroalimentándose continuamente y siendo cimiento una de la otra. Un ejemplo de esto es la interrelación entre Galileo Galilei y su amigo Ludovico Cigoli, el pintor más conocido en la Florencia de su época, que decía que Galileo había sido su maestro de perspectiva. A modo de ejemplo les contaré parte de su historia:

En 1610 Galileo regresa a Florencia después de haber dictado cátedra de matemática en Padua, por ese entonces los intereses de Galileo oscilaban entre la óptica y la astronomía, utilizaba el recientemente inventado telescopio al que mejoró llevándolo a 30 aumentos, construía el primer telescopio astronómico y anotaba meticulosamente sus observaciones, lo que lo llevó a publicar *SIDEREUS NUNCIUS* en latín, traducido como *MENSAJERO SIDERAL* o *MENSAJE SIDERAL*. Entre sus observaciones se encontraban las que realizó de las fases de la luna, y a través de las conclusiones que dedujo de ellas, nos damos cuenta de la influencia que tuvo su formación en perspectiva y claroscuro para sus descubrimientos astronómicos.

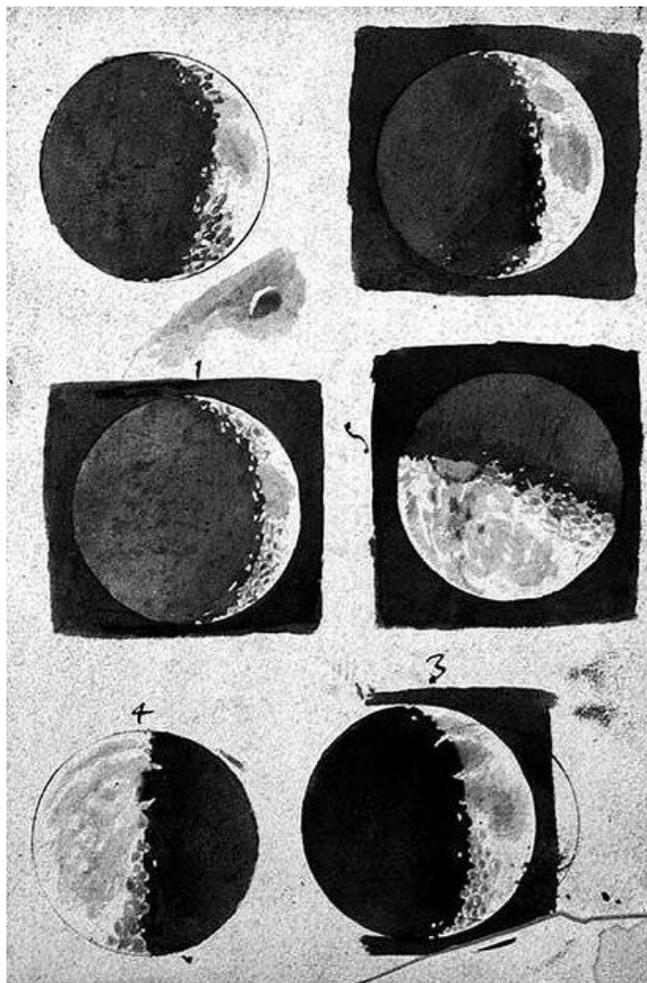


fig. 3 Galileo  
*Acuarela de la Luna en el manuscrito de SIDEREUS NUNCIUS 1609*

Cigoli y su círculo de artistas acostumbraba a participar en debates, el primer motivo de discusión en ese entonces era la revolucionaria obra de Galileo en la que ofrecía unas espectaculares ilustraciones de la superficie de la luna, con su estructura irregular acentuada por luces y sombras (fig. 3 y 4). El modo en que esas luces y las sombras cambiaban su disposición según la fase de la luna, llevó a Galileo a la convicción de que la superficie de la luna era más irregular que la de la Tierra. Esta certeza se basaba en la geometría y en el conocimiento de cómo se producían las sombras según diferentes ángulos de iluminación sobre superficies curvas.

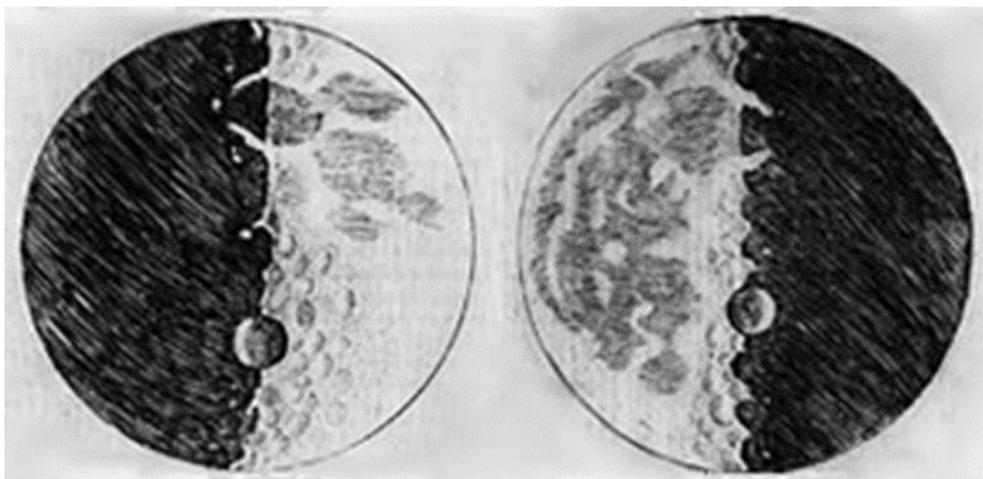


fig. 4 Grabado, La superficie de la luna, de *SIDERUS NUNCIUS* de Galileo Galilei, 1610

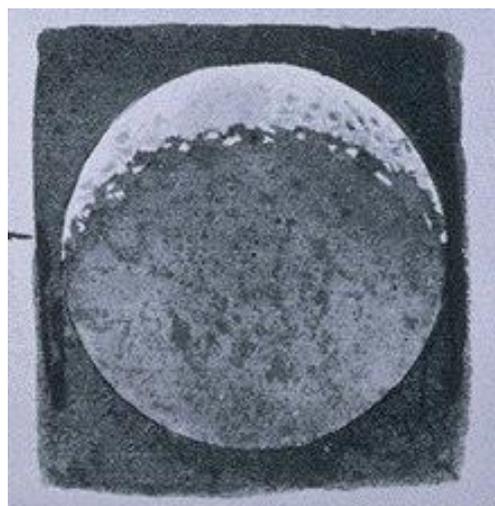
Las ilustraciones que Galileo incluyó en su tratado, deslumbraron tanto a su amigo Cigoli que por ese entonces estaba pintando el fresco “LA INMACULADA CONCEPCIÓN” en la Iglesia Papal de Santa María Maggiore en Roma, que representó a la Virgen de pie sobre una luna de superficie rugosa, como la de Galileo (Fig. 5 y6).

La fig. 5 es una copia de La inmaculada Concepción de Cigoli donde vemos a la Virgen de pie sobre una luna con claras influencias de su amigo Galileo Galilei.

La fig. 6 corresponde a una de las lunas que aparecen en la fig. 3, la marcada por Galileo con el número uno en sus acuarelas. La roté 90° en sentido anti horario para compararla con la que aparece bajo los pies de la virgen en la obra de Cigoli. Observando las figuras la influencia es innegable.



*fig. 5 Ludovico Cigoli  
Detalle de la cúpula dela Iglesia de Santa María Maggiore*



*fig. 6 Acuarela del manuscrito de Galileo  
Luna identificada con el número 1 en el manuscrito (fig.3 rotada 90°)*

Así como los trabajos de Galileo influyen en la obra de Cigoli, también Cigoli intervino activamente en el proyecto de las manchas Solares de Galileo. El pintor vivía en Roma y Galileo en Toscana; durante tres años intercambiaron cartas, y gracias a que algunas se conservan podemos enterarnos de los temas que los ocupaban. En una de ellas, Cigoli escribe:

*“no creo que le haya dicho que tengo un telescopio, y que es lo suficientemente bueno como para permitirme ver el reloj de San Pedro y su manecilla desde Sta. María Maggiore, pero no los números de las horas con tanta claridad como lo veía con el suyo”<sup>3</sup>*

Ludovico Cigoli

Además, le cuenta que ha hecho observaciones de las manchas solares que avanzan hacia la superficie antes de extinguirse y las compara con defectos en una garrafa (recipiente) de cristal. Cigoli tenía amplios conocimientos de matemática y perspectiva, incluso escribió un tratado sobre “PROSPECTIVA PRÁCTICA” que no se editó debido a su muerte repentina. Ahora es el artista el que aporta observaciones al científico, aunque no están de acuerdo en la explicación del fenómeno.

Cigoli defendía la postura de los astrónomos de la época, que creían que las manchas solares correspondían a la presencia de estrellas que se interponían entre nosotros y el sol.

Galileo registró las manchas Solares valiéndose de la proyección de la imagen producida por el telescopio sobre un papel, con lo que lograba gran precisión como podemos ver en la figura 7, que muestra la secuencia de imágenes de manchas solares realizadas por Galileo, provenientes de las observaciones correspondientes al 6 de junio de 1613.

Figura obtenida de [The Galileo Project](#)<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup> Accademia degli Euteleti (San Miniato, Italy)- Bollettino della Accademia degli Euteleti: macchie di sole e pittura : carteggio L. Cizoli-G. Galilei (1609-1613), Accademia degli Euteleti, 1959, pp 52-53 (carta del 23 de marzo de 1612)

<sup>4</sup> Las letras en celeste son vínculos que te conducen a páginas donde puedes ampliar la información, sobre ellos debes presionar Ctrl+clic.

[http://galileo.rice.edu/sci/observations/sunspot\\_drawings.html](http://galileo.rice.edu/sci/observations/sunspot_drawings.html)

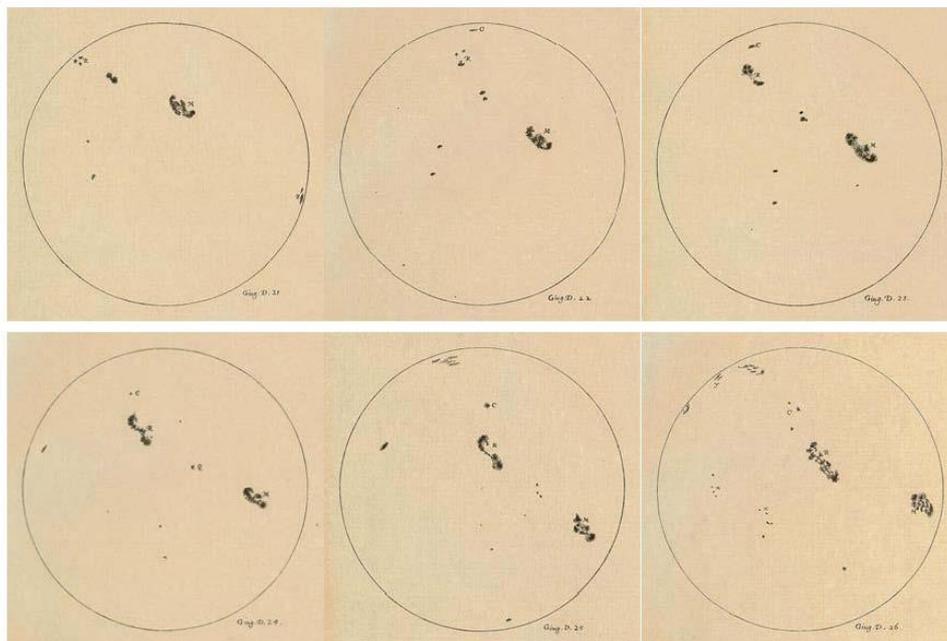


fig. 7 Manchas Solares de Galileo  
6 de junio de 1613 [Fuente](#)<sup>5</sup>

En julio de 1612 Cigoli y su grupo estaban usando el mismo método: copiar la imagen real producida por una lente sobre una pantalla... y una vez más el conocimiento científico contribuye con los artistas.

Galileo analizó las imágenes obtenidas y se dio cuenta de que las manchas disminuían su tamaño y velocidad a medida que se acercaban a los bordes. Utilizando la perspectiva argumentaba que las manchas avanzaban en la superficie del sol de tal manera que se disponían “en escorzo”<sup>6</sup> a medida que se movían hacia el borde.<sup>7</sup>

---

<sup>5</sup> [http://galileo.rice.edu/sci/observations/sunspot\\_drawings.html](http://galileo.rice.edu/sci/observations/sunspot_drawings.html)

<sup>6</sup> Escorzo quiere decir perpendicularmente a la superficie representada.

Según la Real Academia Española “[escorzar](#) es Representar, acortándolas, según las reglas de la perspectiva, las cosas que se extienden en sentido perpendicular u oblicuo al plano del papel o lienzo sobre que se pinta.”

<sup>7</sup> Imaginemos que miramos el sol a través de una ventana, cuando las manchas solares están en el centro de la superficie visible, están paralelas a la superficie de la ventana, a medida que van desplazándose hacia los bordes van quedando perpendiculares a la superficie de la ventana.

De acuerdo a estos datos históricos, Galileo influyó en Cigoli, y es probable que a través del intercambio de ideas y la comunicación permanente entre dos amigos, Cigoli haya influido de alguna manera en las argumentaciones de Galileo.

Galileo utilizaba la perspectiva para argumentar acerca de la disminución de tamaño aparente de las manchas solares a medida que se acercan a los bordes, vemos el esquema en la figura 8.

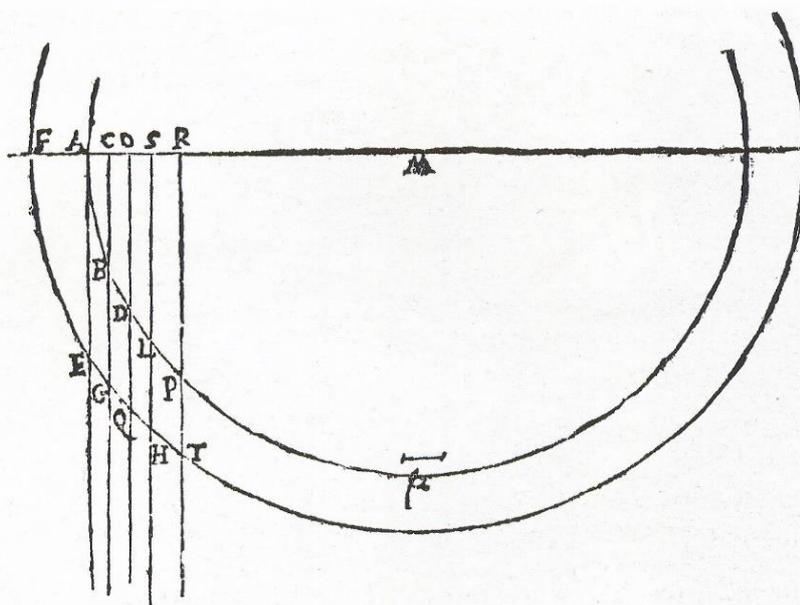


fig. 8 Análisis perspectivo de las Manchas Solares, Galileo

En este análisis perspectivo de la apariencia de las manchas Solares en la superficie del sol, Galileo justifica la disminución de tamaño de las manchas solares a medida que se acercan al borde de la siguiente manera:

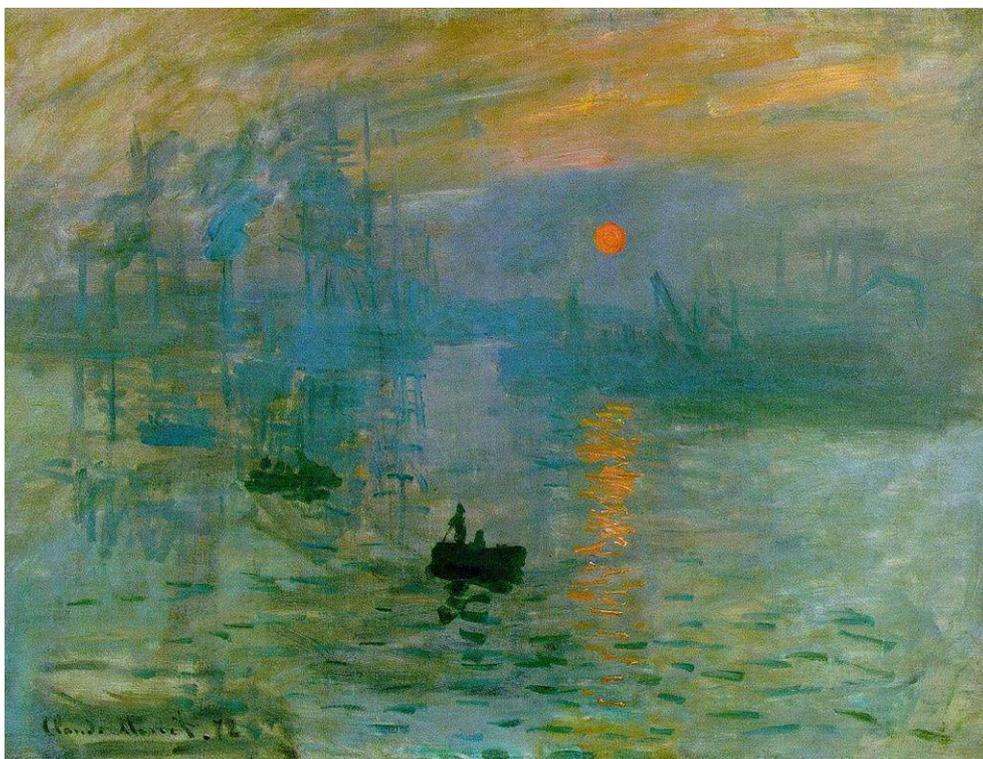
Las proyecciones de los arcos  $PL$ ,  $LD$  y  $EB$  en la horizontal representadas en el esquema, disminuyen su longitud a medida que se acercan a los bordes. Es decir que, si miramos desde abajo en la figura, veremos la mancha de longitud  $PL$  con la longitud  $\overline{RS}$ , y La longitud del segmento  $\overline{RS}$  es menor que la longitud del arco  $PL$ .

Siglos después de Galileo, en marzo de 1865 Pasteur escribía:

*"Hay circunstancias en las que veo claramente la alianza posible y deseable de la ciencia y el arte, mediante la cual el químico y el físico pueden ocupar un lugar junto al artista e iluminarle con sus luces..."*

*Louis Pasteur*

Por ese entonces Monet abandonaba la pintura de obras realistas y junto a otros pintores de la época, influenciados por el positivismo, crean lo que se llamó impresionismo. ¿Y qué relación tiene esto con la ciencia?



*fig. 9 Impresión, Sol Naciente, 1872  
Museo Marmottan Monet, París  
Obra que le dio nombre al impresionismo*

La relación está en que los impresionistas y puntillistas analizaban la realidad física de los colores, de la luz, convirtiendo su obra en la demostración científica de las leyes físicas.

Poco después, en 1895, Roentgen descubría los rayos X y realizaba la primera radiografía de un cuadro. El descubrimiento de Roentgen junto a otras técnicas que provienen del ámbito científico es utilizado en una inmensa cantidad de estudios sobre obras de arte.

Todo esto es una pequeña muestra de que el mundo del arte y del conocimiento científico no son contradictorios ni incompatibles, sino que se potencian, contribuyen mutuamente, y sus historias fueron tejiendo una inmensa red de interrelaciones.

La siguiente línea del tiempo muestra los períodos en que vivieron y convivieron los científicos, matemáticos y artistas nombrados en este trabajo. Por motivos de espacio, solo incluimos los que vivieron en el período próximo y posterior al renacimiento (Siglos XV y XVI), aunque hubo muchas contribuciones anteriores como la de Euclides, que en el siglo III antes de Cristo fue el gran impulsor de la geometría clásica. Euclides afirmaba que la luz se propaga en línea recta, describía las leyes de reflexión y también daba inicio a la perspectiva.

También se sabe que las lentes existían desde tiempos muy remotos: se han encontrado lentes convergentes y divergentes, procedentes de la Antigua Mesopotamia de más de 3000 años antes de Cristo, también en Creta se hallaron lentes convergentes de una antigüedad comprendida entre los años 3000 y 1200 antes de Cristo, pero, al tratarse de tiempos tan distantes, decidí nombrarlo pero no incluirlos en la línea del tiempo para facilitar su lectura.



*fig. 10 Euclides  
Detalle dela obra ESCUELA DE ATENAS  
Pintura de Rafael Sanzio*

Esta línea del tiempo es interactiva, por lo que puedes averiguar qué científicos y artistas convivieron. También verás que, en algunas zonas, principalmente del renacimiento, se superponen artistas, científicos, matemáticos, etc., algunos de los cuales quedan ocultos debajo de otros, por lo que deberías expandirla para poder visualizar a todos los artistas y científicos incluidos en esa época. Puedes expandir la línea utilizando el signo de + indicado por la flecha roja en la fig. 11

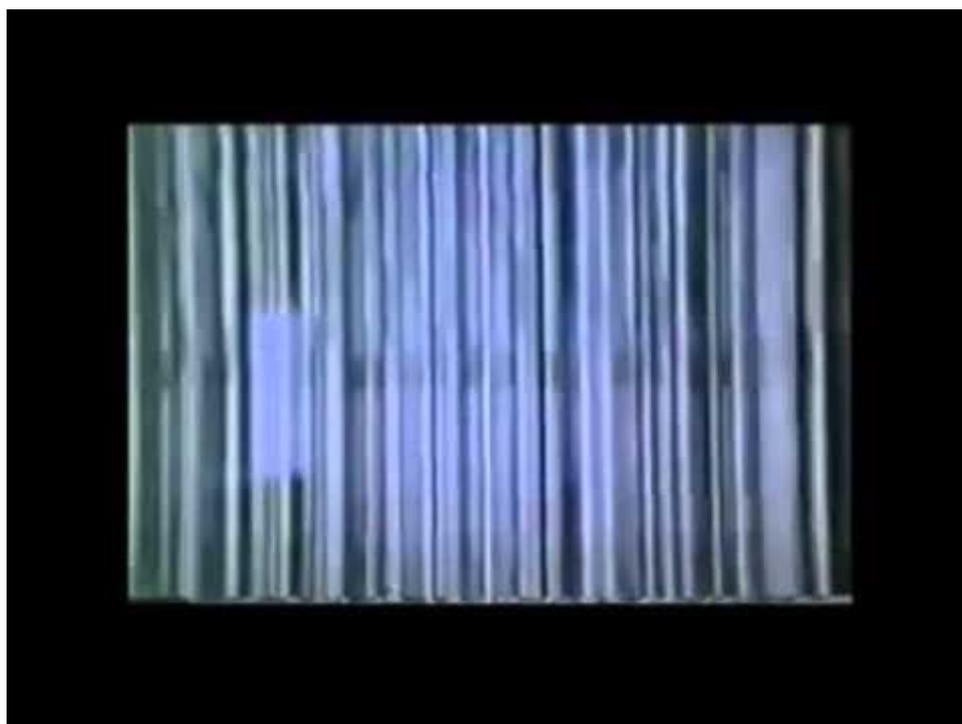
## LÍNEA DE TIEMPO



fig. 11 Ejemplo de línea de Tiempo interactiva al a que puedes acceder en el siguiente link

[Link a Línea de tiempo interactiva: Científicos- Matematicos-Artistas<sup>8</sup>](#)

En la actualidad, un sinnúmero de artistas utilizan en sus trabajos conocimientos científicos, como vemos en el siguiente video, editado a partir de un documental acerca del artista Jesús Rafael Soto, donde se muestra una obra que aúna ciencia, arte y arquitectura. Cada tubo, con su frecuencia de resonancia específica, contribuye a la melodía creada al paso del viento.



Video 1<sup>9</sup>

<sup>8</sup> <http://cienciaenlasartes.blogspot.com.uy/2015/05/linea-del-tiempo-cientificos-artistas.html>

<sup>9</sup> El lector puede ver el video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=KA9dXLCxLZM>



## LA MATEMÁTICA Y EL ARTE

La matemática ha estado relacionada con el arte desde el inicio de los tiempos. No vamos a desarrollar aquí la parte histórica exhaustivamente, preferimos referirnos a cinco temas que, entre otros muchos relacionan íntimamente matemática y arte, ellos son:

- PROPORCIONES
- RELACIÓN AUREA
- FIGURAS Y CUERPOS REGULARES
- PERSPECTIVA
- FRACTALES

### PROPORCIONES

La geometría y proporciones entre partes de una obra, influyen en el proceso de composición. Es importante la relación entre largo y ancho del soporte como también las proporciones entre las partes de los objetos representados, estas relaciones son fundamentales para los artistas porque forman parte del encanto y o expresividad de la obra.

#### RELACIÓN ENTRE LARGO Y ANCHO DEL SOPORTE

Soporte para un artista plástico es el material en cuya superficie se confecciona la obra, en el caso de un fresco el soporte es la pared y para la pintura al óleo el soporte puede ser el bastidor entelado, madera o cartón en el cual se pinta.

En cuanto a la geometría del soporte, Alberti aportó a los pintores un libro que se titula *DELLA STATUA E DELLA PITTURA*, escrito en 1436 y publicado por primera vez en el siglo XVI, en este tratado explica cómo los intervalos musicales agradables al oído servían también para las artes plásticas, esta obra circuló rápidamente por los talleres de los artistas.

Los intervalos musicales agradables al oído fueron descubiertos por Pitágoras, Filósofo griego que vivió a mediados del siglo VI antes de Cristo.

Pitágoras convencido de que el mundo está gobernado por los números, experimentó con un monocordio (instrumento de una sola cuerda), y llegó a la conclusión de que los sonidos armónicos se producían cuando las longitudes de las cuerdas estaban en relaciones numéricas sencillas.

La relación numérica 1 a 2 correspondía a lo que llamamos octava.

La razón 2 a 3 a una quinta y 3 a 4 una cuarta.

Es probable que este descubrimiento sea la primera formulación matemática de una ley física.

En la figura 11b, a la izquierda, vemos la representación de la división de la cuerda vibrante de Pitágoras (la cuerda es la misma y está sometida a la misma tensión, solo varía su longitud). En el esquema también se muestra una relación de frecuencias aunque en la época de Pitágoras esto no se supiera.

A la derecha vemos la escala musical de acuerdo a las diferentes longitudes de la cuerda en las mismas condiciones (igual tensión y densidad lineal).

Las relaciones numéricas fueron tan importantes para la escuela [Pitagórica](#) que su lema fue TODO ES NÚMERO y su emblema el [pentágono estrellado](#) o pentagrama

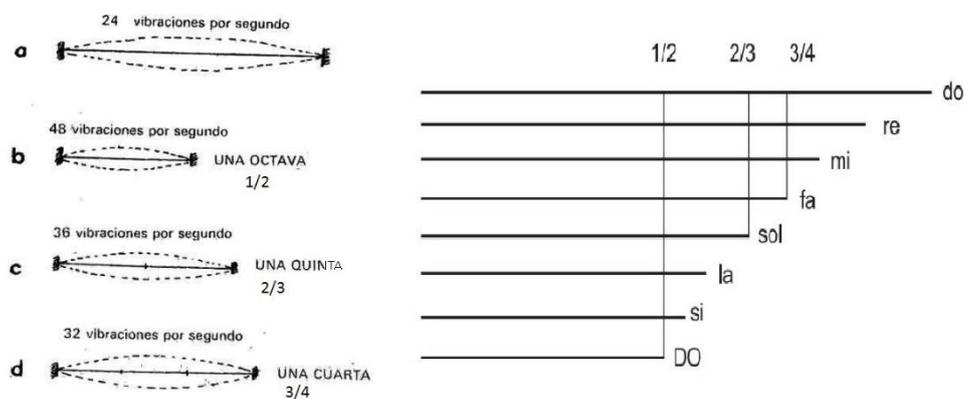


fig. 11b Cuerda vibrante de Pitágoras

Las relaciones adjudicadas a Pitágoras, de los largos de una cuerda para que suene agradable al oído, en la época de Alberti se llamaban diapasón (1/2), diapente (2/3) y diatesarón (3/4), actualmente llamadas octava, quinta y cuarta respectivamente, fueron usadas por los pintores (Fig.12) junto a otras, producto de sus combinaciones y mucho más complicadas (Fig. 13), para elaborar los soportes donde pintaban su obra y para la división del espacio pictórico.

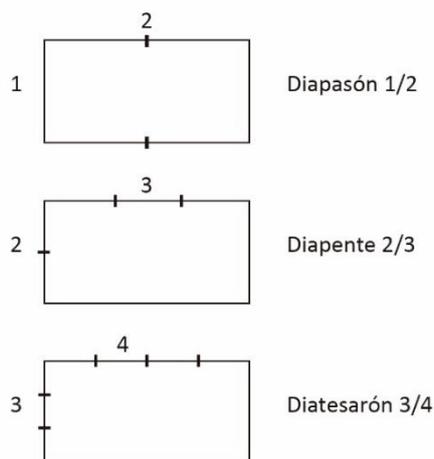


fig. 12 Divisiones sencillas del plano utilizadas por algunos artistas

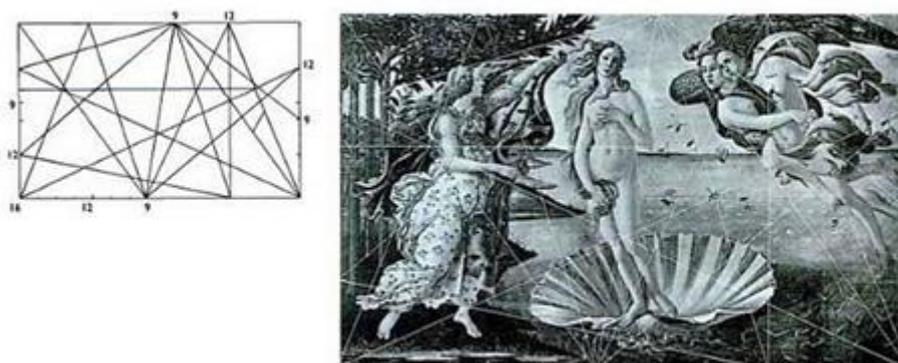


fig. 13 Botticelli  
EL NACIMIENTO DE VENUS

En la figura 13 vemos la división del plano usada por Botticelli en la obra *El nacimiento de Venus*. En esta obra Botticelli utiliza una de las relaciones características de Alberti, la doble diatesarón 9/12/16 que proviene de la relación diatesarón que es la relación  $\frac{3}{4}$  aplicada dos veces: los  $\frac{3}{4}$  de 16 es 12, a este resultado le aplicamos nuevamente los  $\frac{3}{4}$  y da como resultado 9:

$$16 \times \frac{3}{4} = 12$$

$$12 \times \frac{3}{4} = 9$$

De allí el nombre de doble diatesarón porque se realizan dos veces los  $\frac{3}{4}$ , el resultado es 9/12/16 como vemos en la división del soporte en la obra EL NACIMIENTO DE VENUS de Botticelli.

## PROPORCIONES ENTRE LAS PARTES DE LA FIGURA.

Modificando las proporciones de la figura representada, el artista puede inducir al espectador a experimentar el efecto deseado.

Un ejemplo de cambio en las proporciones para lograr un efecto determinado lo observamos en la representación del cuerpo humano, cuando se modifican sus proporciones para realzar ciertas cualidades y crear los efectos pretendidos por el artista. Veamos dos ejemplos:

- ➔ Rafael Barradas en su serie *Los Magníficos*, pintada en España entre 1923 y 1924, toma como modelos a los campesinos del lugar y cambia las proporciones naturales entre cuerpo y manos, representa las manos agigantadas para darnos idea de una vida austera de gente de trabajo.



fig. 15 *El Molinero Aragonès*  
Rafael Barradas 1924  
Óleo sobre tela



fig. 14 *Hombre en la taberna*  
Rafael Barradas 1922  
Óleo sobre tela, 1.06 x 0.825 m

- ➔ Pablo Picasso en su obra *LA GUERRA Y LA PAZ*, modifica las proporciones del cuerpo humano representando a las figuras mayores (la guerra y la paz) con cabezas pequeñas en relación al cuerpo, logrando que las veamos aún más grandes. Representa la paz (a la izquierda) con pies enormes que aumentan su equilibrio y contribuyen a la metáfora, mientras guerreros y caballos mantienen las proporciones normales.

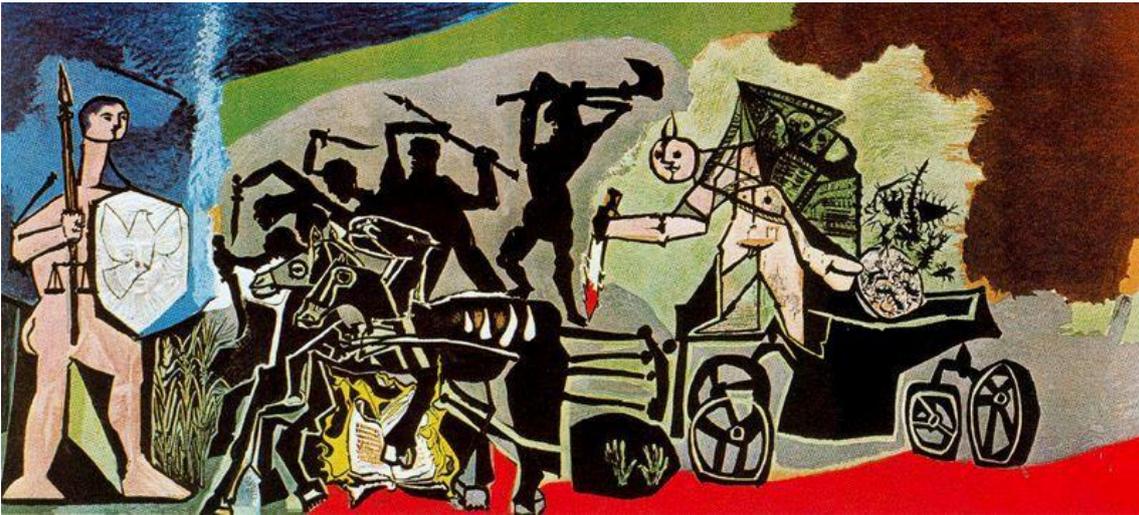
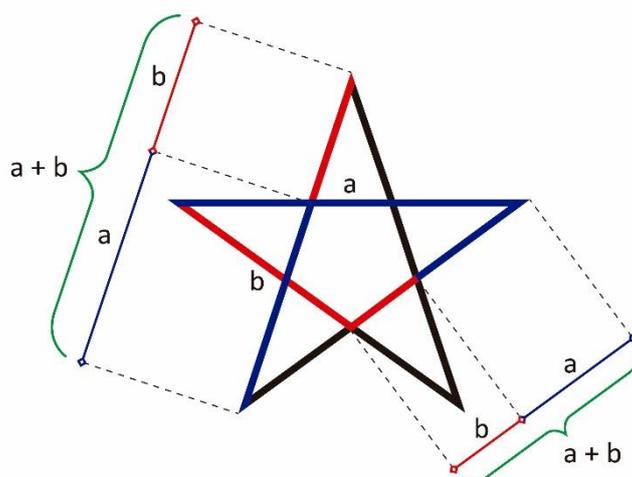


fig. 16 La Guerra  
(Detalle de LA GUERRA Y LA PAZ)  
Pablo Picasso 1952

Otra relación que se encuentra en la naturaleza, es estudiada en matemáticas, y ha sido utilizada en el arte a lo largo de los tiempos por innumerables artistas, es la relación áurea o divina proporción, que trataremos a continuación.

## RELACIÓN ÁUREA

A diferencia de las relaciones musicales que eran sencillas y correspondían a relaciones entre números enteros, Luca Pacioli en su obra *DE LA DIVINA PROPORCIÓN* (terminada en diciembre de 1497 e impresa en Venecia en 1509), glorifica una relación ya conocida en el antiguo Egipto, que luego se divulgó en Roma y Grecia, donde vivió Pitágoras (569-475 antes de Cristo).



*fig. 17 Pentágono Estrellado o Pentagrama  
Símbolo de los Pitagóricos*

Los pitagóricos priorizan tanto esta relación, que se identifican con ella a través de su símbolo: el pentágono estrellado, (figura 17), donde se cumple la relación áurea entre sus partes: cada intersección genera segmentos que están en relación áurea. El lector puede ver una recreación de la época en que vivieron los pitagóricos y su vínculo con la relación áurea en el video 2 que es una selección de la película de Walt Disney, DONALD EN LA TIERRA DE LA MATEMÁTICA.

Desde entonces, esa proporción aparece en múltiples tratados. Platón, Euclides<sup>10</sup> y Vitruvio son ejemplos, han escrito sobre ella y/o la han utilizado. A través de ella el hombre ha intentado dar una explicación numérica, matemática, a la belleza.

---

<sup>10</sup> El primero en hacer un estudio formal del número áureo fue Euclides que lo definió de la siguiente manera:

"Se dice que una recta ha sido cortada en extrema y media razón cuando la recta entera es al segmento mayor como el segmento mayor es al segmento menor".

Euclides, Los Elementos, Definición 3 del Libro Sexto.

Euclides demostró también que este número no puede ser descrito como la razón de dos números enteros. Los números que no pueden ser escritos como razón o fracción, y que al hacer la operación los decimales siguen siempre sin repetirse, se llaman irracionales. [número irracional](#).



Video 2 Relación Áurea. Selección de

DONALD EN LA TIERRA DE LA MATEMÁTICA. <sup>11</sup>

¿En qué consiste esta relación?

Podríamos describir la relación áurea diciendo que si dividimos un segmento en dos de diferente longitud (los segmentos azul y el rojo en la fig.18), la relación entre el total ( $a+b$ ) y el segmento más largo ( $a$ ), es la misma que entre el más largo ( $a$ ) y el menor ( $b$ ). A esta relación se le llama relación áurea, el resultado es el número áureo que se representa con la letra griega  $\Phi$  (que se llama fi) y su minúscula es  $\varphi$ .

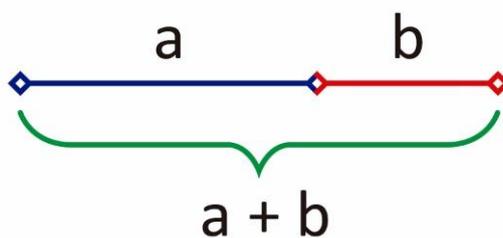


fig. 18

<sup>11</sup> El lector puede ver el video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=4-F7CTR4aXc>

Por lo tanto:

$$\frac{a+b}{a} = \frac{a}{b} \quad (1)$$

Al resultado de  $\frac{a}{b}$  se le llama número ( $\phi$ ).

Entonces:

$$\frac{a}{b} = \phi \quad (2)$$

Despejando  $a$ , a partir de la ecuación 2, obtenemos:

$$a = \phi b \quad (3)$$

Sustituyendo  $a$  y  $\frac{a}{b}$  en la ecuación 1 resulta:

$$\frac{\phi b + b}{\phi b} = \phi \quad (4)$$

De donde:

$$\phi b + b = \phi^2 b \quad (5)$$

$$(\phi + 1)b = \phi^2 b \quad (6)$$

$$\phi^2 - \phi - 1 = 0 \quad (7)$$

Que es una ecuación de segundo grado por lo que podemos aplicar:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (8)$$

Y obtenemos:

$$\phi = \frac{1 \pm \sqrt{1^2 - 4 \times 1 \times (-1)}}{2 \times 1} \quad (9)$$

La solución positiva de esta ecuación es:

$$\phi = \frac{1 + \sqrt{1+4}}{2} \quad (10)$$

O sea

$$\phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} = 1,618 \dots \quad (11)$$

Podemos continuar operando sin llegar al final, pues este número es irracional, posee infinitas cifras decimales no periódicas, de allí que Luca Pacioli dijera que es inconmensurable, las primeras cifras de  $\phi$  son:

$$\phi = 1,61803398874989894848204586834365 \dots$$

Este número es llamado número de oro y a la relación Leonardo Da Vinci la llama relación de oro.

En el renacimiento, el fraile franciscano Luca Pacioli, amigo de Leonardo, en su obra-DE LA DIVINA PROPORCIÓN (1509)-, ilustrada con dibujos de Leonardo da Vinci, llama a esta relación “divina” por las siguientes razones:

- ➔ **Unicidad**: el número áureo es único, al igual que Dios.
- ➔ El número áureo está definido por **tres segmentos de recta**, Pacioli lo asocia con la santísima Trinidad: Padre e hijo y espíritu Santo.
- ➔ La **inconmensurabilidad**, que no se puede medir, Pacioli asocia la inconmensurabilidad del número áureo con la de Dios.
- ➔ La **auto similitud**, que es la propiedad de un objeto en el que el todo es exactamente similar a una parte de sí mismo, a esta propiedad de la relación áurea Luca Pacioli la asocia con la omnipresencia e invariabilidad de Dios.

Para Pacioli, así como a través de la quintaesencia Dios creó el universo que se representa por un dodecaedro, el número áureo genera el dodecaedro. Vemos uno en la fig.19.

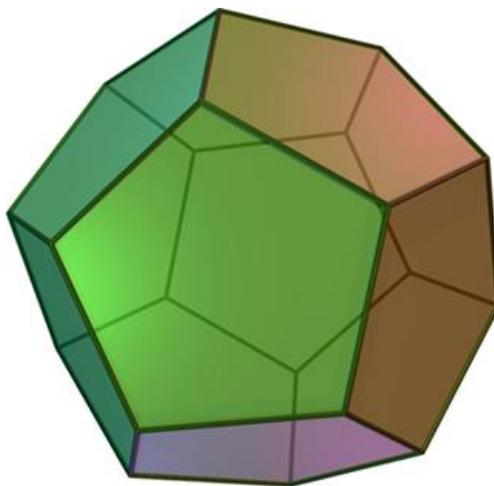


fig. 19 Dodecaedro

Si las doce caras del dodecaedro son **pentágonos regulares**, iguales entre sí, el dodecaedro es convexo y se denomina regular, siendo entonces uno de los llamados **sólidos platónicos**.

También podemos obtener la relación áurea geoméricamente, a partir de un cuadrado, como se muestra a continuación a partir de la siguiente figura.

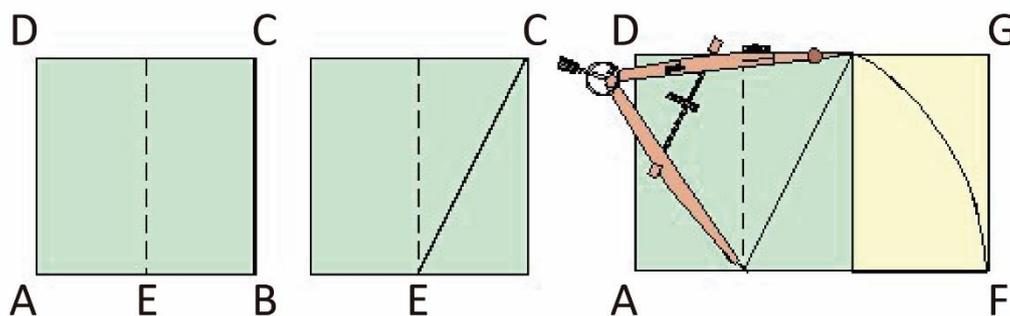


fig. 20 Construcción de un Rectángulo Áureo

Se dibuja un cuadrado al que se divide por la mitad y se traza la diagonal de una de las mitades ( $\overline{EC}$ ), se toma la medida de esa diagonal y haciendo centro en el punto **E** como se indica en la figura 20, se traza un arco que intercepte con la prolongación del lado  $\overline{AB}$ .

A partir de esa intersección se traza el rectángulo que se encuentra pintado de amarillo. El cuadrado inicial junto a este rectángulo forman el rectángulo **AFGD** en el que largo y ancho están en relación áurea, o sea que al dividir largo entre ancho el resultado es

$$\frac{\overline{DG}}{\overline{GF}} = \phi = 1,618 \dots$$

La relación áurea fue ampliamente utilizada por arquitectos y artistas, algunos como Durero y Leonardo da Vinci trabajaron en las proporciones entre las partes del cuerpo humano y la relación áurea, sostenían que las obras trabajadas con esta relación poseían una mejor apariencia y equilibrio.

### Φ EN EL ARTE

Luego del renacimiento, el interés por la relación Aurea dejó de ser tan marcado, hasta que próximo al año 1900, algunos pintores y teóricos modernos renuevan su atracción por el número áureo que incluso da nombre al grupo de críticos, poetas, escultores y pintores cubistas **Section d'Or** que exponen en el Salón la **Section d'Or** de París en 1912.

Artistas que vivieron más próximo a nuestro tiempo como el vanguardista Piet Mondrian y Salvador Dalí, la utilizaron y los contemporáneos la siguen utilizando en sus composiciones.

A continuación, analizaremos -desde este punto de vista- una obra de Piet Mondrian y otra de Salvador Dalí.

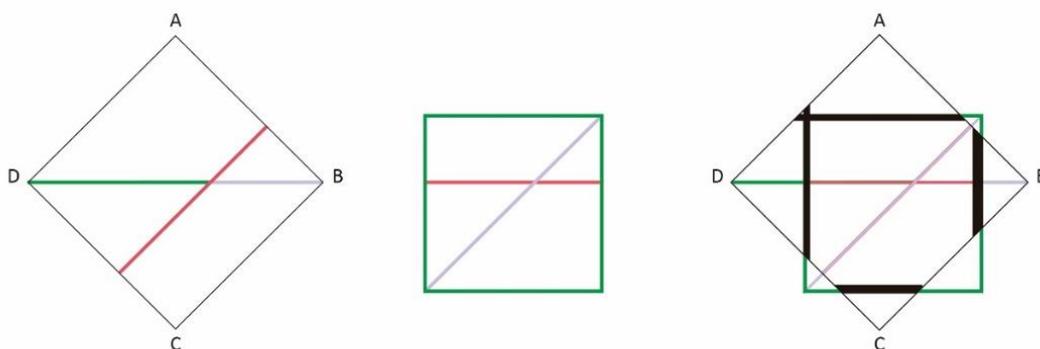
*Mondrian*

La obra que elegimos de Mondrian es Tabla 1 que se encuentra en el Museo de Arte Moderno de Nueva York, cuyas dimensiones son 113,7cm x 111,8 cm (mediciones diagonales) y que vemos en la Fig. 21.



*fig. 21 ....Tabla 1  
Pite Mondrian 1926  
Óleo sobre tela*

Analizando el siguiente esquema (Fig.22) podemos darnos cuenta de que Mondrian compone utilizando la relación áurea.



*fig. 22 Esquema de composición de Tabla 1 de Mondrian*

En el soporte ABCD, traza la diagonal  $\overline{BD}$  y una línea que lo divide en sección áurea (en el esquema está pintada de rosa). La medida del segmento de la diagonal que va desde D hasta la intersección con la línea áurea (pintado con verde en la figura de la izquierda), se usa cómo lado para construir un nuevo cuadrado que está representado en el centro de la figura 22.

En este nuevo cuadrado, más pequeño que el anterior, realiza el mismo procedimiento que en el cuadrado ABCD y los superpone como se indica a la derecha.

Pinta los lados del cuadrado pequeño en el bastidor (que coincide con el primer cuadrado), con líneas cuyo grosor está en relación 3/4/5.

### *Dalí*

En cuanto a Salvador Dalí, la obra que elegí es LEDA ATÓMICA, en la que el artista representa a su pareja Gala. Este cuadro es considerado la mejor obra de Dalí, que influenciado por la lectura de DE DIVINA PROPORCIONE de Fray Luca Pacioli, compone con gran rigor geométrico utilizando la divina proporción.



fig. 23 Boceto realizado por Salvador Dalí para su obra LEDA ATÓMICA

Puedes ver uno de los bocetos que Dalí confeccionó para esta obra dedicada a su esposa Gala en la fig. 23, en la que el ombligo de Gala es centro de la circunferencia donde se

inscribe el pentágono, símbolo de los pitagóricos, y donde se manifiesta la divina relación entre sus partes.

La obra está compuesta a partir de este pentágono, los cuerpos de Gala, del cisne, los elementos del paisaje y la base donde se apoya Gala, contribuyen a crear el pentágono. El pedestal y otros elementos también están trabajados en relación áurea.



fig. 24 *Leda Atómica*, Salvador Dalí

## Φ Y KEPLER

Además de deslumbrar a los artistas, la divina relación también ejerció su fascinación en los hombres de ciencia como Johannes Kepler (1571-1630), astrónomo alemán que consideraba que esta relación era una de las dos cosas perfectas que existían, la otra para Kepler era el teorema de Pitágoras, y lo expresaba en estos términos:

*“La geometría tiene dos grandes tesoros: uno es el teorema de Pitágoras, el otro la división de un segmento entre el extremo y su proporcional. Al primero lo podemos comparar a un montón de oro, al segundo lo podemos llamar una piedra preciosa.”*

*Traducción de cita de Johannes Kepler*

Kepler ata para siempre estas dos “cosas perfectas” a través del famoso triángulo llamado triángulo de Kepler en su honor.

El triángulo de Kepler es un triángulo rectángulo, en el que sus lados coinciden con los lados de tres cuadrados cuyas áreas están en progresión geométrica<sup>12</sup> y donde la razón es el número áureo ( $\phi$ ).

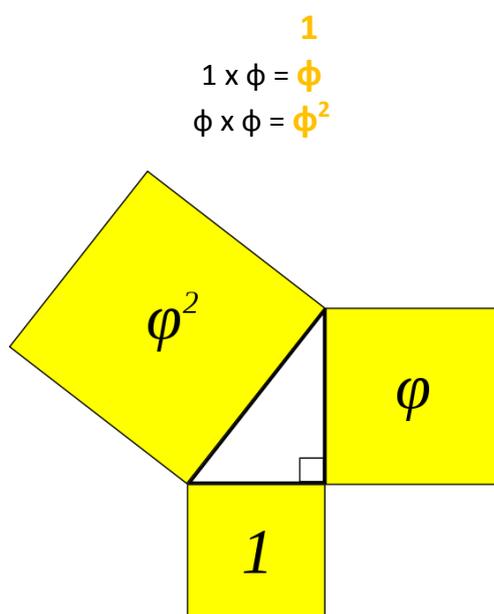


fig. 25 Triángulo de Kepler

<sup>12</sup> Una progresión geométrica es una secuencia en la que el elemento se obtiene multiplicando el elemento anterior por una constante denominada razón de la progresión, en el caso del triángulo de Kepler la razón es  $\phi$

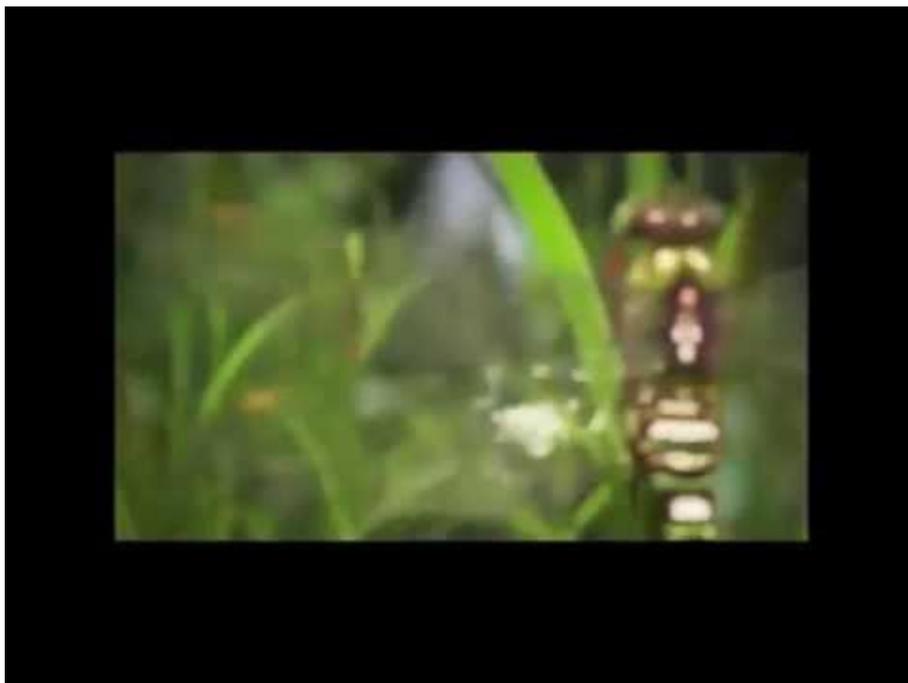
Es muy curioso que podamos encontrar el triángulo de Kepler en la gran pirámide de Guiza, la más grande de las pirámides y la más antigua de las siete maravillas del mundo, que se terminó de construir próximo al 2570 antes de Cristo. Si cortamos la pirámide con un plano vertical que pasa por su vértice, como se muestra en las figuras 26 y 33, y trazamos una línea vertical desde el vértice al piso, el plano queda dividido en dos triángulos con proporciones próximas a las del triángulo de Kepler.



*fig. 26 El Triángulo de Kepler en la gran Pirámide de Guiza*

### **Φ EN LA NATURALEZA**

Encontramos la relación áurea en la naturaleza, como patrón de crecimiento de plantas, animales, y en las proporciones del cuerpo humano. Veámoslo en el video 3 y las Fig. 27 a 32.



Video 3 Selección de *The Miracle of 528Hz Solfeggio and Fibonacci Numbers*  
YouTube- Bruine Dewer 2012<sup>13</sup>



fig. 28 corte de Nautilus

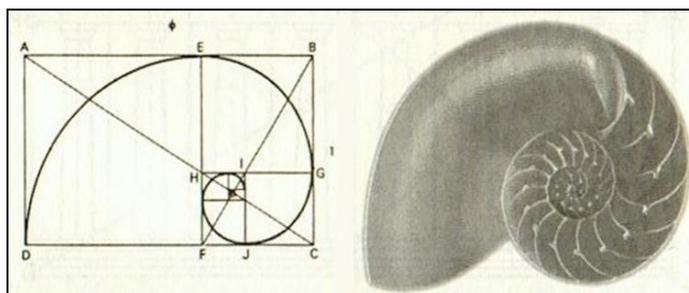


fig. 27 Caparazón de Nautilus

---

<sup>13</sup> el lector puede ver el video en:

[https://www.youtube.com/watch?v=EscKMW\\_saIA](https://www.youtube.com/watch?v=EscKMW_saIA)

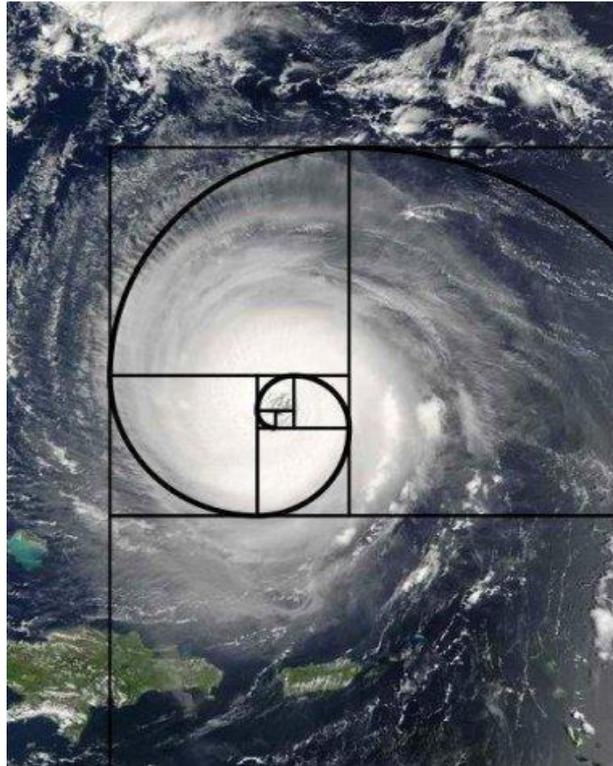


fig. 29 Tornado

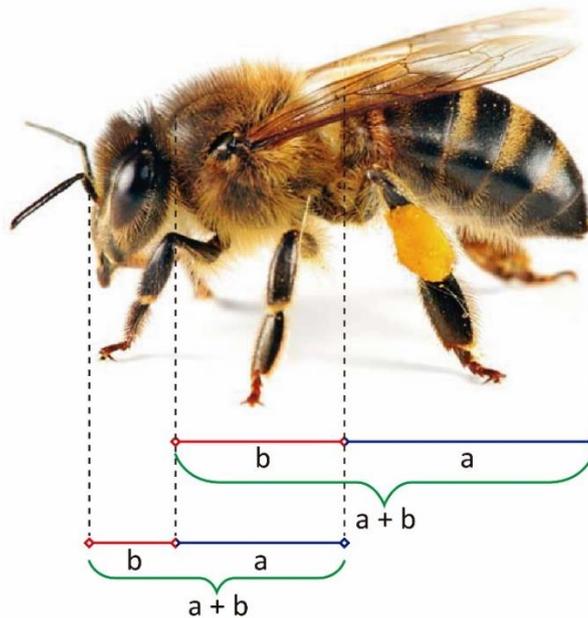
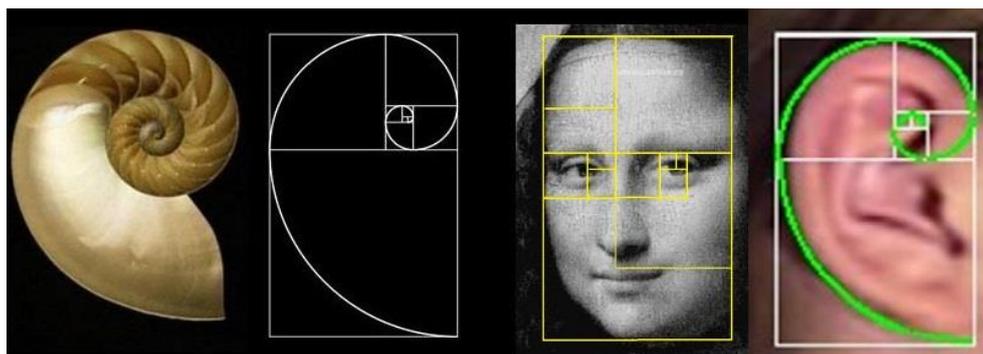
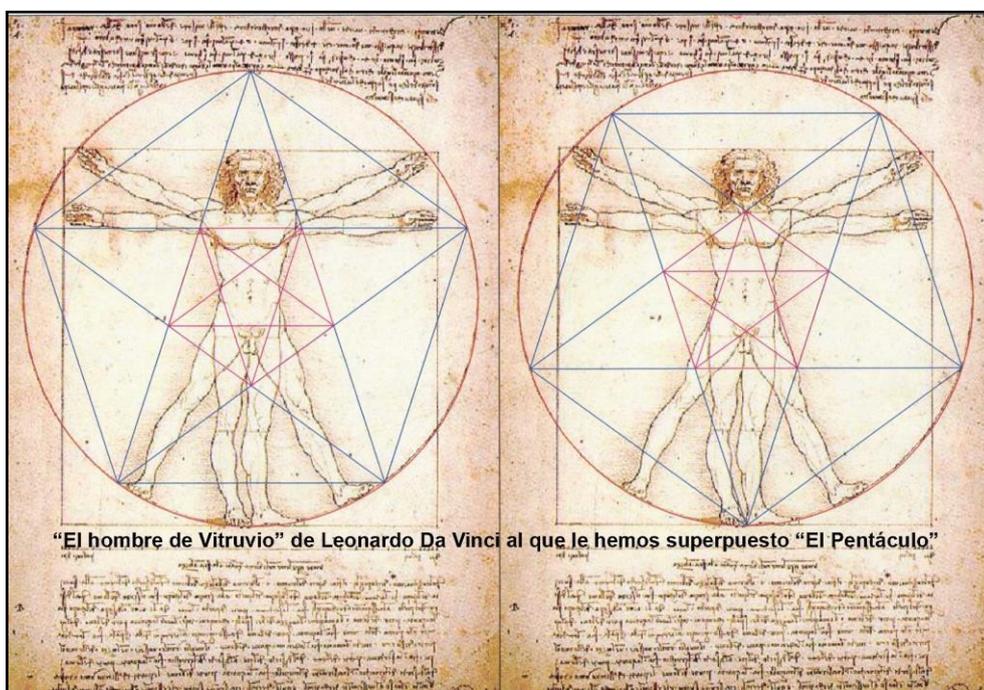


fig. 30 Relación áurea en lanaturaleza

El largo total del cuerpo del insecto está en relación áurea con su abdomen y cada una de las partes con la contigua.

fig. 31  $\phi$  en la naturaleza

Las mismas proporciones entre partes se encuentran en el Nautilus, la Gioconda y una oreja humana.



“El hombre de Vitruvio” de Leonardo Da Vinci al que le hemos superpuesto “El Pentáculo”

fig. 32 Pentáculo

### $\Phi$ EN OBJETOS CREADOS POR EL HOMBRE

En la antigüedad los hombres creían que podían ser defendidos por objetos, utilizaban amuletos en contra de las enfermedades y otros males, uno de éstos era el pentáculo grabado con símbolos mágicos para protegerse las enfermedades. El principal símbolo grabado era la estrella de cinco puntas, y de ahí se deriva que el objeto fuera llamado pentáculo, pentagrama o estrella de cinco puntas. Podemos ver el pentáculo en la figura 32 superpuesto al hombre de Vitruvio, dibujo realizado por Leonardo da Vinci.

La relación áurea también fue y es muy utilizada en la arquitectura; edificios emblemáticos de la civilización, en tiempos históricos muy diferentes, nos muestran la misma proporción. (Fig. 33 a 35)



*fig. 33 Gran Pirámide de Keops*

Gran pirámide de Guiza, que terminó de construirse aproximadamente en el año 2570 antes de Cristo, en Egipto, el Partenón, construido entre los años 447 y 432 antes de Cristo, en Grecia, y la torre Eiffel, inaugurada en el París de 1889, cumplen con la misma relación entre sus partes.



fig. 34 El Partenón

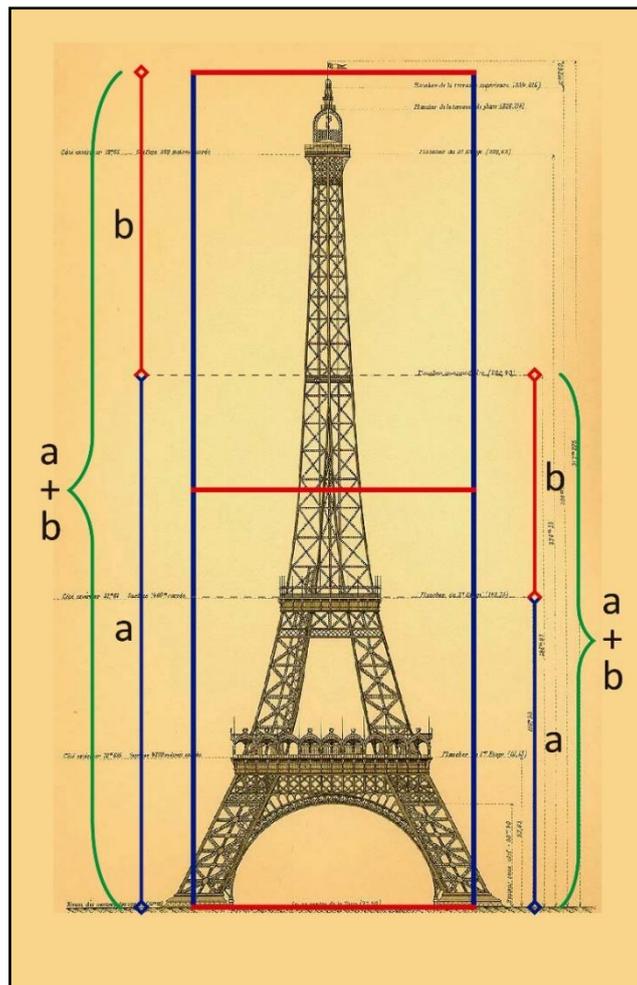


fig. 35 Torre Eiffel

La relación áurea se sigue utilizando en nuestro tiempo en todo aquello que queramos se vea armónico, agradable a la vista, la vemos en las relaciones entre parte de los automóviles, en logos de marcas muy conocidas, en las proporciones de las tarjetas de crédito y en innumerables objetos y páginas web diseñados con el fin de agradar.

Mostraré algunos ejemplos:

En el diseño de automóviles, los fabricantes de la marca inglesa Aston Martin (el coche del agente secreto 007, James Bond), utilizan la relación áurea con el objetivo de diseñar los coches más bellos, en su página Web, afirman que la utilización de la razón áurea en los diseños de los coches Aston Martin es uno de los elementos que contribuye a su perfección y aseguran que: *“la razón áurea se encuentra en el corazón de cada uno de sus modelos”*. En la fig. 36 se muestran dos de estos modelos donde confirmamos que las proporciones entre sus partes están en relación áurea.

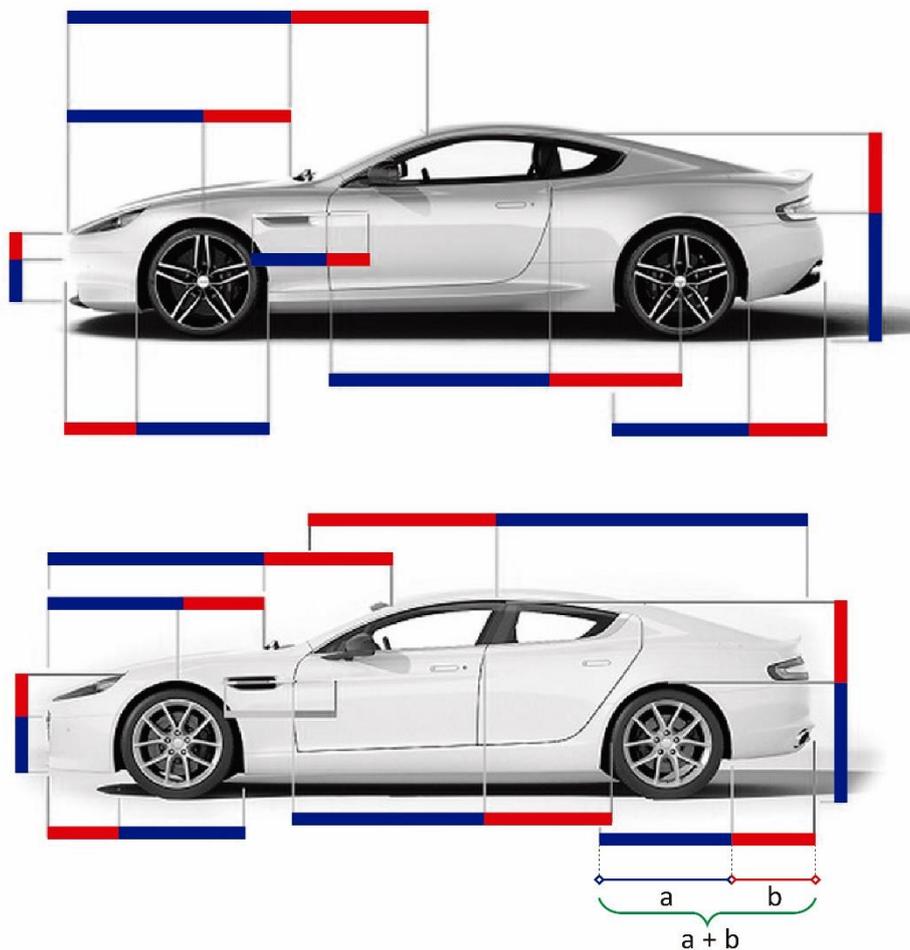


fig. 36 Aston Martin

La relación entre partes se cumple tanto en el eje horizontal como en el vertical, dando como resultado un objeto que nos resulta armonioso.

Otro ejemplo en Automóviles lo vemos en el representado en la fig. 37, si lo dividimos en dos partes como se muestra en la figura, y hacemos el cociente entre la longitud de la parte larga y la corta nos da como resultado el número  $\phi$ .

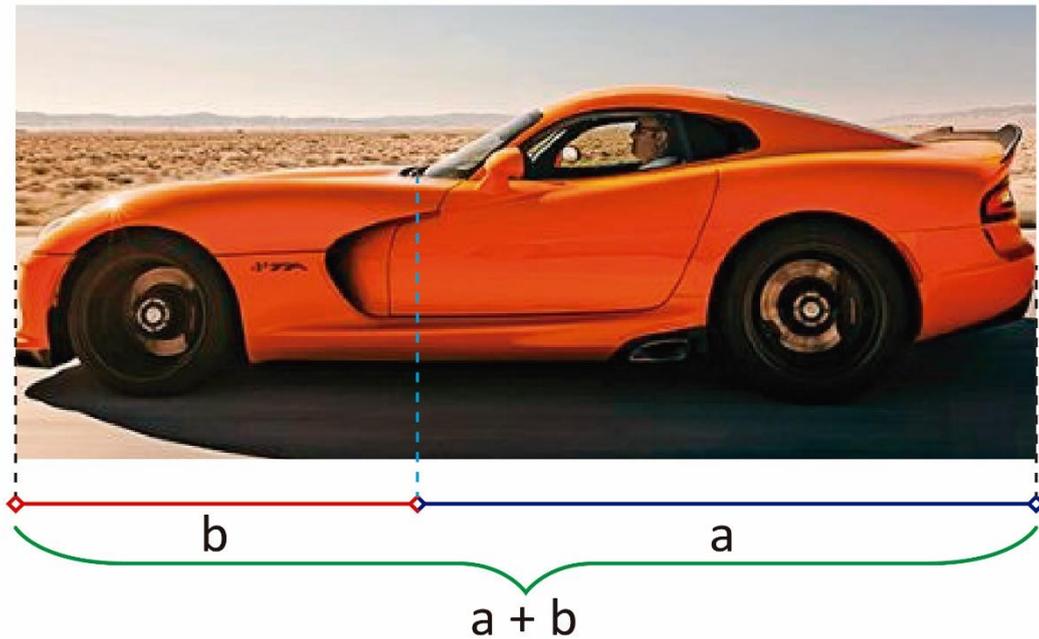


fig. 37 Vipper

Muchos de los logotipos y emblemas que representan las marcas de automóviles como Honda, Hyundai, Toyota y Nissan entre otros también han sido diseñados valiéndose de la relación áurea. Fig. 37 a 41

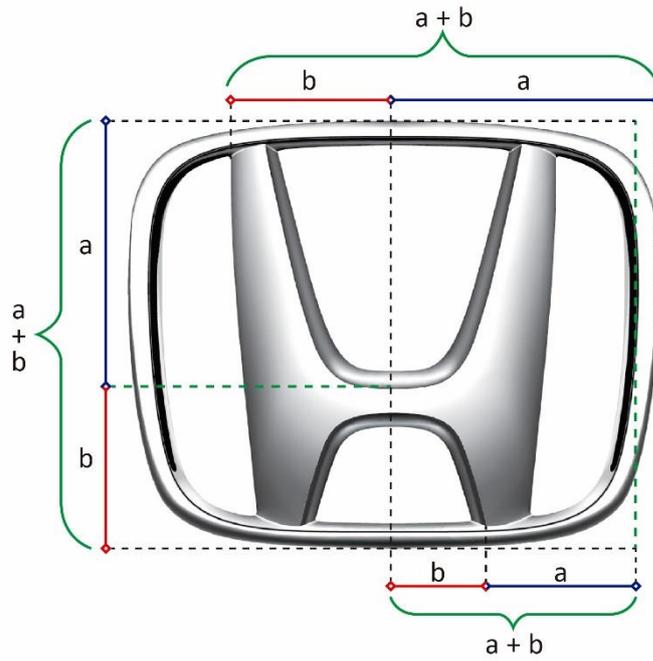


fig. 38 Insignia Honda

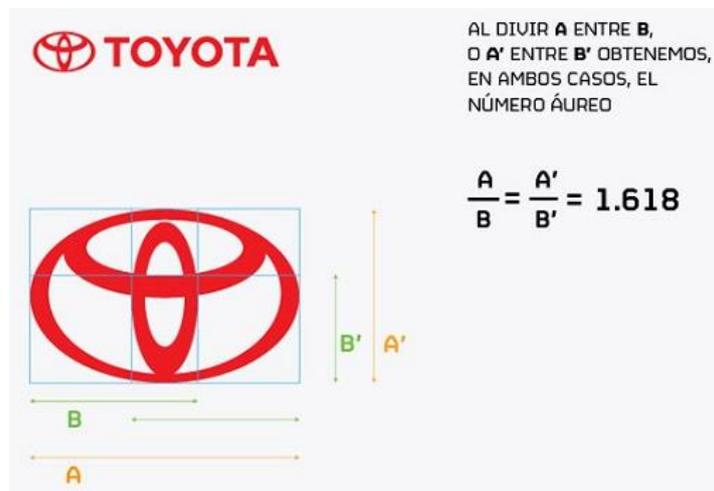


fig. 39 Insignia Toyota<sup>14</sup>

<sup>14</sup> Fuente del esquema:

<http://www.ar3d.es/divina-proporcion-logotipos/>

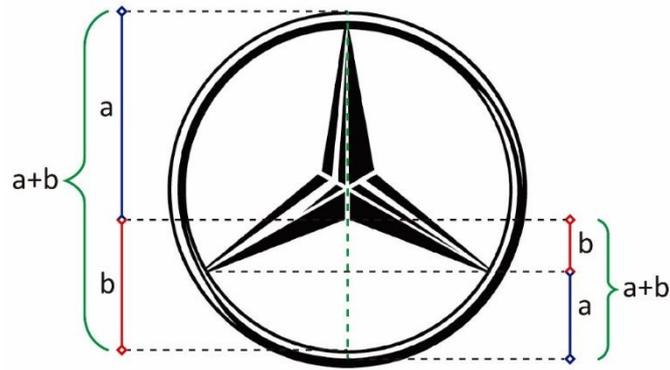


fig. 40 Insignia Mercedes Benz

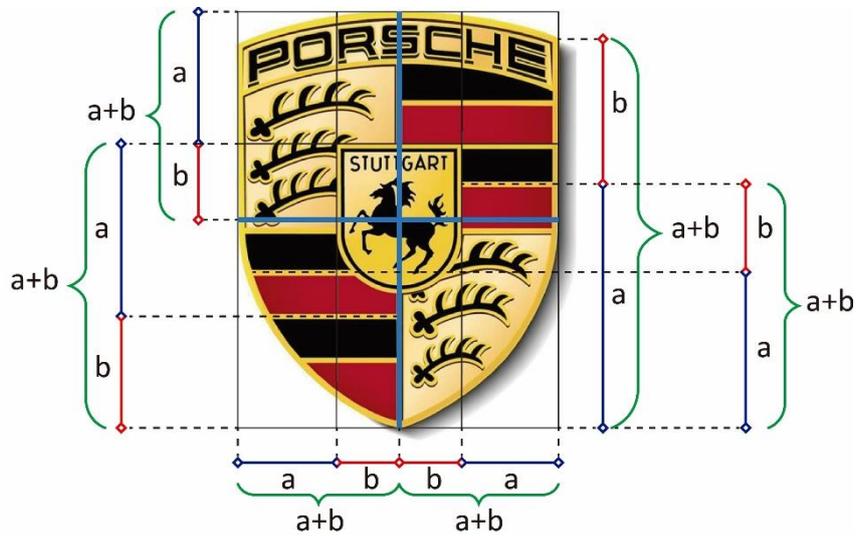


fig. 41 Insignia de Porsche

Muchos emblemas que vemos diariamente cuando caminamos por la calle, vamos al supermercado o navegamos en internet también fueron creados en base a la relación Aurea:

### LOGOTIPO DE PEPSI

Vemos en el esquema como se obtiene el logotipo a partir de dos circunferencias cuyos diámetros están en relación áurea.

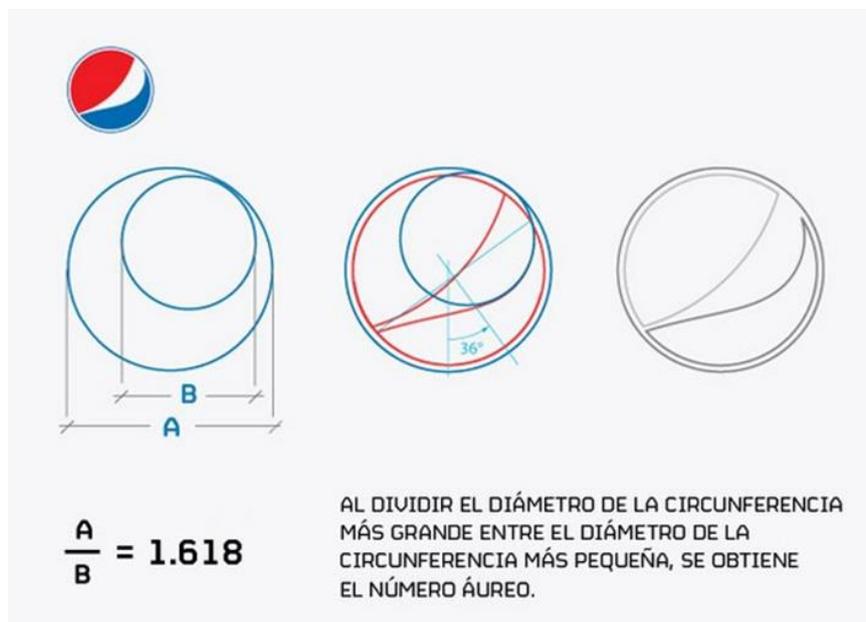


fig. 42 Logotipo de Pepsi [FUENTE](#)<sup>15</sup>

### LOGOTIPO DE APPLE

La manzana de Apple se aproxima a la proporción áurea en cuanto al diámetro de los círculos que se utilizan para crear la manzana, también el rectángulo que la contiene es un rectángulo áureo. Hay quien supone que no fue pensado a partir de la relación áurea porque no coincide exactamente con el dibujo que se muestra en el esquema de la fig. 43, justifican diciendo que tal vez el dibujante no lo creó a partir del número áureo, solamente le resultaron armónicas estas proporciones y por eso las utilizó. Está comprobado experimentalmente por varios investigadores que la divina relación nos resulta agradable, tal vez porque estamos acostumbrados a verla en la naturaleza

<sup>15</sup> Fuente del esquema:

<http://www.vzzblog.com.ar/?p=13848>

Si tenemos en cuenta, además de lo que vemos en la fig. 43, que la mayoría de los productos de Apple, del iPod al iPhone están diseñados a partir de la relación áurea, veo muy poco probable la hipótesis de la casualidad.

Es un hecho, que el logotipo de Apple se aproxima bastante a lo que vemos en la fig. 43, donde a la izquierda podemos apreciar círculos cuyos diámetros representan la serie

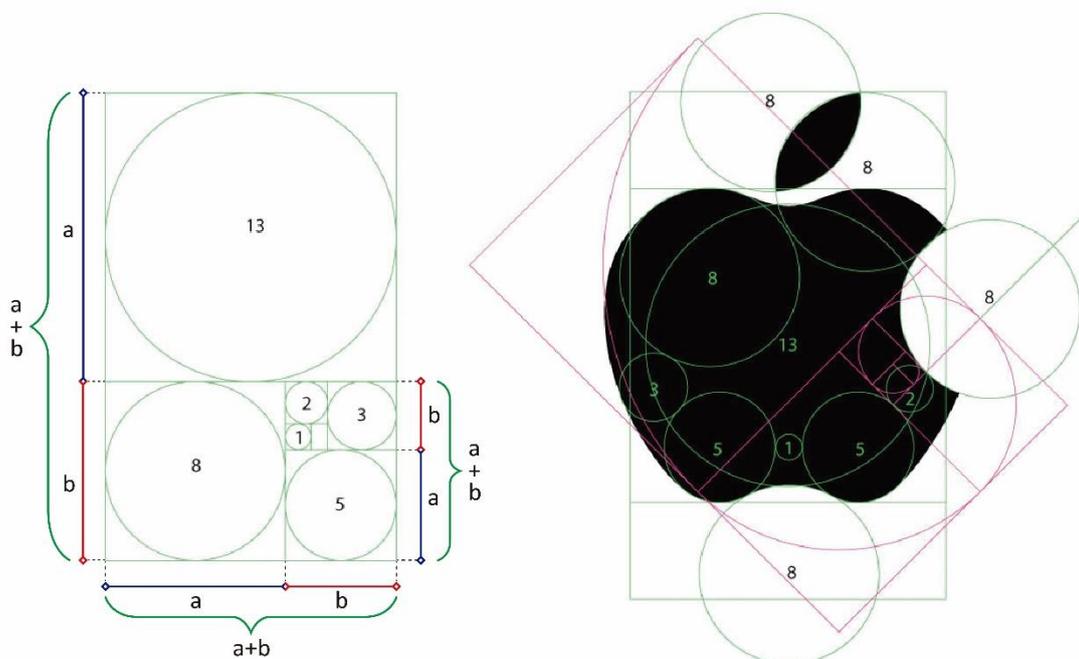


fig. 43 Logotipo Apple,

Intervención del esquema en la [pág. Ar 3d](#)

de Fibonacci que se relacionan con la proporción áurea<sup>16</sup> y a la derecha vemos el logotipo creado a partir de dichos círculos.

[Fuente](#)<sup>17</sup>

### *LOGOTIPO DE NATIONAL GEOGRAPHIC,*

*“diseñado por el estudio neoyorkino Chermayeff & Geismar. Aunque en apariencia parezca un simple rectángulo amarillo, en realidad este rectángulo respeta a la perfección las proporciones áureas. Un detalle muy apropiado para una marca centrada en la belleza de la naturaleza.”<sup>18</sup>*

<sup>16</sup> A medida que crece la serie, el cociente entre dos números sucesivos se aproxima a  $\phi$

<sup>17</sup> <http://www.ar3d.es/divina-proporcion-logotipos/>

<sup>18</sup> [designals](#): LA PROPORCIÓN ÁUREA Y LAS MARCAS

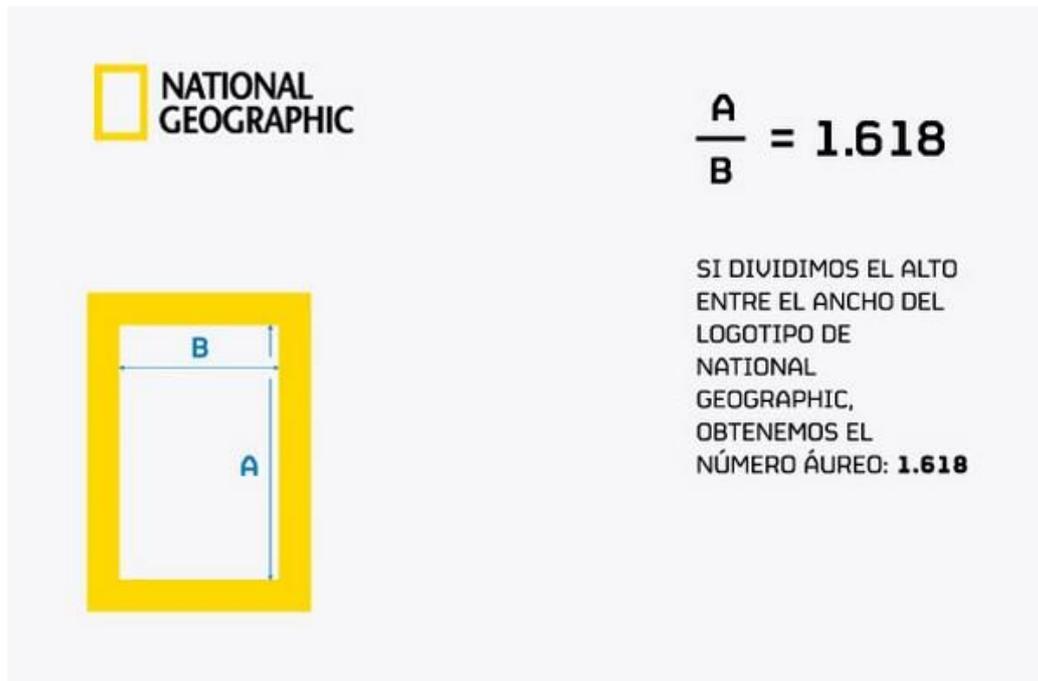


fig. 44 Logotipo National Geographic [FUENTE](#)<sup>19</sup>

### ICONO DE TWITTER

También en el diseño del icono de Twitter se aplica la relación áurea, en el esquema se ve claramente cómo fue creado a partir de círculos relacionados a través de la divina proporción.

---

<sup>19</sup> <http://www.ar3d.es/divina-proporcion-logotipos/>

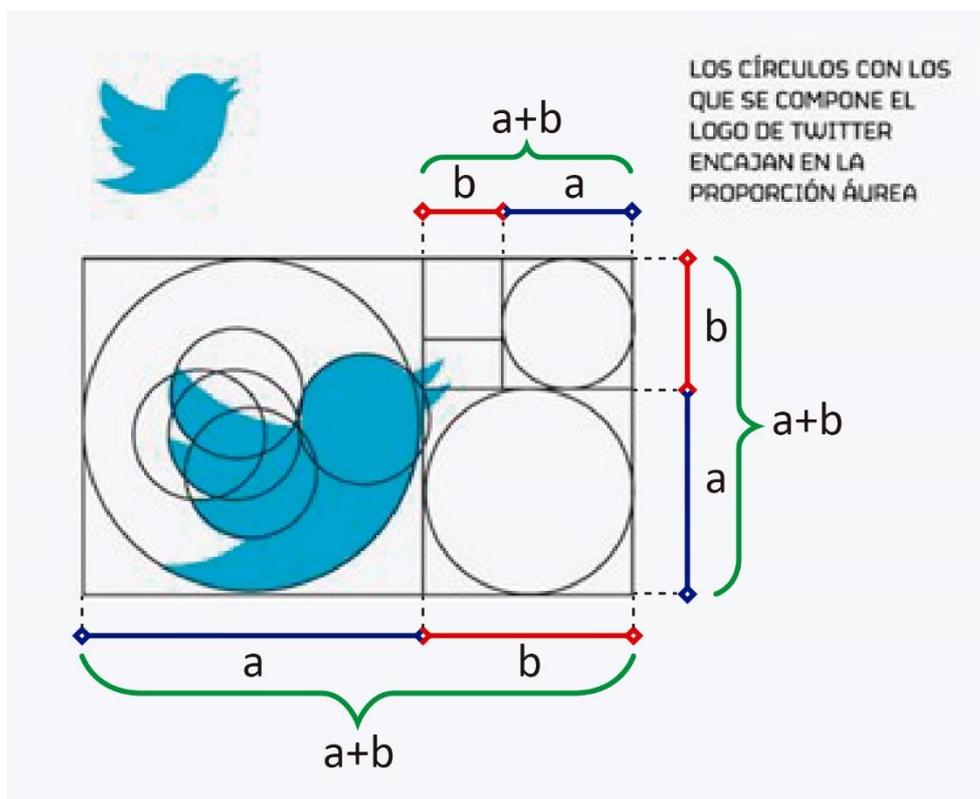


fig. 45 Logotipo Twitter, intervención del esquema del [Ar 3D](#)<sup>20</sup>

## INVESTIGACIÓN RECIENTE

En julio del 2015 leemos una noticia en la prensa cuyo titular expresa: “Desentrañan como Miguel Ángel usó matemáticas”, y podemos leer que una nueva investigación, publicada en una revista científica<sup>21</sup> entregó evidencia matemática de que Miguel Ángel utilizó el denominado número de oro al pintar uno de los frescos más famosos de la capilla cistina: LA CREACIÓN DE ADÁN (Fig. 46).

De la investigación acerca de esta pintura surge que: el punto medio entre los dedos de Adán y Dios, zona clave en esta obra, separa al cuadro en dos partes que están en relación áurea, donde la zona que determina el segmento mayor está ocupada por Dios.

<sup>20</sup> <http://www.ar3d.es/divina-proporcion-logotipos/>

<sup>21</sup> [Revista Clinical Anatomy](#) por Devis de Campos y publicado por primera vez en línea el 17 de julio de 2015 por: Devis, Tais Malysz ,João Antonio Bonatto-Costa ,Geraldo Pereira Jotz ,Lino Pinto De Oliveira Júnior y Andrea Oxley da Rocha

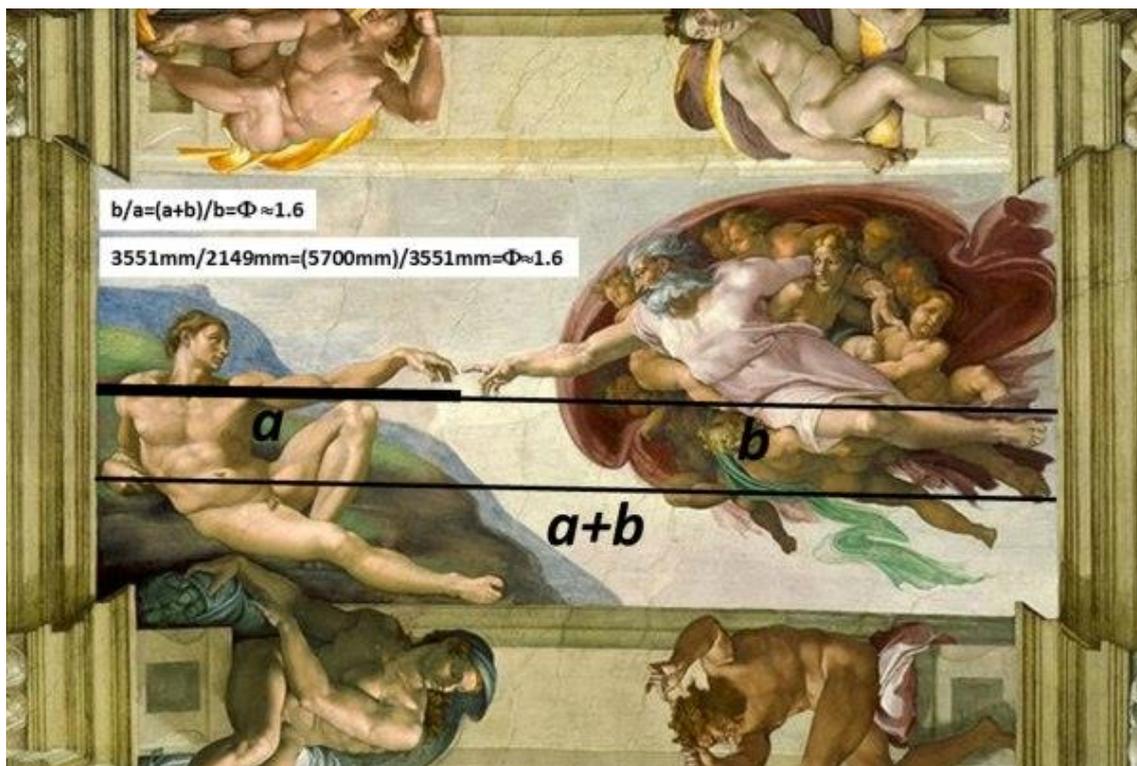


fig. 46. La Creación de Adán, fresco (1508-1512).  
Miguel Ángel Buonarroti.<sup>22</sup>

Los científicos, también decidieron analizar la aplicación de la relación en las otras imágenes que forman el techo de la Capilla Sixtina y fueron sorprendidos de por los resultados: los dedos de Dios y Adán están en la intersección de dos perpendiculares que se cortan en el punto áureo Fig. 47.

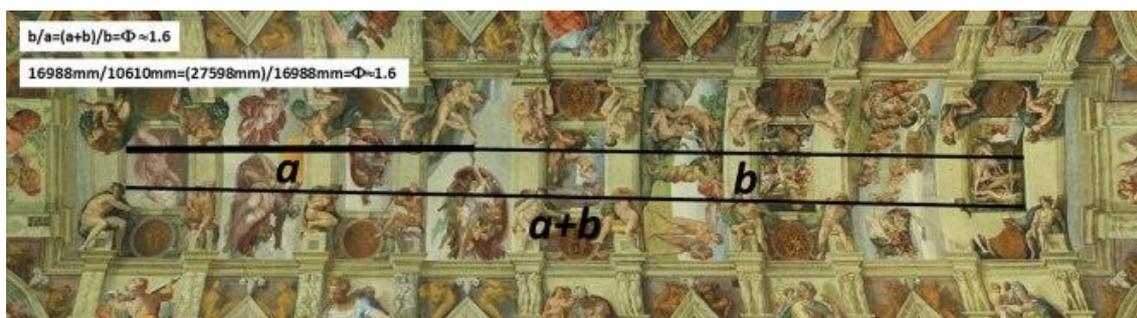


fig. 47 El techo de la Capilla Sixtina (1508-1512).  
Miguel Ángel Buonarroti.<sup>23</sup>

<sup>22</sup> Extraído de Barreto y Oliveira, 2004 . Todas las mediciones fueron tomadas con la ayuda de Image Pro Plus Software 6.0; Medios de comunicación cibernética, Silver Spring, MD, EE.UU.. Para calibrar la Imagen Pro Plus Software, se utilizaron los siguientes comandos: Medir / Calibración / espacial.

<sup>23</sup> Extraído de Barreto y Oliveira, 2004 , todas las mediciones fueron tomadas con la ayuda de Software Image Pro Plus 6.0; Medios de comunicación cibernética, Silver Spring, MD, EE.UU.. Para calibrar la Imagen Pro Plus Software, se utilizaron los siguientes comandos: Medir / Calibración / espacial.

Luego de presentar sus descubrimientos, la conclusión de este equipo de científicos es:

*“...los datos presentados aquí son pruebas convincentes de que el número de oro ( $\Phi = 1,6$ ), que se encuentra en muchas estructuras biológicas y obras de arte de artistas de renombre (Livio, 2002 ; Newell et al., 2008 ; Hutchison y Hutchison, 2010 ; De Campos, 2014 ), no pasó desapercibido por Miguel Ángel. Ante este descubrimiento, se asume que la belleza y la armonía que se encuentra en todas las obras de Miguel Ángel no pueden basarse únicamente en su conocimiento anatómico. Creemos que, con toda probabilidad, Miguel Ángel sabía que las estructuras anatómicas que incorporan el número de oro ofrecen una mayor eficiencia estructural y, por lo tanto, utiliza el número de oro para mejorar la calidad estética de sus obras.”*

## FIGURAS Y CUERPOS REGULARES

### FIGURAS REGULARES

En la Edad media, los artistas, en el intento de que su obra tendiera a la perfección, se esforzaban por encontrar en las matemáticas un puente entre lo terrestre y lo divino.

Trabajaban utilizando figuras geométricas en la composición, esto se aprecia en la obra del siglo IX representada en las figuras 48 y 49, “EL REY Y SU CORTE” de la Biblia de Carlos el Calvo, donde un círculo inscrito en un rectángulo (en amarillo en la fig. 49) dibuja un arco de medio punto y la composición interna al arco se realiza a través de dos círculos.



fig. 48 Biblia de Carlos el Calvo  
"El Rey y su corte"



fig. 49 Biblia de Carlos Calvo  
"EL REY Y SU CORTE"

Cabezas, manos y pies de los personajes forman los dos círculos que en la fig. 49 se ven en rojo. Estos círculos rojos superpuestos y el círculo y rectángulo amarillo muestran la estructura general del cuadro.

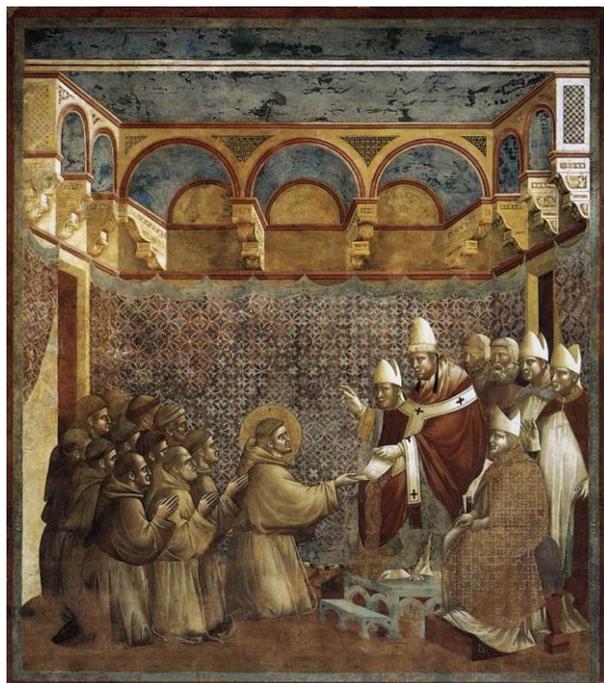


fig. 50 "APROBACIÓN DE LA ORDEN FRANCISCANA"  
Giotto 1290-1300

Los hombres de la edad media sabían utilizar el compás y recurrían a él en las artes decorativas. Lo utilizaban para obtener arabescos realizados con círculos entrecruzados y polígonos. El Giotto da una prueba de ello en su obra "APROBACIÓN DE LA ORDEN FRANCISCANA", fresco ubicado en la Basílica de San Francisco de Asís, cuyas dimensiones son 270cm por 230 cm y que vemos en la figura 50.

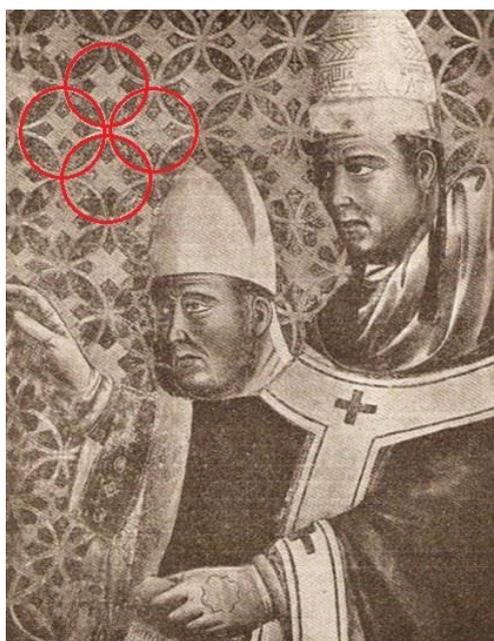
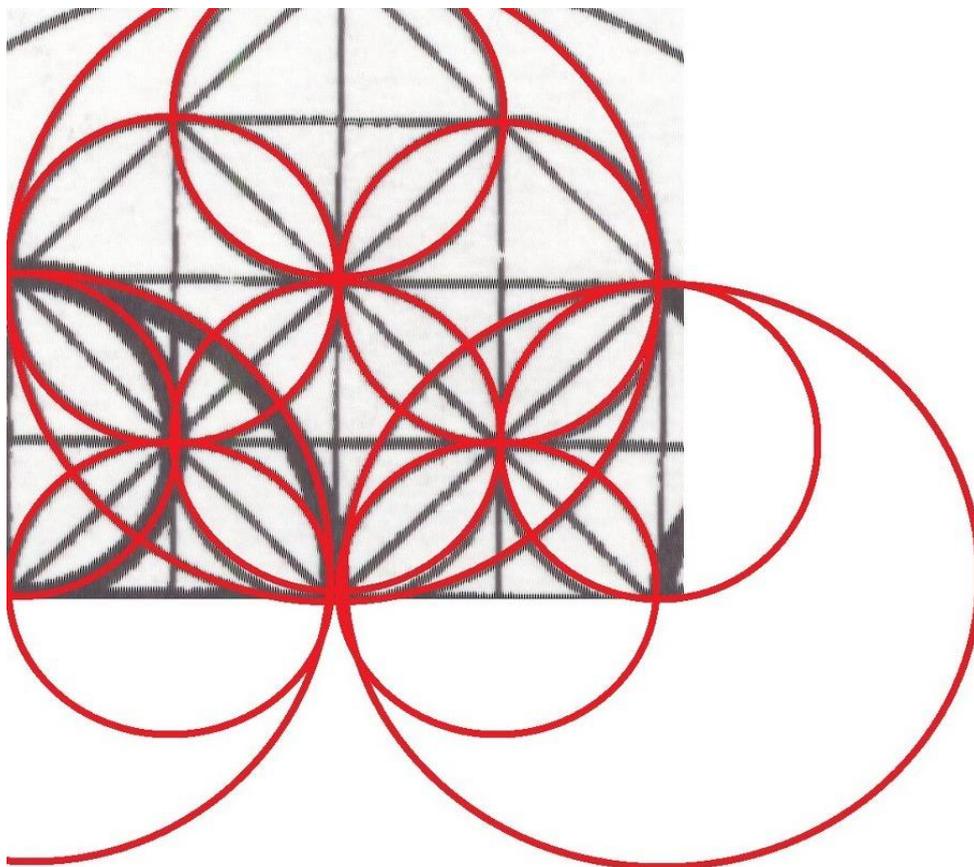


fig. 51 Detalle intervenido de la obra "Aprobación de la orden Franciscana"  
Giotto 1290-1300

En la fig. 51 y 52 se muestran, sobrepuestos al arabesco, los círculos rojos utilizados para su trazado.



*fig. 52 Forma de obtener arabescos utilizando el compás*

En el renacimiento, los artistas continuaron utilizando la geometría como herramienta fundamental en la composición; es característica la organización del espacio en el cuadro a través de formas geométricas: círculo, rectángulo y triángulo como se ve en la figura 53.

Se utilizaba la geometría para crear armonía y se planificaba su estructura a través de operaciones numéricas, ejemplo de ello es el fresco: LA TRINIDAD de Masaccio, donde podemos apreciar cómo se organiza la estructura de la obra; las figuras forman un triángulo equilátero con su base horizontal abajo, que da sensación de estabilidad a la composición.



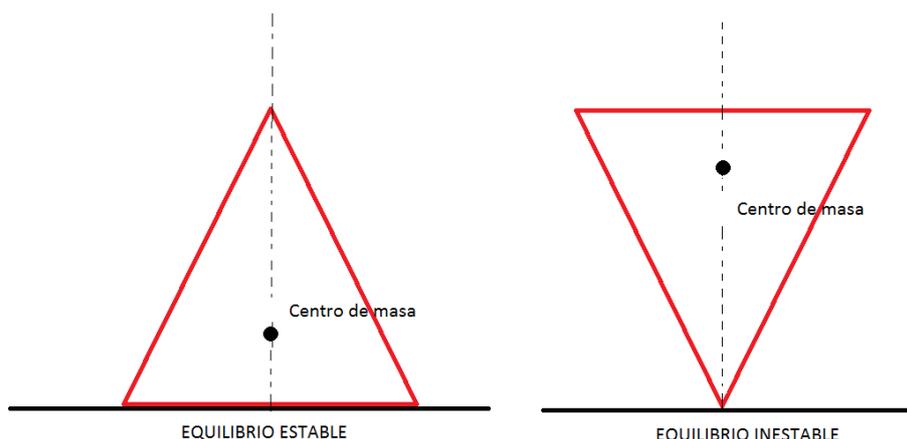
fig. 53 " La Trinidad " Masaccio

[Fuente](#)<sup>24</sup>

La estabilidad en un cuadro se rige por las leyes de la física, solo debemos imaginar las figuras, que en el cuadro son planas, como cuerpos materiales con espesor y peso para utilizar las mismas leyes de la física:

---

<sup>24</sup> <http://sdelbiombo.blogia.com/2008/110601-la-trinidad-de-masaccio.-una-obra-del-quattrocento-comentada.php>



*fig. 54 Equilibrio estable e inestable*

Suponiendo que este triángulo isósceles fuera un bloque tridimensional de densidad uniforme, cuando está apoyado en la base, su equilibrio es estable porque la vertical que pasa por su centro de masa cae dentro del plano de sustentación y si lo inclinamos un poco tiende a regresar a su orientación original. En cambio, si lo giramos  $180^\circ$  y lo colocamos con el vértice hacia abajo, estaría en equilibrio inestable porque si lo inclinamos un poco tiende a alejarse de su orientación original Fig. 54.

La figura 54 muestra el esquema de un cuerpo en equilibrio estable e inestable. Tenga en cuenta que al tratarse de un cuerpo físico necesariamente debe de poseer espesor.

## CUERPOS REGULARES

A partir de los polígonos regulares (que poseen dos dimensiones), como triángulos, cuadrados o pentágonos, podemos llegar a construir los cuerpos regulares o poliedros (tridimensionales) que se llaman sólidos platónicos, se relacionan con los objetos de la naturaleza y han sido utilizados en las composiciones artísticas como elementos de gran belleza.

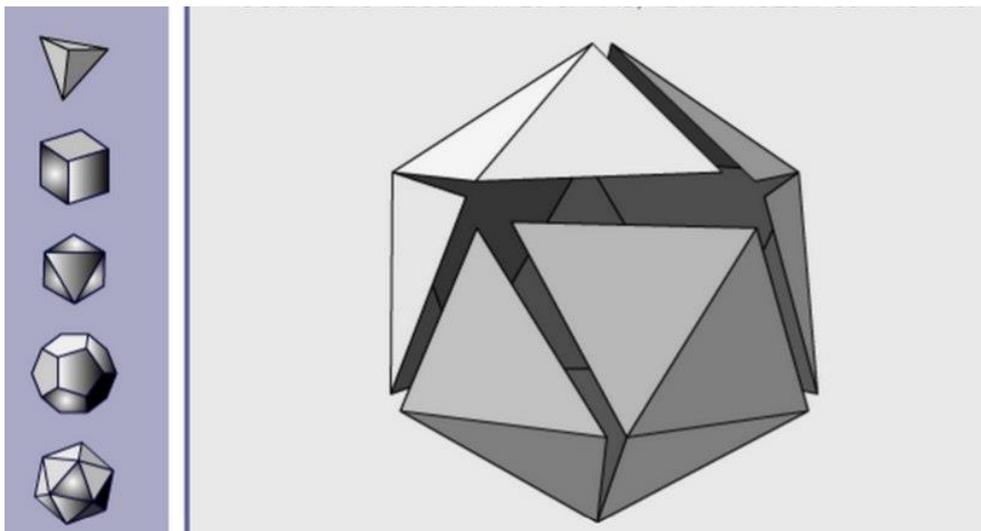


fig. 55 ICOSAEDRO REGULAR y los otros cuerpos platónicos [FUENTE<sup>25</sup>](#)

En la figura 55 vemos representados a la izquierda los sólidos platónicos, las caras de estos poliedros son triángulos, cuadrados y pentágonos. A la derecha vemos cómo se construye uno de ellos<sup>26</sup>.

Hay indicios de que estos cuerpos se conocían en la prehistoria, porque los arqueólogos han descubierto en Escocia sólidos regulares del neolítico que corresponden al año 2000 antes de Cristo y se conservan en el museo Ashmolean de Oxford, pero el estudio de estos cuerpos aparece con el análisis de los llamados Sólidos Platónicos.

Sobre el conocimiento acerca de estos cinco cuerpos en la historia hay varias versiones, una de ellas es la siguiente:

Hace más de 2600 años, vivía en Italia un niño cuyo padre era grabador de joyas y trabajaba con piedras preciosas. En esa zona abunda la pirita, cuyos cristales tienen formas de cuerpos regulares, puede cristalizar como cubo, octaedro, dodecaedro y en raras ocasiones icosaedro, nuestro niño creció observando las formas geométricas de las piedras, lo que lo llevó a interesarse por los poliedros. Este niño crece y es Pitágoras<sup>27</sup>, que asocia cada uno de esos poliedros con un elemento primario de su época:

<sup>25</sup> <https://dl.dropboxusercontent.com/u/44162055/manipulables/geometria/poliplatonicos.swf>

<sup>26</sup> En la pág. de Juan García Moreno puedes ver la construcción de cada uno de ellos en una animación interactiva, para ingresar haz [clik aquí](#).

<sup>27</sup> Según algunos historiadores Pitágoras nació en la isla de Samos (perteneciente a Grecia) y sus padres se trasladan a lo que ahora es el sur de Italia. Según otros nació en Tirrena, Italia, y siendo joven emigró con Mnesarco, su padre, a Samos.

Recordamos a Pitágoras fundamentalmente por sus aportes a la ciencia, sin embargo, en su época fue un chamán, reconocido por sus aportes en cuanto al mundo espiritual.

- ✱ Tetraedro –fuego
- ✱ Cubo-tierra
- ✱ Octaedro-aire
- ✱ Dodecaedro –cosmos
- ✱ Isocaedro –agua

El dodecaedro se asocia a la estrella pentagonal, símbolo de los pitagóricos. Su construcción era un secreto y su divulgación estaba penada con la muerte.

Otra versión atribuye a Platón( 427 a.C. a 347a.C.) el haber estudiado estos sólidos en primera instancia, de allí el nombre de Sólidos Platónicos.

Platón en Timeo, un diálogo escrito próximo al año 360 antes de Cristo expone:

*“ el fuego está formado por tetraedros; el aire, de octaedros; el agua, de icosaedros; la tierra, de cubos; y como aún es posible una quinta forma, Dios ha utilizado ésta, el dodecaedro pentagonal, para que sirva de límite al mundo”*

A partir de entonces estos poliedros fueron generando otras familias de cuerpos y en el renacimiento vuelven a deslumbrar a matemáticos y artistas como Piero della Francesca, Luca Pacoli, Leonardo DaVinci y Alberto Durero.

Alberto Durero, vivió en Nuremberg, (Alemania); según parece su interés por la geometría surge después de un viaje a Italia. Mientras realizaba un viaje por Venecia escribió una carta que envió a su ciudad natal y decía:

*“ luego cabalgaré hasta Bolonia donde alguien está dispuesto a enseñarme los secretos de la perspectiva”*

No sabemos quién fue ese alguien, pero al parecer tuvo mucha influencia sobre Durero en cuanto a su interés por la geometría, probablemente su maestro fue un matemático o un artista de mente matemática como Luca Pacioli.

Tal es el interés que despierta la geometría en Durero que publica libros en los que escribe sobre ella. Escribe en alemán, cosa muy poco común en la época ya que la mayoría de los libros estaban escritos en latín, y su objetivo es orientar a los jóvenes artistas alemanes que según él:

*“habían crecido en la ignorancia, como árboles sin poda. Aunque algunos de ellos han logrado destreza gracias a la práctica continua, sus obras están hechas intuitivamente y sólo según el gusto propio”*

*Alberto Durero*

A su vez Durero, cuya primera formación es metalúrgica igual que su Padre, influye en su tierra natal Nuremberg.

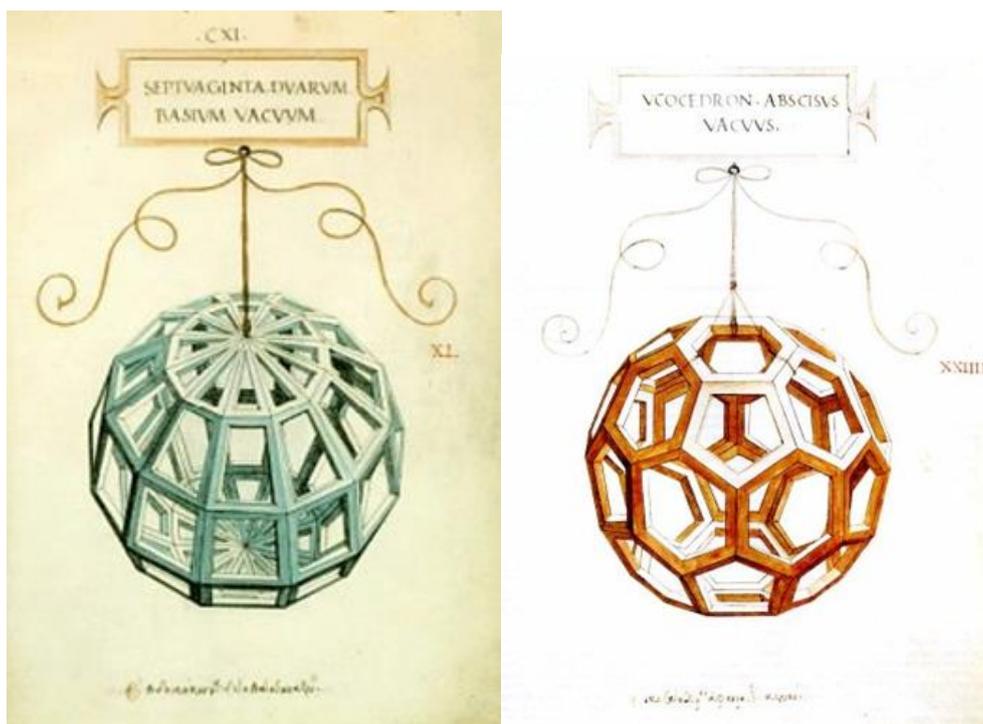


fig. 56 Dibujos de Leonardo Da Vinci

Nuremberg fue uno de los centros culturales más notables del renacimiento, se destacaba en el campo de las matemáticas aplicadas, música, astronomía, y era un importante centro editorial. Todos estos conocimientos interactuaban potenciándose y se aplicaban de forma productiva. Sus metalúrgicos eran excelentes artistas, geómetras, que además de producir espléndidos objetos lujosos para la aristocracia europea fabricaban dispositivos científicos, principalmente astronómicos.

Los metalúrgicos de Nuremberg influenciados por el libro del Luca Pacioli “DE DIVINA PROPORCIÓN” (1509), iustrado por Leonardo Da Vinci, se especializaron en la representación de cuerpos geométricos, fundamentalmente sólidos platónicos y los que se forman a partir de ellos.

Las ilustraciones de Leonardo en el libro LA DIVINA PROPORCIÓN representan los cuerpos geométricos macizos y su esqueleto, de manera que se veía su forma en el espacio. Fig 56.

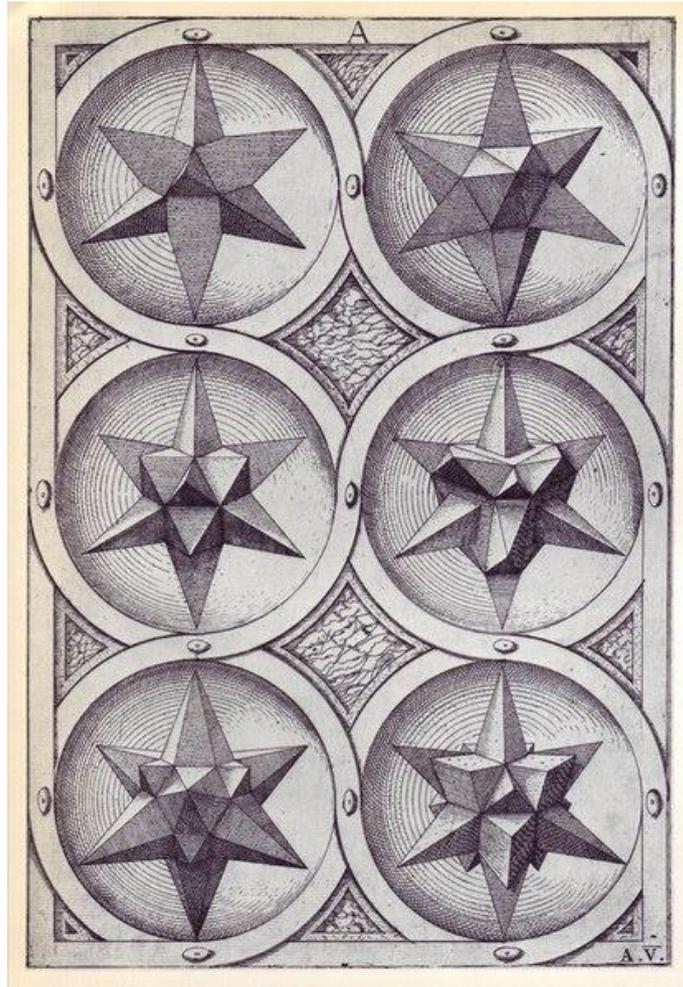


fig. 57 Grabado del Libro "Perspectiva Corporum Regularium"  
(1568) Wenzel Jamnitzer

En Núremberg se construían cuerpos regulares y sus derivados, en cristal y en madera para adornar muebles, algunos autores usaron esos motivos en sus libros, a partir de ahí se publicaron varios libros que trataban de geometría y perspectiva, entre ellos en 1568 "DE PERSPECTIVA CORPORUM REGULARIUM" de Wenzel Jamnitzer que contiene bellísimos grabados y es uno de los muy dignos representantes de los libros impresos en Núremberg en el siglo XVI. Fig. 57 y 58.

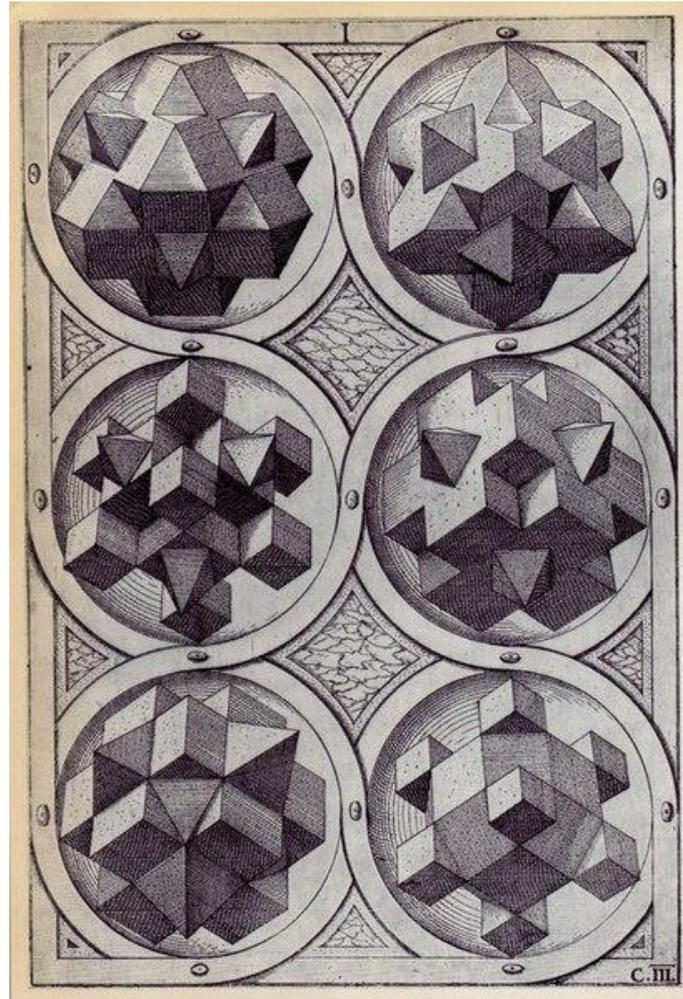
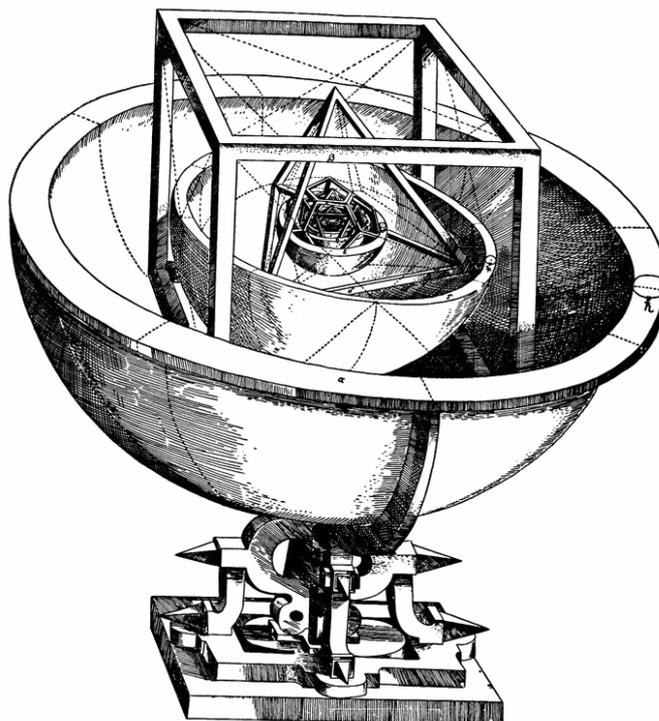


fig. 58 Grabado del Libro "Perspectiva Corporum Regularium" (1568) Wentzel Jamnitzer

También científicos como Kelper se ven influenciados por la perfección de estos cuerpos, vemos reflejada esta influencia en la cosmología de Kepler.



*fig. 59 Representación del modelo de sistema solar de Kepler*

La figura 59 representa el modelo platónico del sistema solar presentado por Kepler en su obra “MISTERIUM COSMOGRAPHICUM” de 1596.

Estos cuerpos regulares han seguido seduciendo a los artistas hasta nuestra época, ejemplo de ello es Maurits Cornelis Escher (1898-1972) muy conocido por sus grabados. El grabado que vemos a continuación en la figura 60, es una xilografía<sup>28</sup> del año 1942 que se titula “ESTRELLAS”, en él se pueden ver variedad de poliedros: regulares, otros compuestos a partir de ellos, macizos y el esqueleto al modo de los de Leonardo da Vinci.

---

<sup>28</sup> Xilografía es una técnica de impresión en la que se graba una plancha de madera que se llama matriz.

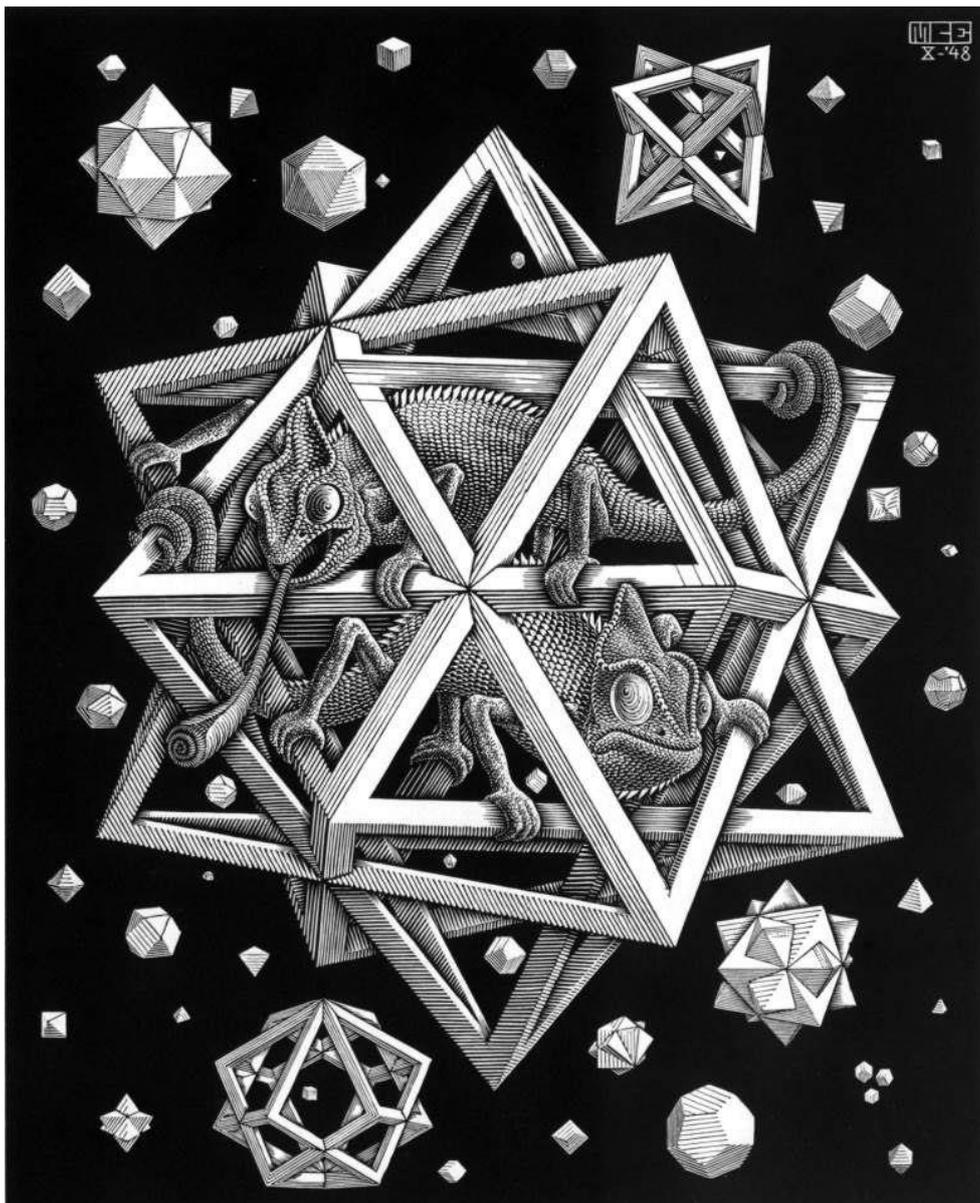


fig. 60 "ESTRELLAS" Xilografía (1942) M.C. Escher

## PERSPECTIVA

Cuando los pintores tratan de representar en una superficie plana espacios tridimensionales creando ilusión óptica de profundidad, se enfrentan a un problema de difícil solución. Éste como muchos otros problemas se ha ido subsanando a lo largo de la historia con el aporte de muchas personas, cada uno, apoyándose en los conocimientos anteriores, confirmándolos o modificándolos para la construcción de la gigantesca estructura que es el conocimiento humano.

El propósito de solucionar el problema de representar lo tridimensional en el plano, lo encontramos en la obra de Giotto, junto a una serie de aportes cada vez más refinados.

En su obra *APROBACIÓN DE LA ORDEN FRANCISCANA* realizada en 1325, que ya vimos cuando tratamos figuras regulares (figura 50), simula el espacio tridimensional a partir de la convergencia de líneas.

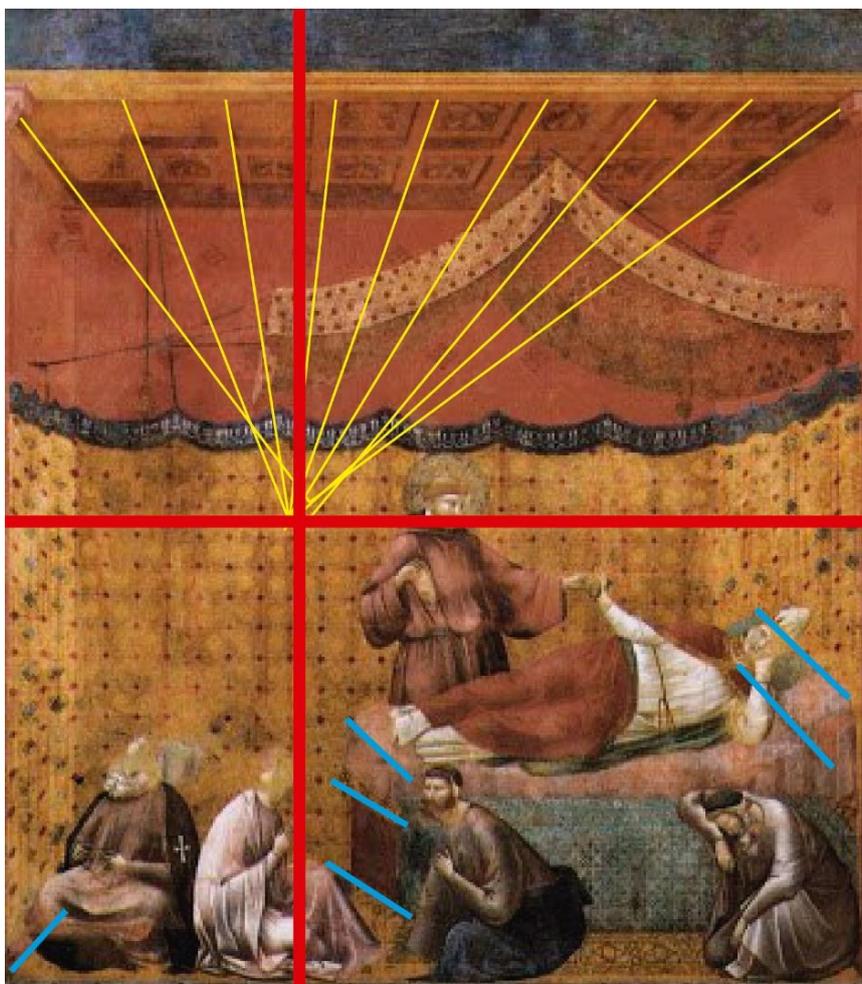


fig. 61 *Sueño de San Gregorio* Giotto

Giotto perfecciona la perspectiva pintando espacios interiores, a través de sus obras vemos que utilizaba ciertas reglas precisas para la representación del espacio:

- ➔ Las líneas y planos que son horizontales en la realidad y están arriba del nivel del ojo, deben aparecer en el plano del cuadro, inclinadas hacia abajo a medida que se alejan del espectador (en amarillo en la fig.61). las que están a la izquierda, a la vez de inclinarse hacia abajo lo hacen hacia la derecha y las que están a la derecha van hacia abajo y hacia la izquierda.
- ➔ Las líneas que se encuentran debajo del plano del ojo deberán inclinarse hacia arriba a medida que se alejan del observador (en cian en la fig. 61). Las que están a la izquierda a la vez de inclinarse hacia arriba lo hacen hacia la derecha y las que están la derecha se inclinan hacia arriba e izquierda a medida que se alejan del observador.
- ➔ demás, debería de haber alguna división horizontal y vertical a modo de cuadrantes, no necesariamente centrados en el soporte (en rojo en la fig. 61). En las zonas que delimitan los cuadrantes las líneas que se alejan del observador no debería sufrir prácticamente ninguna inclinación.

En la misma época del Giotto, también vivían en Italia los hermanos Lorenzetti, Ambrogio y Pietro, que también realizaron importantes aportes a la perspectiva.

Ambrosio (1290- 1348), en sus obras, se esforzaba por controlar la geometría, y usó el punto de fuga único para las líneas principales de los suelos de baldosas.

Pietro Lorenzetti (1280-1348), en su obra *EL NACIMIENTO DE LA VIRGEN*, utilizó dos sistemas de convergencia, lo que es considerando una hazaña en la perspectiva.

Los conocimientos adquiridos por Giotto fueron retomados tres generaciones más adelante por Cennino Cennini, que se consideraba heredero de Giotto y escribió reglas muy parecidas a las utilizadas por él en sus obras.

Aunque estos aportes son importantes, y fueron un método para la organización del espacio en el trecento, no estaban apoyados por una teoría geométrica ni óptica.

Contemporáneo de Cennino Cennini fue Filippo Brunelleschi, que realizó una contribución gigante al tema de la perspectiva con la invención de la perspectiva cónica<sup>29</sup>, o perspectiva lineal, llamada también por algunos autores perspectiva científica.

En el renacimiento, los pintores debían representar las figuras en los muros, con tanto realismo, que el ojo no debería distinguir entre lo real y lo pintado. Para lograrlo, se

---

<sup>29</sup> **perspectiva cónica:** Sistema matemático para representar objetos tridimensionales sobre una superficie bidimensional mediante la proyección de sus puntos sobre el plano del cuadro con líneas rectas que convergen en un punto elegido de forma arbitraria. Este punto constituye el ojo del observador.

valían de la geometría a través de la perspectiva lineal y de las leyes físicas en cuanto al comportamiento de la luz.

Los artistas que vivían en Florencia, a principios del siglo XV, comenzaron a utilizar esta técnica notable para crear la ilusión de tridimensionalidad en sus pinturas, y desde entonces la perspectiva lineal siguió siendo utilizada por todo pintor que quiera crear en su obra la ilusión de profundidad.

La geometría, como representación y organización del conocimiento sobre el espacio físico, ofrecía a los pintores una solución al problema de la representación del espacio real, utilizaban la perspectiva lineal para representar la profundidad espacial.

El tema de la perspectiva es otro ejemplo en el que el arte influye en el conocimiento científico: la perspectiva científica nace como necesidad para solucionar un problema a los artistas y da lugar a que surja en el renacimiento la perspectiva como disciplina matemática, como rama de la geometría que no había progresado demasiado en toda la edad media.

De esta rama de la geometría nacida de una necesidad de los artistas, surgen dentro de la matemática, con el transcurso del tiempo, la geometría descriptiva y la geometría proyectiva.

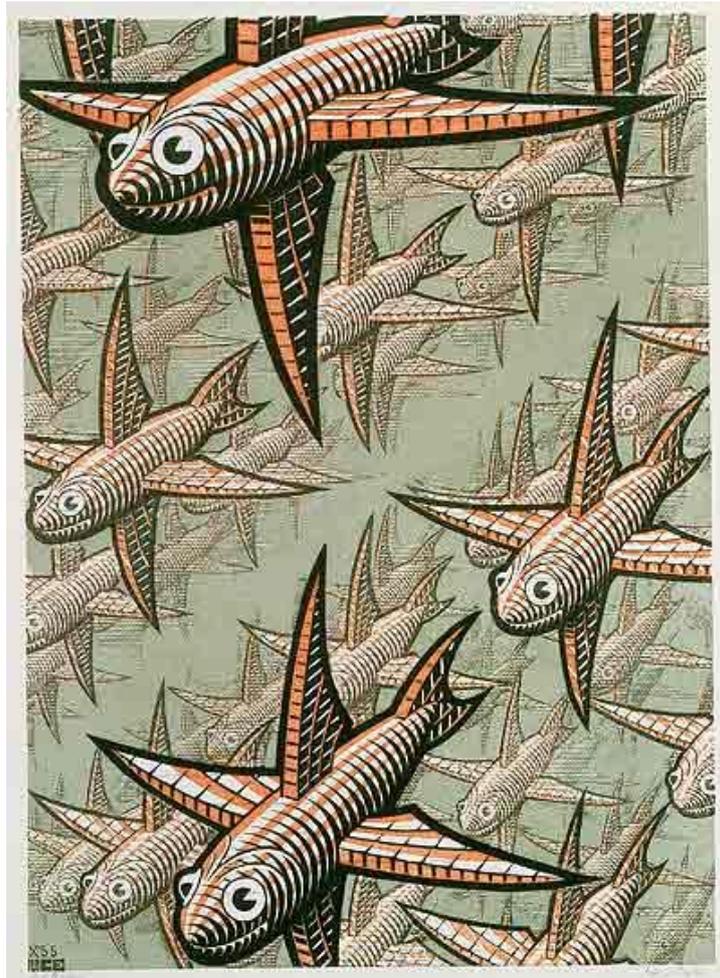


fig. 62 "PROFUNDIDAD"  
Grabado en Madera  
Etcher 1955

Un ejemplo más actual, donde el artista crea ilusión de tridimensionalidad utilizando las reglas de la perspectiva, es el grabado de Escher "PROFUNDIDAD" que vemos en la fig. 62 "PROFUNDIDAD"

El pintor crea ilusiones, es como un mago que nos muestra un mundo de fantasía, y el espectador es consciente de la ilusión pero disfruta de ella. Veamos otro ejemplo en la fig. 63. ¿Cuál es el objeto fotografiado?

¿Cuál de las siguientes opciones te parece correcta?

La fig. 63 es la foto de:

- parte de una escultura
- un bajo relieve
- un bajo relieve realizado en mármol blanco.

- una pintura al óleo.
- una obra realizada a lápiz sobre papel.



fig. 63 Detalle de obra

Después de elegir la opción, mira la nota al pie de página<sup>30</sup> para saber a que corresponde dicha foto.

En este caso para lograr la ilusión, el artista se vale fundamentalmente del conocimiento de las leyes físicas en cuanto al comportamiento de la luz.

Los pintores, para componer una obra realista que tiene largo, ancho y profundidad en una superficie que solo tiene largo y ancho, además de usar como herramienta la geometría deben utilizar su conocimiento de la luz y las sombras, solo así podrán crear esa ilusión que se rige por las mismas leyes físicas que el mundo real.

---

<sup>30</sup> detalle de OTOÑO, Jacob de Wit, 1740, óleo sobre tela, Museo Rijksmuseum Amsterdam

## FRACTALES

Otro tema apasionante de los muchos que relacionan artes plásticas y matemática, que trataremos brevemente, es el de los fractales.

Lo elegí por ser, además de apasionante e históricamente muy reciente, en cierto modo opuesto al tema de cuerpos regulares que ya vimos.

La palabra “fractal” fue inventada por Benoît Mandelbrot y escrita en su libro “LOS OBJETOS FRACTALES. FORMA, AZAR Y DIMENSIÓN” en 1975. Según el autor, crea esta nueva palabra para las necesidades del libro, a partir del adjetivo latino fractus, que significa «interrumpido o irregular».

Los fractales son objetos en los cuales su estructura se repite constantemente a diferentes escalas como por ejemplo la coliflor o las hojas de los helechos, en los que un trocito tiene la misma forma que el cuerpo entero.



*Video 4 Fractales  
"A la Caza de la Dimensión Oculta"<sup>31</sup>*

Los fractales son a la vez teoría matemática y método para analizar muchos fenómenos naturales como las nubes, el helecho, un coliflor, la forma irregular de una costa, o un objeto creado por el ser humano como lo es una obra de arte. Fueron creados a principios de los años sesenta por Benoît Mandelbrot (video 4) y actualmente de ellos se ocupan la geografía, la física teórica, el arte, así como la biología, podemos decir que existe una geometría fractal de la naturaleza que se basa en el concepto de auto similitud.

---

<sup>31</sup> El lector puede ver este video completo en:

<https://www.youtube.com/watch?v=YIRFrBLDEo>

El concepto de auto similitud consiste en que cada parte es igual al todo en diferentes escalas, las partes pequeñas se parecen a las grandes, sólo cambia el tamaño, un ejemplo perfecto de fractal natural es el romanesco o coliflor románica (fig. 64) en el que cada brote se compone de una serie de brotes más pequeños e idénticos a los anteriores dispuestos en espiral, este patrón de auto similitud se reitera en varios niveles más pequeños.



*fig. 64 Romanesco o Coliflor Románica*

Este vegetal es interesantísimo porque reúne un ejemplo natural de fractales y relación áurea a la vez, ya que su patrón es una representación natural de Fibonacci o [espiral de oro](#) , una espiral logarítmica donde cada cuarto de vuelta está más lejos del origen en un factor de  $\phi$ .

Otro ejemplo de fractal con un tamaño bien diferente al de la coliflor románica se encuentra en las montañas del Himalaya, donde están muchos de los picos más altos de la Tierra. (fig.65)

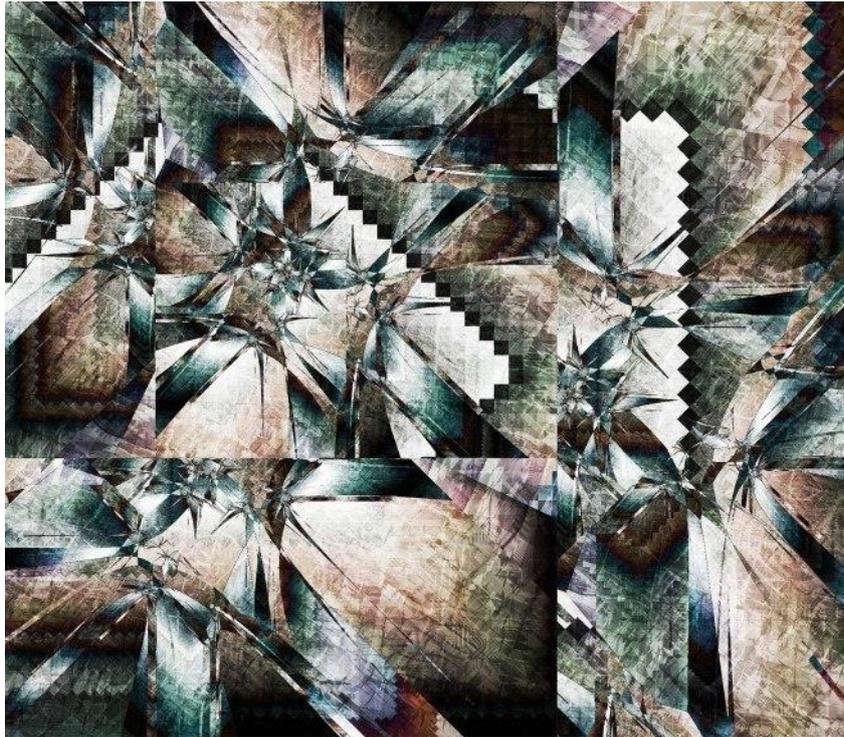


*fig. 65 Montañas del Himalaya  
Foto: Earth Observatorio de la Nasa*

Además de estos hermosos fractales naturales, existen los creados por el hombre, que van desde simples a muy complejos y muchos son considerados como obras de arte.

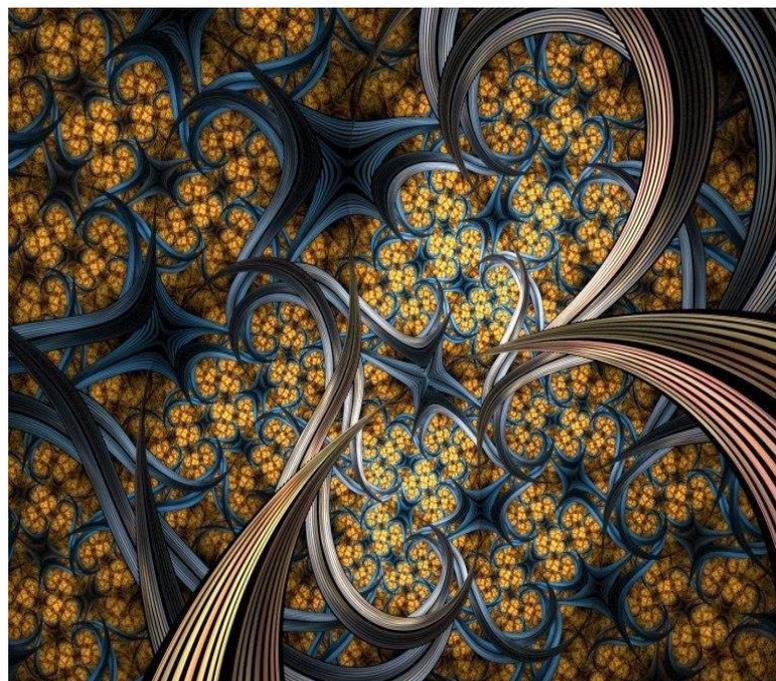
A partir de los fractales se ha creado un nuevo movimiento artístico llamado fractalismo que considera a la geometría fractal como una nueva estética. Esto es un ejemplo actual donde la matemática influye en el arte creando un nuevo movimiento artístico.

Los invito a ver algunas de estas obras.



*fig. 66 INTREPID 1*  
Arte fractal Yvonne Mous

Las figuras 66 y 67 muestran obras ganadoras del concurso de arte fractal Benoit Mandelbrot, creados utilizando la geometría fractal a través de programas que realizan las operaciones en la computadora, y en la fig.68 una imagen fractal que ofrecen para ser utilizada como fondo de pantalla que se llama Star Nurseries. Fig. 68



*fig. 67 "FLEXIBLE" Light Ska Iktomi*  
Concurso Arte Fractal Benoit Mandelbrot 2011-

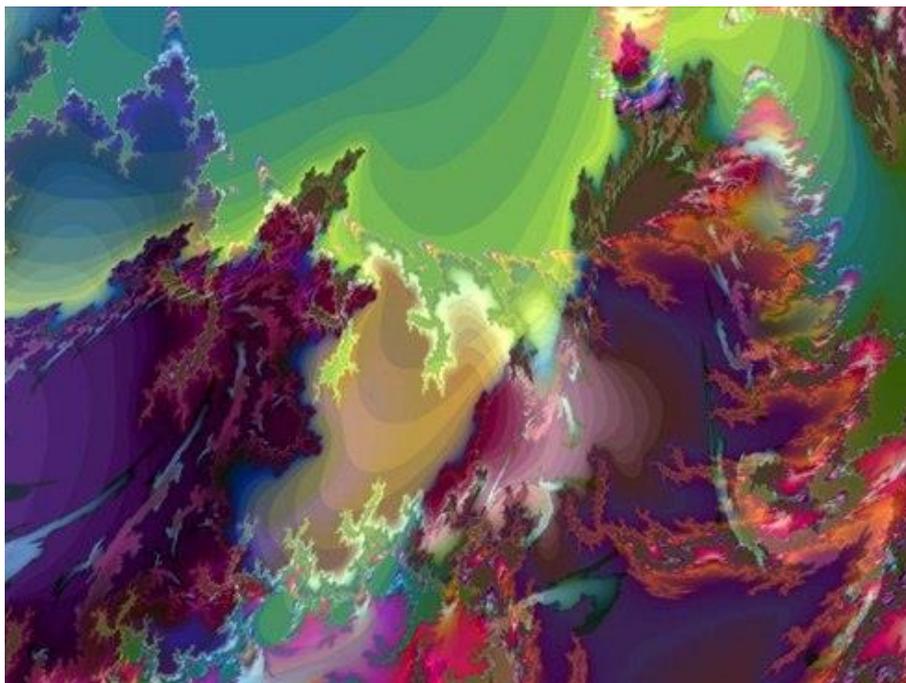


fig. 68 Imagen fractal, Star Nurseries

¿Cómo se produce un fractal? Analicemos la lógica con la que se crean algunos de los más sencillos, los que se originan a partir de un segmento de recta.

Un fractal nace de la repetición de un procedimiento, que se aplica a su vez a los resultados, y puede seguir hasta el infinito.

A partir de un segmento de recta pueden crearse innumerables fractales, veamos a modo de ejemplo como se originan tres de ellos:

- ➔ El primero que veremos es el conjunto de Cantor, llamado así porque es el aporte de Georg Cantor en 1883. Se parte de un segmento de recta que se divide en tres partes iguales y se le quita el segmento del medio.



fig. 69 Conjunto de Cantor

Este procedimiento se repite en cada uno de los segmentos obtenidos y así sucesivamente hasta el infinito, en la fig. 69 vemos los cinco primeros pasos.

- ➔ La curva de Koch También nace de un segmento de recta y fue descrita por primera vez por el matemático sueco Helge Von Koch, quien también describe el llamado copo de nieve de Koch. Se comienza igual que en el conjunto de Cantor dividiendo un segmento de recta en tres partes iguales. Se sustituye el segmento central por dos de la misma longitud que el suprimido, de tal forma que junto con él formarían un triángulo equilátero. Se repite este procedimiento en cada uno de los segmentos obtenidos, y así sucesivamente, siempre repitiendo la misma acción.

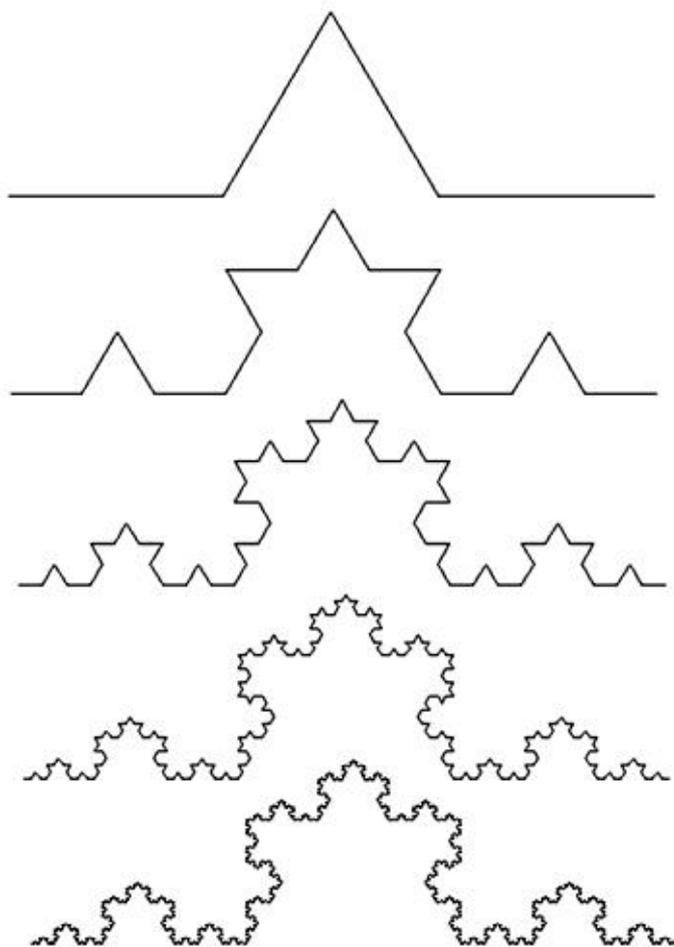


fig. 70 Curva de Koch

- ➔ El tercer ejemplo que veremos de fractales concebidos a partir de un segmento de recta es el árbol de Pitágoras o árbol Pitagórico (fig. 71 y 72).

Para crearlo se procede de la siguiente forma: al primer segmento se le agregan en un extremo otros dos segmentos como se muestra en la figura 71.

Se realiza el mismo procedimiento con cada uno de los segmentos resultantes

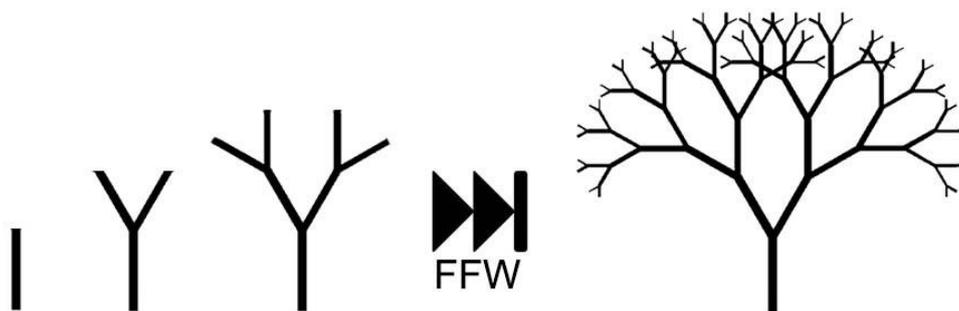


fig. 71

Obtenemos de esta forma el árbol Pitagórico que cumple con la condición de autosimilitud como se muestra en la figura 72.

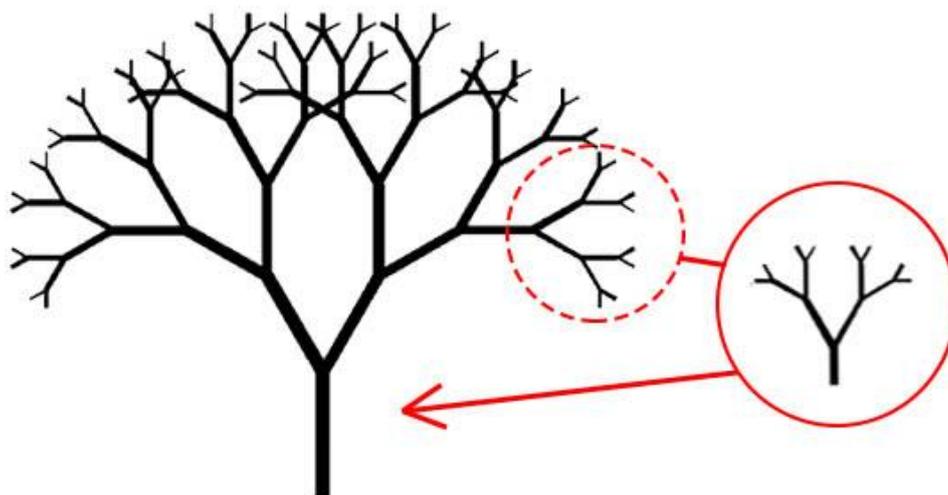


fig. 72 Árbol Pitagórico [\(fuente\)](#)<sup>32</sup>

Cabe destacar que el nombre de árbol Pitagórico no corresponde a la autoría de este fractal por parte de Pitágoras, fue el matemático holandés Albert E. Bosman en 1942 que inventó el árbol con cuadrados de la figura 73 y 74 del cual proviene el que vimos arriba con segmentos de recta.

<sup>32</sup> Dibujo cedido amablemente para su uso por Jordi Pereyra Marí, autor de *cienciadesofá*.

Dirección web:

<http://cienciadesofa.com/category/matematicas>

Albert E. Bosman bautiza a su creación como árbol Pitagórico en alusión al teorema de Pitágoras porque cada conjunto de tres cuadrados que se repiten encierran un triángulo rectángulo en el que se aplica el famoso teorema de Pitágoras.

Teorema de Pitágoras que al igual que el árbol que lleva su nombre, no fue creado por Pitágoras, este teorema era conocido en China, Mesopotamia y Egipto mucho antes de que naciera Pitágoras.

En la figura 73 vemos el procedimiento de creación, y en la fig. 74 el árbol de Pitágoras.

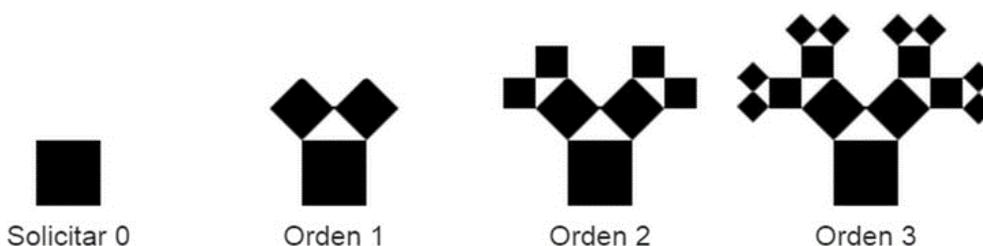


fig. 73 Creación del Árbol de Pitágoras

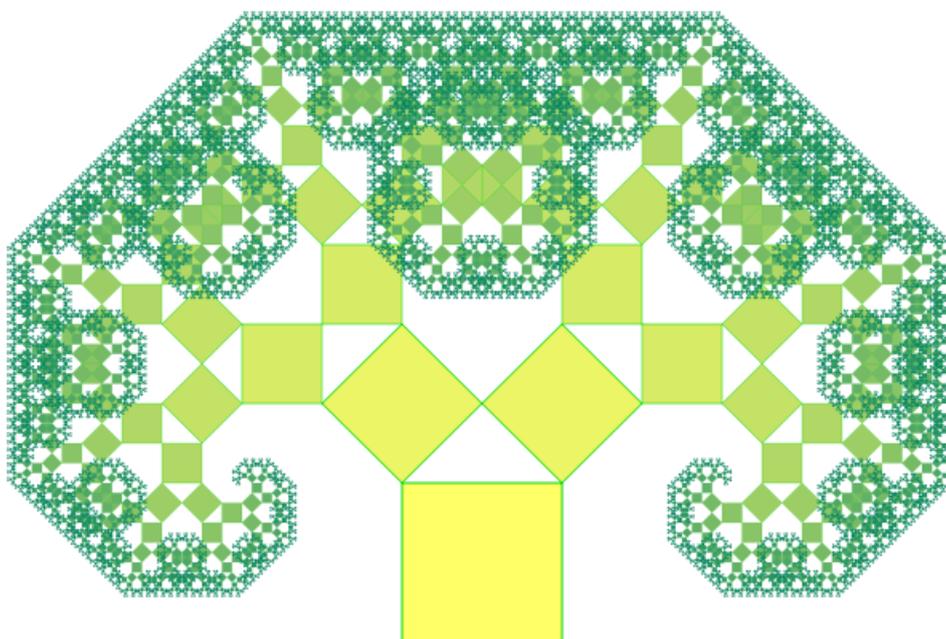


fig. 74 Árbol de Pitágoras

Estos cuatro ejemplos muestran el concepto de fractal partiendo de un motivo sencillo, repitiendo la misma operación sucesivamente se llega a figuras sorprendentes.

Utilizando las mismas palabras de Mandelbrot:

*“La autosimilitud lejos de ser una propiedad tibia y poco interesante, es un poderoso medio para generar formas “*

*Mandelbrot 1977*

Con este procedimiento y utilizando la computadora que puede realizar millones de operaciones en poco tiempo, se pueden llegar a crear fractales en 3D.

Existen programas con los cuales el lector puede crear sus propios fractales y que fueron utilizados en la realización de éstos que lo invito a visitar.

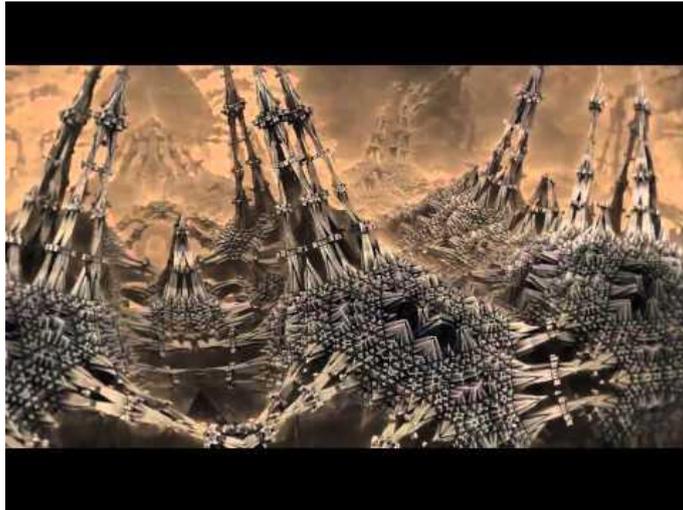
En el video 6 puede ver uno de los infinitos posibles universos fractales y lo presento con las palabras de su creador:

*“Universo Fractal v2 (Versión Corta) es una película 3D realizada íntegramente a partir del uso y combinación de fórmulas y algoritmos fractales. Más allá de la fascinación que ofrece la geometría fractal, la obra plantea un discurso cinematográfico que narra a través de paisajes abstractos, oníricos y surrealistas, un viaje por mundos ancestrales, la creación del universo y la vida, y el proceso de destrucción al que luego es sometida la naturaleza con la modernidad y el desarrollo. Finalmente a modo fractal, el universo, la tierra y la vida mutan de diferentes formas para sobrevivir.*

*Es una construcción permanente, un viaje por distintas dimensiones, por momentos figurativas y otras veces abstractas.*

*La geometría fractal en 3D se visualiza en el mundo actual con gran atención por su posibilidad de recrear la naturaleza con un nivel de detalle y complejidad asombroso a través de un simple código.”*

*Lisandro Sabio 2013*



Video 5 UNIVERSO FRACTAL de Lisandro Sabio año 2013<sup>33</sup>

Si el lector aún tiene deseos de husmear en los universos fractales lo invito a visitar este otro universo (video 6), una animación fractal hecha con el programa para la creación de fractales Mandelbulb 3D. Este trabajo originalmente fue diseñado por Bryan Álvarez de la Universidad de Berkeley para ilustrar su sueño inicial acerca de la belleza de los sistemas vivos. Ésta es una versión mejorada.



Video 6 Como en un Sueño Viaje 3D Fractal<sup>34</sup>

---

<sup>33</sup> El lector puede ver este video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=uMGvWr47-B8>

<sup>34</sup> El lector puede ver este video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=S530Vwa33G0>



## QUÍMICA

La química se utiliza para penetrar en la materia queriendo saber su composición, estructura, y comprender su comportamiento, por esta razón es fundamental en las artes plásticas donde el artista necesita dominar la materia para poder trabajar con ella: para obtener una fotografía impresa sobre papel casi todos los procesos que se llevan a cabo son químicos, desde el papel fotográfico hasta que se cuelga para secar.

A pesar de ser la ciencia que hace posible muchos procesos artísticos, y de que abundan los puntos de contacto entre química y artes plásticas, solo enumeramos unos pocos temas a modo de ejemplo. No nos detendremos en ellos pues de acuerdo al objetivo de este trabajo: un aporte a alumnos de bachillerato artístico; he teniendo en cuenta que la asignatura química no pertenece al currículo.

Ejemplos:

- 1) Química en la fotografía.
- 2) Preparación de pinturas y esmalte.
- 3) Cristales.
- 4) Técnicas de pintura.
- 5) Texturas con materiales no miscibles



## FÍSICA

El arte es básicamente comunicación y nos comunicamos fundamentalmente a través de dos sentidos: el oído y la vista.

El oído y la vista son transductores. Esto es, mecanismos que transforman un tipo de energía en otra, en el caso del oído y la vista lo que transforman en energía eléctrica es la energía de las ondas, el oído es activado por ondas mecánicas y la vista por ondas electromagnéticas.

El estudio de las ondas, tanto mecánicas como electromagnéticas, está dentro del campo de la física, por lo tanto la física está en el origen de las artes.

La música está compuesta por ondas mecánicas captadas por nuestro oído, y percibimos las artes plásticas a través de otro de nuestros transductores que es la vista.

En este trabajo nos vamos a referir a la relación entre física y artes plásticas puesto que la relación entre física y música ya está trabajada en múltiples y excelentes publicaciones accesibles a alumnos y docentes de bachillerato artístico.

Tal es la relación entre física y artes plásticas, que existen muchos libros de arte, cuyas páginas sacadas de contexto se pueden confundir con las de un libro de física.

Maestros de la pintura como Leonardo da Vinci han escrito acerca de temas como la luz, sombra y reflexión que están dentro del campo de la física; más específicamente dentro de la rama de la física que se llama óptica y que estudia las leyes y los fenómenos relativos a la luz.

El conocimiento de la óptica es muy útil para los pintores e indispensable para los fotógrafos, es sabido que algunos artistas plásticos han usado instrumentos ópticos para su quehacer, algunos de estos objetos se conservan en los museos junto a las obras del artista, es el caso de la cámara oscura utilizada por Canaletto que se exhibe en el Museo Correr de Venecia ( fig. 75).



*fig. 75 Cámara oscura utilizada por el pintor Canaletto*

En la actualidad los artistas siguen continuamente valiéndose de conceptos físicos para expresarse a través de sus obras, en bienales y museos del mundo vemos la física aplicada en una gran variedad de obras. Observemos dos ejemplos recientemente expuestos:

➔ Primer ejemplo:

Kendell Geers es un artista Sudafricano que vive y trabaja en Bruselas y es conocido por el uso de una gran variedad de materiales. La instalación que estaba expuesta en el 2015, en el Museo de arte de la Habana, lleva como título *Hanging Piece* (Piezas colgantes) y fue realizada en 1993, me llamó la atención como el artista utiliza péndulos realizados con cuerda y ladrillos en una obra interactiva donde el largo de la piola determina el período de cada uno de los múltiples péndulos que oscilan cuando pasa un espectador a su través.



Video 7 • Kendell Geers - Piezas colgantes<sup>35</sup>

El período de cada péndulo está en relación con el largo de la cuerda mediante la ecuación:

$$T=2 \pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

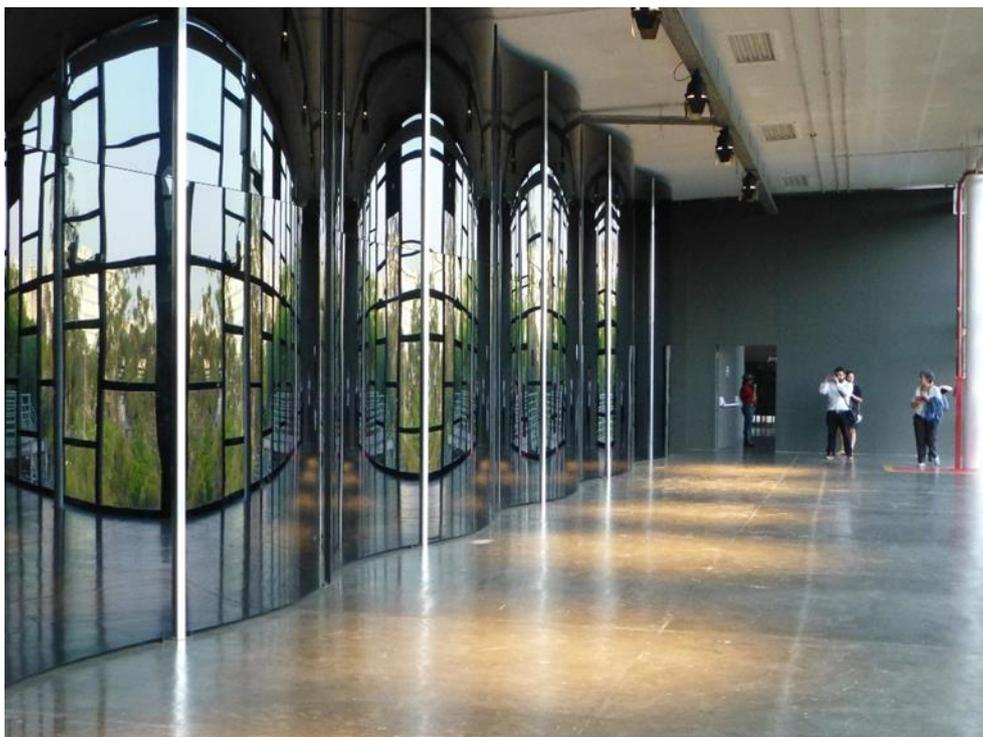
Donde T es el período del péndulo, L es la longitud de la piola y g la aceleración gravitatoria. El período T es directamente proporcional a  $\sqrt{L}$  por lo que cuanto más larga es la cuerda, mayor es el período del péndulo. Podemos ver esta instalación en el video 7.

➔ Segundo ejemplo:

Otro ejemplo reciente es una obra expuesta en la Bienal de Arte de San Pablo en el año 2014 en la que al aplicación de la física es evidente, esta obra ocupaba un enorme espacio frente a un gran ventanal para potenciar los efectos visuales de la reflexión, consiste en una pared cubierta de espejos curvos formando una superficie ondulante que interactúa con el espectador devolviéndole una imagen cambiante a medida que el observador se mueve. En la Fig. 76 vemos la fotografía de la obra donde podemos estimar sus dimensiones al compararlas con la de los espectadores.

<sup>35</sup> El Lector puede ver este video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=fG2siL18zEg>

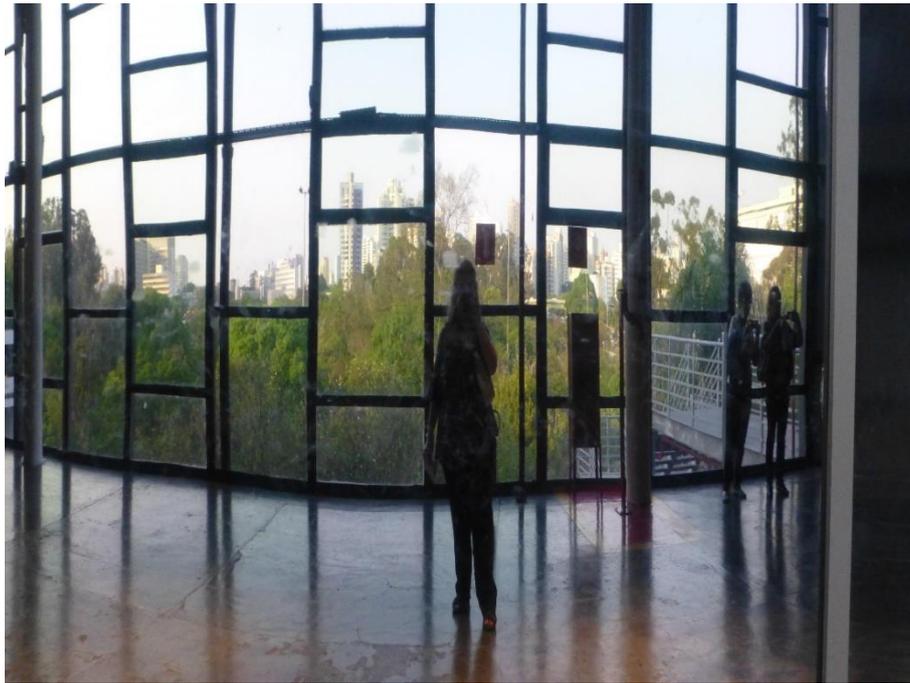


*fig. 76*

En la figura 77 y 78 podemos apreciar la modificación que sufre la imagen del espectador y del fondo a medida que el observador camina delante de la obra.



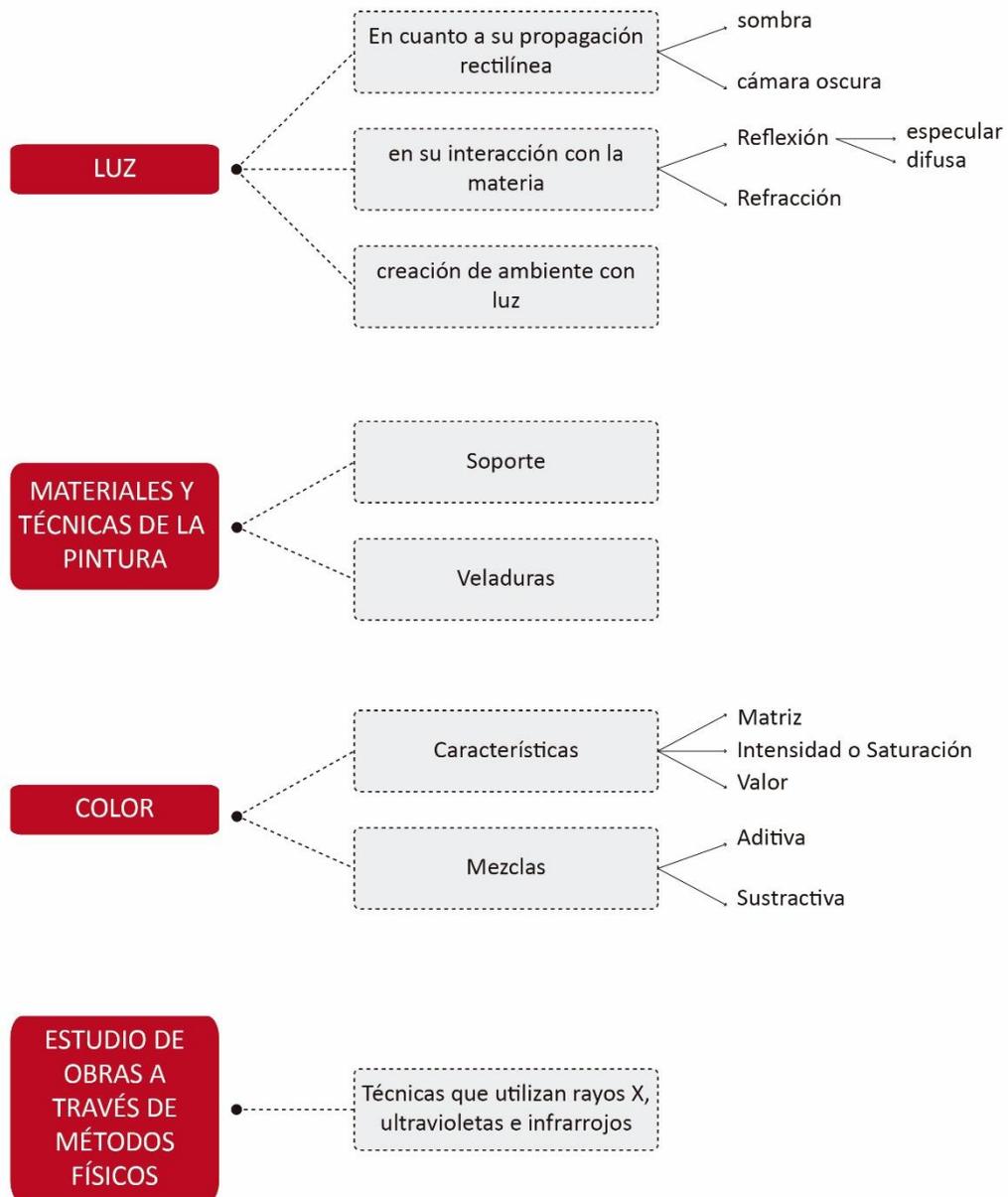
*fig. 77*



*fig. 78*

Los que vimos anteriormente son solo unos pocos ejemplos de los incontables que relacionan física y artes plásticas.

De las muchísimas zonas de contacto entre física y artes plásticas elegí para tratar cuatro: luz, materiales y técnicas de la pintura, Color y estudio de obras a través de métodos físicos. Dentro de cada tema seguiremos el esquema mostrado en el cuadro.



## LUZ

### CONSECUENCIAS DE SU PROPAGACIÓN RECTILÍNEA

La sombra y la cámara oscura, son pruebas de que la luz se propaga en línea recta cuando lo hace por un medio homogéneo, transparente y alejada de obstáculos u orificios del mismo orden de magnitud que su longitud de onda.

### SOMBRA

El uso de la sombra para la creación de obras plásticas está enlazado a una historia de amor que redacta Plinio el Viejo, nacido en el año 23 y cuya traducción es:

*“Ahora voy a tratar sobre el arte de modelar cosas de barro, o de plástica. Butades de Sicyon, ceramista de arcilla, fue el primero que lo inventó en Corinto, el arte de hacer retratos con arcilla y que hasta hoy es utilizado, sin embargo, es gracias a su hija: ella y el amor con un joven que partía a un lejano viaje, dibujó los contornos de las líneas, en la sombra de su rostro proyectado en una pared por la luz de una lámpara, el padre aplicó arcilla en las líneas, e hizo un modelo que luego puso al fuego con otras cosas de cerámica. Se ha informado de que estas primeras obras se guardaban en el ninfeo hasta la destrucción de Corinto por Mummius (XXXIV, 3) (año de Roma 608).”*

*Plinio el Viejo- Tratado de la pintura y el color- libro XXXV*



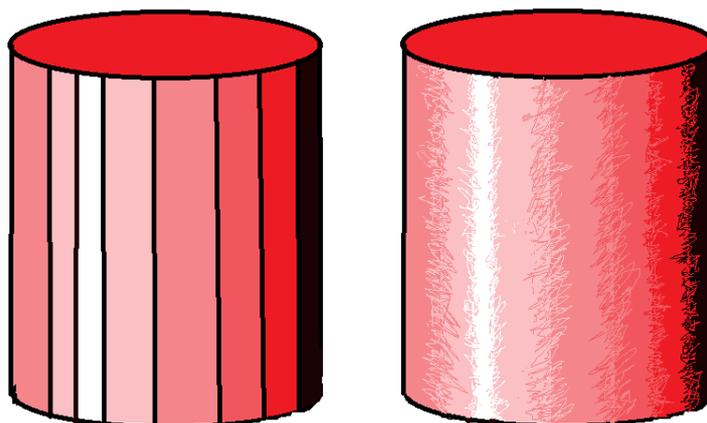
*fig. 79 LA DONCELLA CORINTIA,  
Joseph Wright 1782-1784*

Varios artistas plásticos han recreado esta historia de amor, una de las representaciones es la que vemos en la figura 79, lienzo donde se representa el mito de Butades, pintada por el pintor inglés Joseph Wright en el siglo XVIII.

En el renacimiento, Cennino Cennini se basaba en las sombras para modelar las formas de las figuras, el método consistía en:

- ➔ *Colocar en tres recipientes la misma cantidad del mismo pigmento.*
- ➔ *Mezclar el pigmento de cada uno de estos recipientes con distintas cantidades de blanco.*
- ➔ *Con los colores obtenidos, pintar zonas yuxtapuestas de valor creciente.*
- ➔ *Esfumar en el límite.*
- ➔ *Hacer las sombras más profundas con toques de negro y la luz con blanco.*

La figura siguiente es una interpretación de este método.



*fig. 80 Esquema del método de Cennino Cennini para modelar las formas con sombra*

A pesar de que éste es un método artificial para describir los efectos de la luz y la sombra en un cuadro, porque el color más saturado solamente se verá en la zona sombreada de un objeto, Cennino Cennini describe un método para modelar con luz y sombra dando la impresión de tridimensionalidad a figuras representadas en un plano.

Cennino Cennini atribuye una enorme importancia a la luz y la sombra y dice que el artista debe entenderla, saber acerca de la luz y la sombra porque de otra forma su obra carecería de valor, lo escribe en el capítulo IX de EL LIBRO DEL ARTE de esta manera:

*“si la luz predominara por una ventana que fuese mayor que las otras de aquel lugar, elige siempre la mejor, y entiéndela y síguela como es debido, según razón, pues, de faltar ello, tu trabajo no tendría ningún relieve, y saldría cosas simple y de poca maestría.”*

*Cennino Cennini*

También para Alberti la luz y la sombra son de fundamental importancia. Él explica que a través de ellas se hace evidente donde las superficies se transforman en cóncavas o convexas, las representa con la combinación de blanco o negro con un matiz, de esta forma consigue lo que el artista desea: que las cosas que pinta aparezcan con el máximo relieve.

Más adelante, Leonardo Da Vinci en su obra *TRATADO DE LA PINTURA*, dedica seis libros al tema de las luces y las sombras, lo ilustra con esquemas (semejantes a lo que podemos ver en un libro de física), muestra la trayectoria de los rayos y su propagación rectilínea para determinar las zonas iluminadas y las que están a la sombra, escribe acerca de cuerpos opacos y determina las zonas de sombra y penumbra a través del trazado de los rayos.

Leonardo da Vinci hace el estudio de las sombras producidas por fuentes de luz de diferentes tamaños y de las sombras producidas por varias fuentes.

Como él, hay muchos artistas que se han dedicado al estudio de la luz y las sombras, y han aportado su conocimiento a través de sus producciones escritas y su obra artística.

El tema sombras es fundamental para el artista que a través de ellas logra la ilusión de espacialidad en una superficie bidimensional, el relieve en una superficie lisa, modela o logra suspender un cuerpo en el aire contrariando las leyes de la gravitación.



*fig. 81 DÍPTICO DE LA ANUNCIACIÓN*  
Jan van Eyck  
Óleo sobre tabla 1433-1435

Veamos en algunos ejemplos concretos la importancia de las sombras para la creación de ambiente y efectos en la pintura.

Observemos en la figura 81 el díptico pintado al óleo de Jan van Eyck donde nos hace creer que el Arcángel Gabriel y la Virgen María son esculturas que sobresalen. Las sombras pintadas en las molduras, también pintadas, colaboran con esta ilusión.

También Caravaggio hace un manejo espectacular de la luz y la sombra. En la obra *LA VOCACIÓN DE SAN MATEO* (fig. 82), a través de la sombra nos indica que existe una ventana a la derecha y arriba, y que esa ventana está próxima al personaje que en el cuadro representa a Jesús.

Jesús es el que se encuentra a la derecha de todos, su cabeza es la más alta y está señalando a San Mateo.



*fig. 82 VOCACIÓN DE SAN MATEO*  
Caravaggio

¿Cómo nos damos cuenta de que existe otra ventana, que además está abierta, si ésta no está representada en el cuadro?

¿Cómo sabemos su precisa ubicación: arriba, a mayor altura que la altura de Jesús y a la derecha?

¿Cómo sabemos la distancia a la que se encuentra la ventana de Jesús y de la pared del fondo cuando dicha ventana no está representada en el cuadro?

Para entenderlo revisemos algunos conocimientos físicos acerca de la sombra:

En un medio homogéneo y transparente, cuando la luz no pasa por orificios muy pequeños, podemos decir que se propaga en línea recta y las sombras son una prueba de ello.

Las sombras se producen cuando se interpone un objeto opaco en la trayectoria de un haz de luz. A la sombra nítida la llamamos umbra y cuando se trata de una sombra parcial la llamamos penumbra, del latín “paene” que quiere decir “casi” y “umbra” que significa “sombra”.

La umbra se obtiene cuando el objeto que se interpone entre la fuente y la pantalla se encuentra próximo a la pantalla, a medida que alejamos el objeto de la pantalla va apareciendo la penumbra. Vemos un ejemplo de esto en la fig. 83 que es una fotografía de un termo apoyado en el piso.



*fig. 83 Umbra y penumbra*

Una fuente luminosa grande y alejada del objeto opaco que produce la sombra, al igual que una fuente pequeña y próxima, pueden producir una sombra nítida (umbra) sobre una pantalla próxima al objeto que la proyecta. En este caso una fuente grande como el sol, al estar muy alejada se comporta igual que una pequeña y próxima.

Una fuente de luz grande y próxima al objeto interpuesto produce una sombra difusa (penumbra)

Veamos un ejemplo de cómo un objeto opaco próximo a la pantalla produce una sombra nítida, mientras que si el objeto opaco está lejos de la pantalla, la umbra se convierte en penumbra.

La foto de la figura 84 es de un termo colocado en el piso, sobre la mancha de luz que proviene de una ventana que se encuentra aproximadamente a 2 m, de esta forma podemos ver la sombra que produce el termo sobre el piso a la vez que la del parante de la ventana que se encuentra aproximadamente a 2m de nuestra pantalla improvisada que en este caso es el piso.

Comparemos estas dos sombras.

La sombra del termo, que está mucho más próximo al piso que la ventana, se ve mucho más nítida que la de la ventana.

La parte inferior del termo, que está mucho más próxima al piso que la tapa, produce una sombra mucho más nítida que la de la tapa.

A medida que el objeto que produce la sombra se aleja de la pantalla (en este caso es el piso) la umbra se va convirtiendo en penumbra.

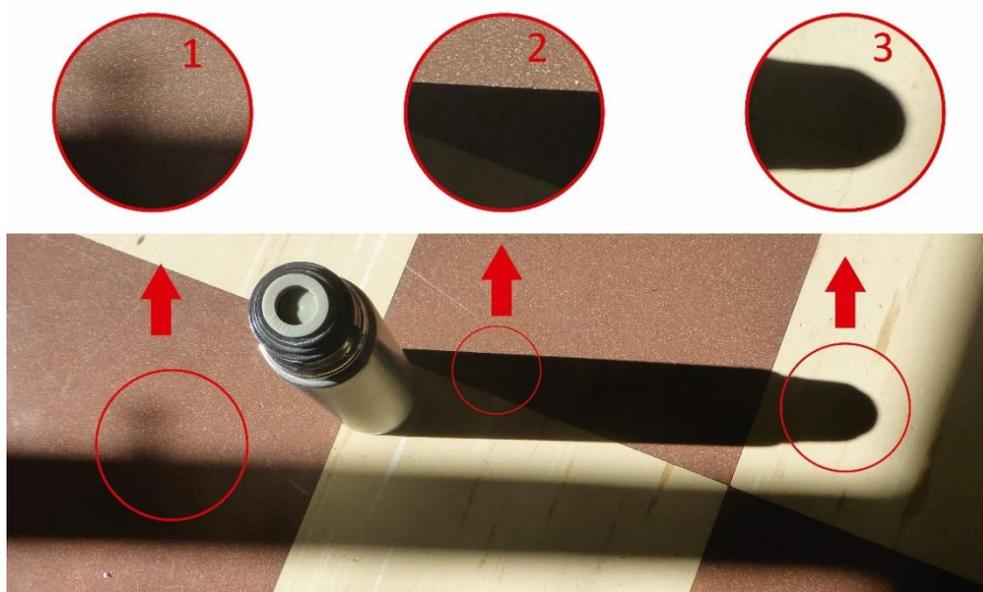


fig. 84 Ampliaciones de umbra y penumbra

En la fig. 84 he ampliado algunas zonas de la fotografía, que numeré con 1, 2 y 3 para comparar las sombras en ellas.

- **1)** La ampliación uno corresponde a la sombra proyectada por el parante de la ventana, donde aparece la sombra de un tirador. La ventana está mucho más lejos del piso que cualquier parte del termo, por lo que su sombra se desvanece y la vemos difuminada (penumbra).
- **2)** En la ampliación marcada con dos, la sombra es muy nítida; corresponde a la base del termo (que es la parte más próxima al piso). Aún ampliada sigue siendo nítida, a esto le podemos llamar umbra.
- **3)** La ampliación tres corresponde a la sombra de la tapa del termo, la tapa se encuentra más lejos del piso que la base y vemos su sombra más difuminada que la ampliación dos.

Apliquemos estos conocimientos al tema de la ventana, en la obra *LA VOCACIÓN DE SAN MATEO*.

Caravaggio nos hace percibir una ventana y sus características, sin representarla, solamente con el tratamiento de la sombra proyectada sobre una pared. Si nos fijamos en la obra, a la derecha y arriba, el artista pinta una sombra nítida (umbra) y con ello nos da la idea de que la ventana se encuentra muy próxima a la pared (que en este caso hace de pantalla). Esa sombra se va convirtiendo en penumbra, la difumina y con ello logra darnos la idea de que se va alejando, nos da la idea de espacialidad a través de la sombra.

En la fig. siguiente coloqué junto a la foto de la obra original de Caravaggio (a la izquierda) otra del mismo cuadro en el que cometí el sacrilegio de difuminar una parte de la sombra en la pared y la ventana del fondo.

Cambiando solo la sombra, la información que nos da la obra acerca del espacio donde se desarrolla la escena también varía: ahora la ventana por donde entra la luz no se encuentra próxima.



*fig. 86 LA VOCACIÓN DE SAN MATEO, Caravaggio*



*fig. 85 Intervención de LA VOCACIÓN DE SAN MATEO.*

Así como modifiqué la información acerca del entorno, cambiando una sombra, los artistas modifican su obra cambiando las sombras. Para aclararlo nos referiremos a dos obras del pintor francés Jean-Baptiste Chardin, que nació en París en 1699 donde reside durante toda su vida.

Chardín se destacó por sus naturalezas muertas y además tiene una serie de obras que representan ambientes interiores con niños absortos en alguna actividad, el artista pintó varias versiones de algunas de estas obras.

Dentro de esta serie se encuentra la titulada *EL JOVEN DIBUJANTE* (Fig. 87 y 88), realizada en óleo sobre tela en 1737 y de la cual existen al menos dos versiones; una se encuentra en el Museo del Louvre en París, la otra en el museo Gemäldegalerie de Berlín.

Comparemos estas obras. Supuestamente la que numeramos con “2” es la realizada en última instancia (la que se encuentra en el Museo Louvre). Pues bien, si miramos con atención veremos que en la segunda versión Chardin modifica las sombras y logra efectos diferentes.

Vale recordar que Chardín pintaba despacio, buscando la perfección, y por ello su producción artística es bastante escasa. Además, pintaba las mismas composiciones -o la misma imagen- dos o tres veces, pero detrás hay una verdadera evolución. Teniendo en cuenta esta característica del pintor, la segunda versión debería ser mejor que la primera, y lo que vemos al compararlas es, entre otros sutiles cambios, la modificación de las sombras: Chardín perfeccionó su obra modificando las sombras.

Colocaremos las dos obras juntas para observar las diferencias y trataremos de ubicar las sombras que fueron modificadas. Después, ampliaremos algunas zonas para observarlo más detalladamente.

Invito al Lector a comparar las sombras en las siguientes zonas de las figuras 89 y 90:

- ➔ ***Botón en el sombrero***
- ➔ ***Sombra del sombrero en la frente***
- ➔ ***Sombra debajo de las cejas***
- ➔ ***Cuello***
- ➔ ***sombra que proyecta el lazo rojo en la parte inferior de la mesa***

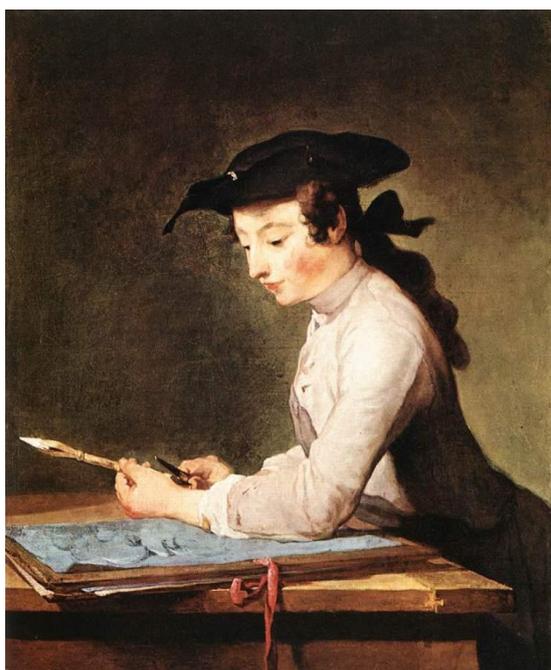


fig. 87 *EL JOVEN DIBUJANTE 1*



fig. 88 *EL JOVEN DIBUJANTE 2*

¿Advierte el Lector algún efecto en la pintura, creado por la modificación de las sombras?



*fig. 89 El Joven Dibujante*

Comparemos cada una de las zonas citadas, para ello he seleccionado dichas partes de las obras con el fin de aislarlas del resto del cuadro.

En las figuras 91 y 92 comparamos entre las dos versiones, las sombras proyectadas por: el botón en el sombrero, el sombrero en la frente y la sombra debajo de las cejas.



fig. 90 *El Joven Dibujante 2*

### → **Botón en el sombrero**

En la versión que enumeramos con el número dos, la sombra está mucho más nítida, más contrastada con el sombrero por eso tenemos la sensación de mayor tridimensionalidad, el botón, se separa del sombrero a través de su sombra.

La sombra del pincho que se ve encima del botón colabora en la ilusión de profundidad, mientras que en la versión uno no se distingue.

Cabe aclarar que estamos comparando en lo que vemos, que son dos imágenes, seleccionadas de las figuras 89 y 90, que corresponden a fotografías de las obras de Chardín, no estamos mirando las obras

directamente ni las tenemos a mano, en estas imágenes las diferencias son evidentes, pero las fotografías de las obras suelen ser diferentes a las obras reales y cabe la probabilidad de que si vemos la versión uno directamente, el contraste entre sombrero y sombras sea mayor.



*fig. 91 Detalle versión 1*



*fig. 92 Detalle versión 2º*

### → **Sombra del sombrero en la frente**

Esta sombra también está trabajada de forma diferente, en la versión dos, la diferencia entre umbra y penumbra es más evidente y los bordes de la sombra están curvados, modelando la frente, dándole cierta redondez a través del contorno de la sombra.

**→ Sombra debajo de las cejas**

Las sombras debajo de ambas cejas en la versión dos le la profundidad a estas zonas modelando el rostro del joven.

La esclerótica (blanco del ojo) correspondiente al ojo que está representado a la derecha en el cuadro, en la versión dos, tiene una sombra que no vemos en la versión uno, esta sombra da un efecto de profundidad con respecto al párpado.

Debajo del ojo, la sombra también se ve más trabajada en la versión dos, Chardín pinta una estrecha línea de luz que marca el borde del párpado inferior como una superficie más alta seguida hacia abajo de sombra, con lo que logra modelar esa parte del rostro. En la foto que tenemos de la versión uno, esta diferencia no existe y el ojo se ve con menor relieve, más plano que en la foto de la versión dos.



*fig. 93 Detalle de la versión 1*



*fig. 94 Detalle de la versión 2*

**→ Cuello**

*Observando las figuras 93 y 94 veamos la diferencia en el cuello del muchacho.*

*La piel que está próxima al cuello de la camisa en la versión dos está separada del cuello de la camisa por una sombra más profunda, esfumada y curva que da redondez a la cara del joven, también la sombra que proyecta la nariz es mayor en la segunda versión.*

**→ Sombra que proyecta el lazo rojo en la parte inferior de la mesa.**

En la segunda versión, la sombra del lazo está más difuminada, dando la sensación de que el travesaño está más alejado de la cinta que el borde de la mesa, Chardín crea distancia variando la nitidez de la sombra.

Modifica además la forma de esta sombra que en la versión uno era curva y en la dos pasa a ser más recta, este cambio también logra un efecto diferente, da la impresión de que la tabla de la versión dos fuese más plana o el lazo cayera más verticalmente.



*fig. 95 Detalle de la versión 1*



*fig. 96 Detalle de la versión 2*

También a través de la sombra podemos crear ambiente, como lo hace Vincent Van Gogh (1853-1890) en su obra titulada *CAMPESINA COSIENDO* que vemos en la fig.97.



*fig. 97 CAMPESINA COSIENDO*  
Vincent Van Gogh

Esta obra fue pintada en febrero de 1885, con óleo sobre tela, Van Gogh crea una escena íntima, alumbrada con una vela o farol pequeño, sin representar la fuente de luz, sólo pintando las sombras adecuadamente. Se vale de la sombra proyectada por la campesina en la pared del fondo para darnos la pista de cómo se ilumina la escena, podemos imaginar la vela o pequeña fuente y hasta queda clara su posición en el espacio aunque no la veamos representada en el cuadro.

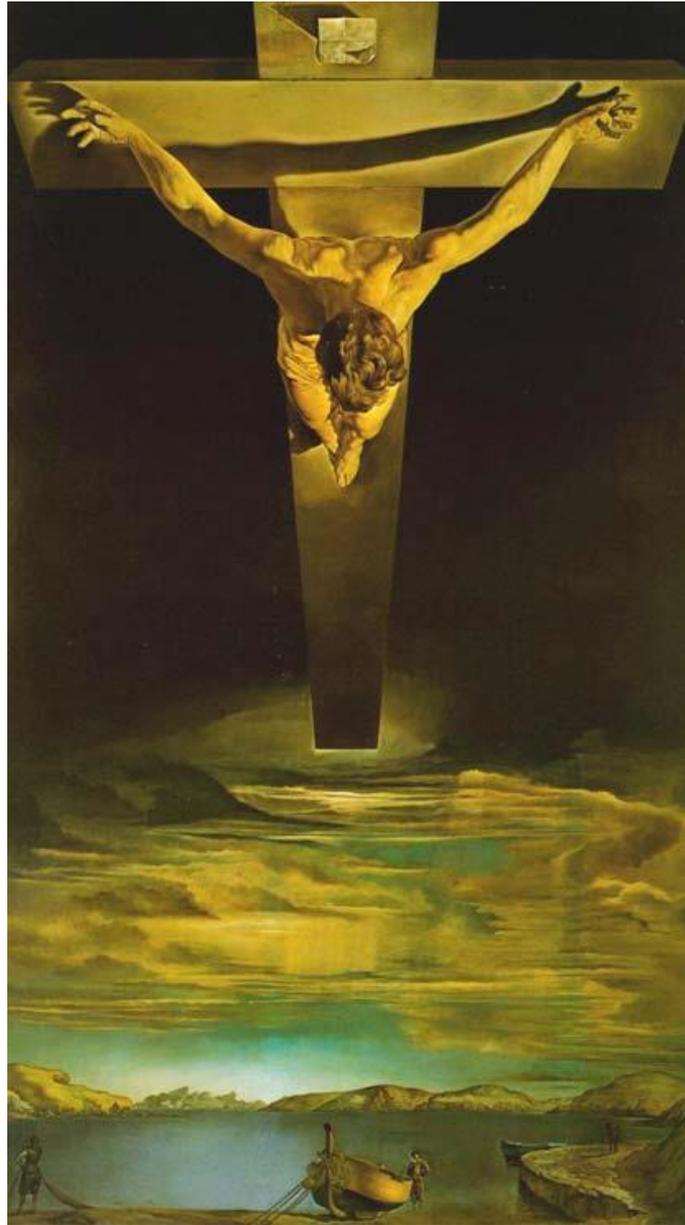
Dejemos correr las hojas del almanaque y veamos algunos ejemplos del manejo de las sombra por artistas más recientes, analicemos los efectos de las sombras en algunas obras del pintor español Salvador Dalí (1904- 1989).

Examinaremos los efectos logrados con las sombras en las obras:

- ➔ *El Cristo De San Juan De La Cruz*
- ➔ *La Madonna De Port Lligat*
- ➔ *Autorretrato Blando Con Bacón Frito*

#### EL CRISTO DE SAN JUAN DE LA CRUZ

Comencemos por la obra EL CRISTO DE SAN JUAN DE LA CRUZ que fue pintada en 1951 con óleo sobre soporte de tela y mide 205 cm por 116 cm, Fig.98.



*fig. 98 EL CRISTO DE SAN JUAN DE LA CRUZ,  
Salvador Dalí*

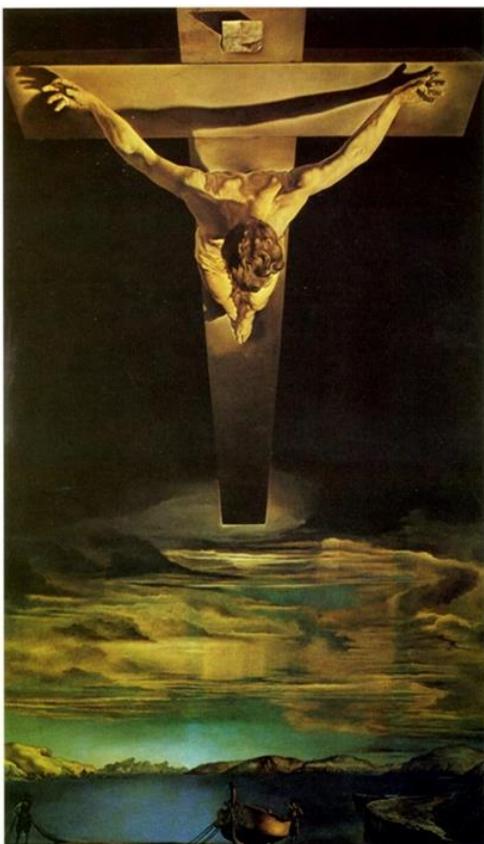
Observemos la sombra en el travesaño de la Cruz, de la mano que está a la derecha en el cuadro está muy próxima a la madera del travesaño por lo que su sombra es nítida, si seguimos esa sombra hasta llegar a la proyectada por el hombro, se va convirtiendo cada vez más en penumbra, de esta forma, interpretamos que el hombro está mucho más lejos del travesaño que la mano, este tratamiento de la sombra colabora con la impresión de que el hombro y la cabeza de Jesús están hacia adelante, otra vez la sombra colabora en la ilusión de tridimensionalidad.



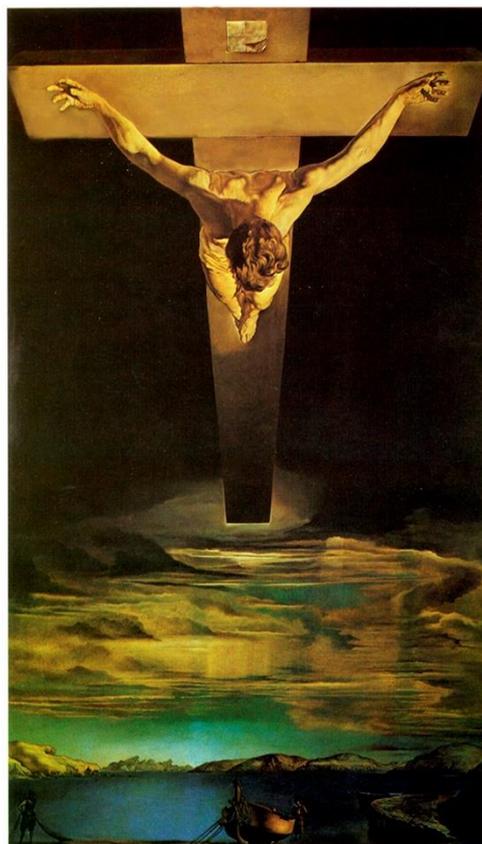
*fig. 99 Detalle de EL CRISTO DE SAN JUAN DE LA CRUZ  
Salvador Dalí*

En la figura 99 podemos ver el detalle del travesaño con la sombra y en la 101 he eliminado la sombra proyectada sobre la cruz pero se mantiene la proyectada sobre el mismo cuerpo de Jesús, he colocado la foto junto a la de la obra sin intervenir para que el lector pueda ver con facilidad el efecto que produce la sombra, cómo a través de ella el artista “despega” el cuerpo de la cruz, lo aleja, a la vez que pega las manos al travesaño.

Sin las sombras, las manos se ven alejadas de la cruz, como si el Cristo flotara.



*fig. 100*



*fig. 101*

El que podamos dar la ilusión de que estamos alejando o acercando un objeto a una pantalla, manejando su sombra, sucede porque nuestro cerebro calcula la distancia a través de las sombras, veamos un ejemplo en la selección del video Juegos Mentales, “Ver para creer” de la National Geographic que muestra como el cerebro interpreta la sombra. (Video 8)



Video 8<sup>36</sup>

### LA MADONNA DE PORT LLIGAT

La segunda obra que elegimos de Salvador Dalí para analizar el uso de la sombra es una de las versiones de la obra LA MADONNA DE PORT LLIGAT, creada en 1950 en óleo sobre lienzo y que vemos en la figura 102. Sus dimensiones son 275,3cm x 209,8cm, se conserva actualmente en el Museo de arte Fukuoka de Japón, es de estilo surrealista y la Virgen está representada por la esposa del artista, llamada Gala.

Apliquemos lo visto en el video anterior a esta obra: vimos que a medida que la sombra se separa del objeto, el cerebro interpreta: el objeto se va separando de la pantalla. Es por eso, que si alejo y acerco la sombra del objeto, nos da la impresión de que el objeto, en este caso la pelota, está saltando.

Haciendo uso de este conocimiento, Dalí, en el fondo de cuadro y solo mediante el uso adecuado de la sombra, hace flotar sobre el mar dos moles de piedra y a Gala, reproducida varias veces y vestida de novia

---

<sup>36</sup> El lector puede ver este video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=-kmtuLZaR7A>

Al pintar las sombras un poco separada de la superficie, Dalí le da levedad a sus Galas vestidas de novia haciéndolas flotar, incluso a través de su sombra podemos calcular a qué distancia se encuentran de la superficie del mar: están flotando próximos a la superficie puesto que la sombra está próxima al objeto que la proyecta.



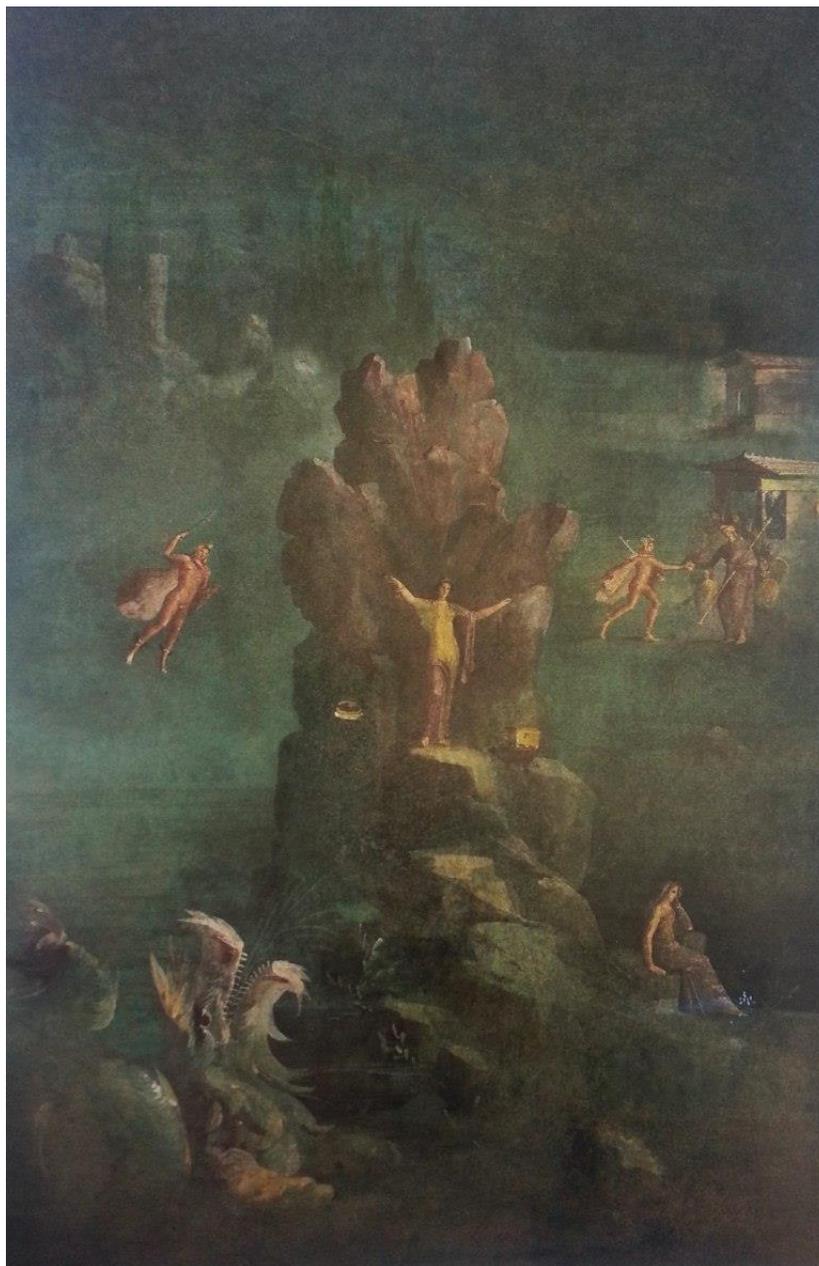
*fig. 102 LA MADONNA DE PORT LLIGAT*



fig. 103 Detalle de la obra: LA MADONNA DE PORT LLIGAT  
Salvador Dalí

En la figura 103 vemos un detalle de la misma obra, LA MADONNA DE PORT LLIGAT, donde Dalí utiliza el mismo recurso de la sombra proyectada para hacer flotar al niño Jesús y al trozo de pan que se encuentra en la cavidad del cuerpo de Jesús.

Si observamos, podemos ver la reiteración de este efecto de levedad a través de la sombra en varias zonas del cuadro, este recurso no es nuevo, se usa desde hace más de 2000 años. En la obra Perseo y Andrómeda, un fresco, pintado entre el año 10 y 1 a. C. se diferencia a Perseo volando del que está apoyado en la tierra, a través de la sombra fig. 104 a 106.



*fig. 104 Perseo y Andr6meda  
fresco, a1o 10 y 1 a. C*

Esta obra representa el mito de Perseo que llega volando, calzado con sandalias aladas, a la izquierda en la obra, para rescatar a Andr6meda que est1 encadenada a la roca. Este artista del cual no sabemos el nombre, nos hace ver a Perseo volando porque no representa su sombra proyectada Fig. 105.



*fig. 105 Detalle de Perseo y Andrómeda,  
fresco, año 10 y 1 a. C*

A la derecha en la obra, en el cuadrante superior, Perseo, tras salvar a la princesa, se reúne con el padre de la joven, en este caso el artista representa la sombra de los dos personajes creando la ilusión de que están apoyados en el piso Fig. 106.



*fig. 106 Detalle de Perseo y Andrómeda  
fresco, año 10 y 1 a. C*

### AUTORRETRATO BLANDO CON BACÓN FRITO

También podemos modelar a través de las sombras, para ejemplificarlo veamos el cuadro de Dalí que elegimos como tercera obra para analizar los efectos de las sombras: AUTORRETRATO BLANDO CON BACÓN FRITO.

Esta obra, que vemos en la figura 107, fue realizada en 1941 utilizando óleo sobre tela, mide 61cm por 51cm y se encuentra en la fundación Gala-Salvador Dalí en Figueras, España.

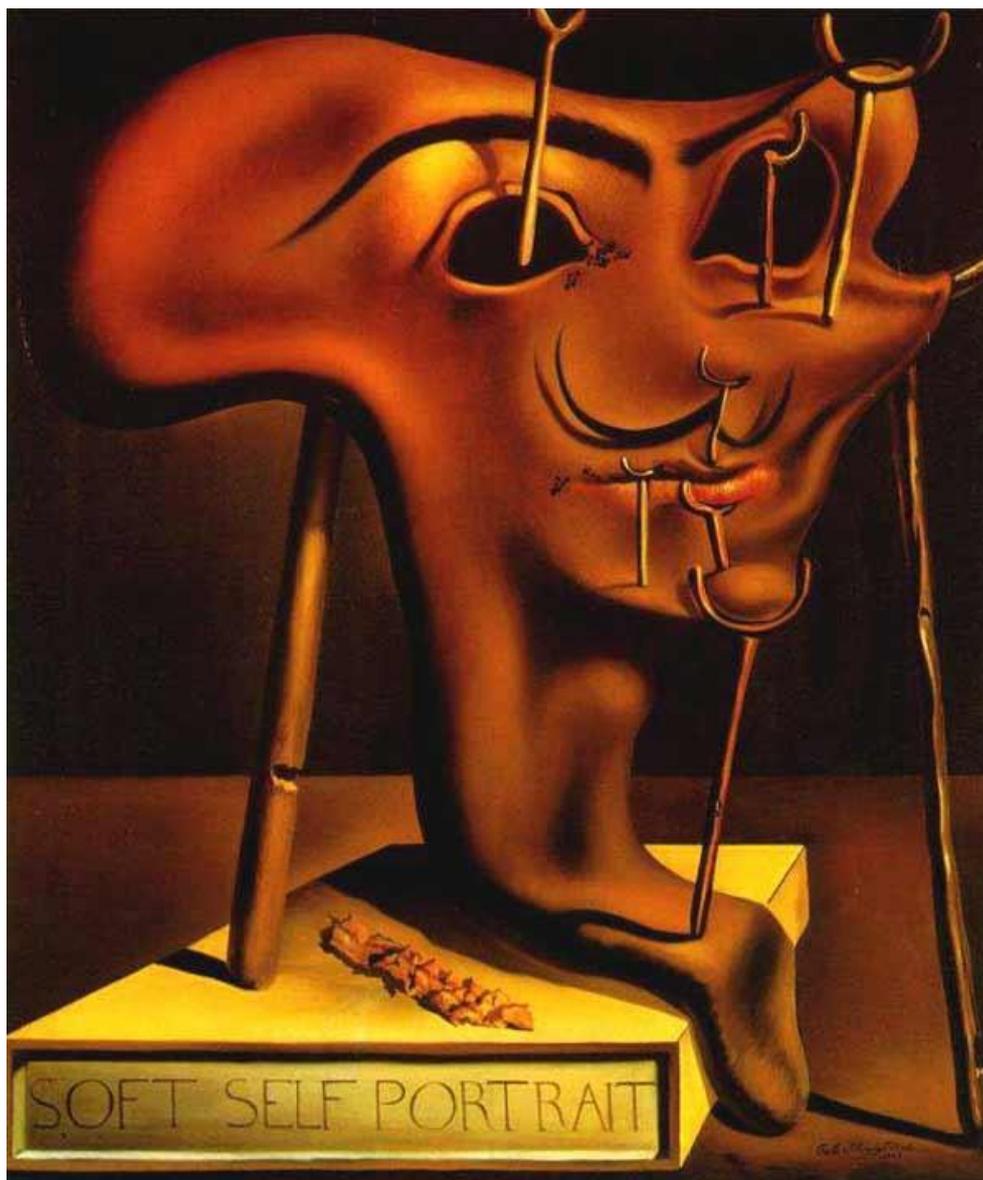


fig. 107 AUTORRETRATO BLANDO CON BACÓN FRITO

En esta obra Dalí modela la figura utilizando sombra, para facilitar el análisis, intervine la obra seleccionando y numerando las zonas a las que nos vamos a referir.

Esta intervención se muestra en la figura 108, nos referiremos brevemente a cada una de las zonas marcadas de acuerdo al número correspondiente:

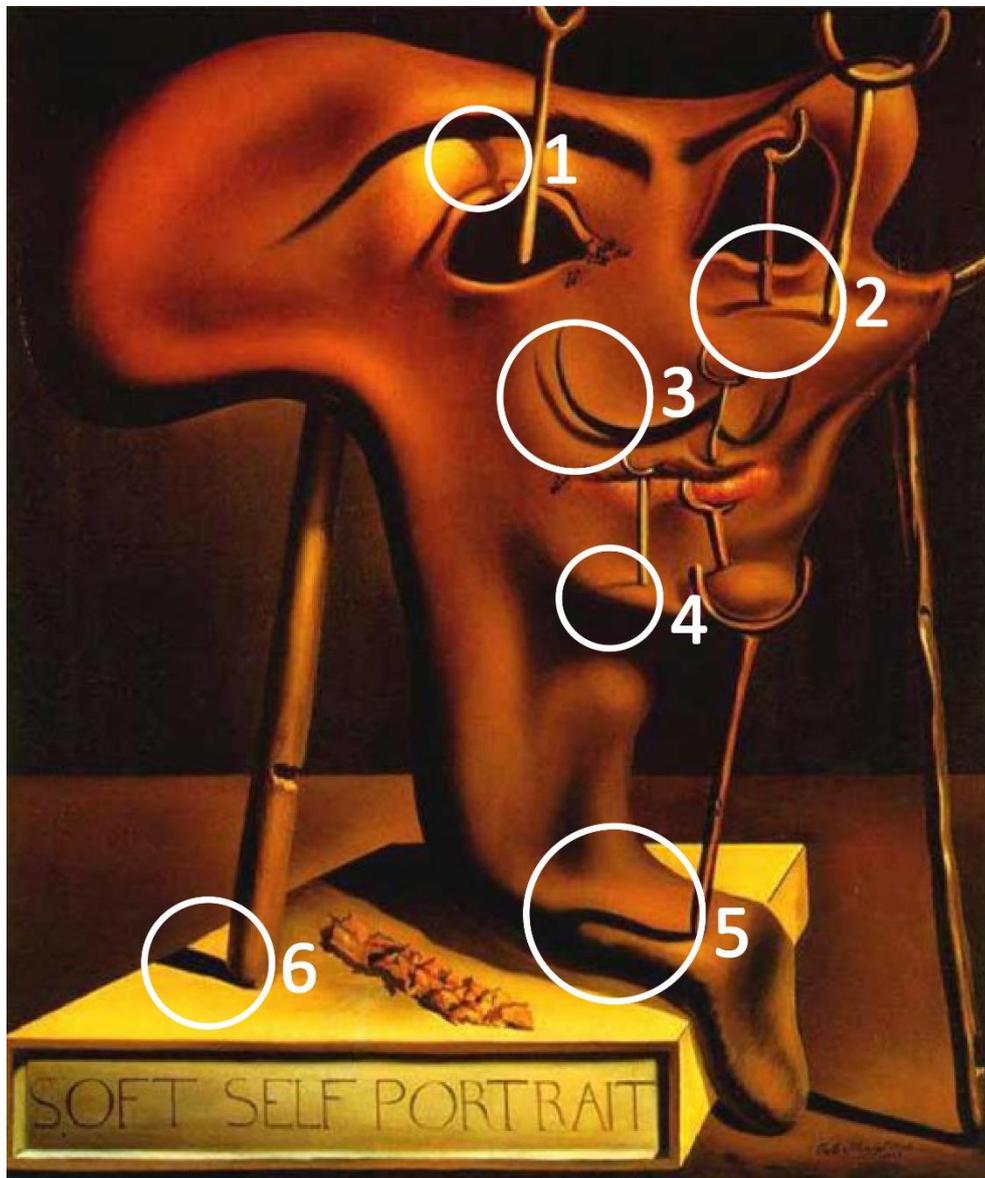


fig. 108 Intervención de la obra  
AUTORRETRATO BLANDO CON BACÓN FRITO

➔ **ZONA 1**

En la zona marcada con el número uno vemos la sombra que proyecta la muleta sobre el párpado, es esa sombra curva la que nos hace ver al párpado convexo, si la sombra hubiese sido recta veríamos al párpado plano. Dalí pinta dos sombras curvas de radio diferente con lo que nos da la sensación de dos superficies convexas de distinto radio de curvatura.

**→ ZONA 2**

Con la sombra de estas dos muletas, Dalí levanta la mejilla dándole curvatura y tridimensionalidad. Además, separa la muleta de la abertura que representa el ojo. En la figura 109 vemos un detalle de estas sombras donde podemos apreciar cómo modela la nariz con un cambio de dirección de una sombra, a la vez, aleja la muleta de la nariz difuminándola en la zona que quiere veamos alejada.



*fig. 109*

**→ ZONA 3**

Pintando esta sombra Dalí despega el bigote de la superficie de la cara y nos hace ver la punta del bigote más separada que la base, también se vale de la modificación del color de la sombra, que se aclara a medida que se aleja del objeto que la proyecta.

**→ ZONA 4**

En esta zona, colocando una pequeña sombra horizontal, perpendicular a la muleta y apenas curvada, nos da la impresión de que la mandíbula viene hacia adelante y se curva a la izquierda.

**→ ZONA 5**

La sombra ondulante nos hace ver un cambio en la curvatura de la superficie, de cóncavo a convexo partiendo de la base de la muleta. Esa sombra se ensancha a

medida que se aleja de dicha base como si una fuente de luz que ilumina la escena fuese pequeña.

#### → ZONA 6

Al pintar rectos los bordes de esta sombra Dalí nos hace ver plana la superficie en la cual se proyecta, concuerda con la sombra número cinco en cuanto a que se ensancha a medida que se aleja de la base, y es nítida como si fuera producida por una fuente de luz pequeña y próxima.

#### LA SOMBRA EN EL ARTE ACTUAL

Dejemos correr nuevamente las hojas del almanaque y veamos cómo en la actualidad los artistas se valen de la sombra para expresarse, analicemos tres ejemplos donde el protagonista es la sombra, uno de ellos expuesto en la bienal de arte de San Pablo del año 2014, otro en el Museo de Arte Universal de La Habana, Cuba, en marzo del 2015 y el tercero corresponde a esculturas que se expusieron en Londres durante octubre y noviembre del año 2012

#### Obra expuesta en la bienal de arte de San Pablo del año 2014

Numerada con el 26 en la 36ª Bienal de San Pablo y titulada como “LANZA Y OTROS TRABAJOS” se encontraban obras del artista polaco Edward Krasinski (1925-2004). Se dedicó una sala exclusivamente a sus obras.



fig. 111

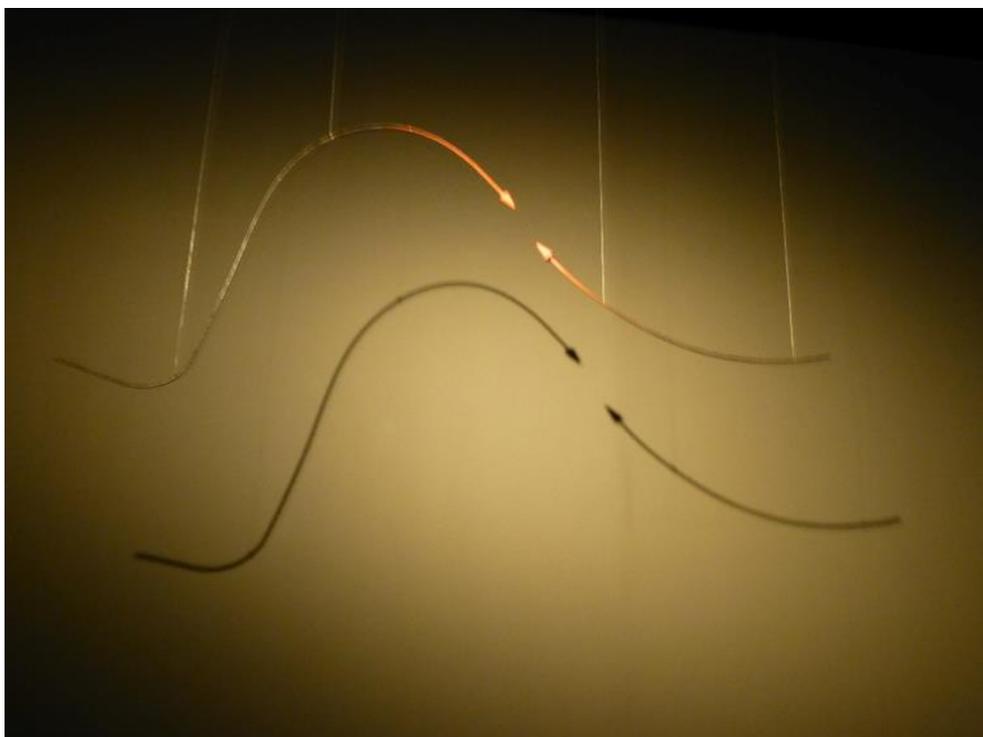


fig. 110

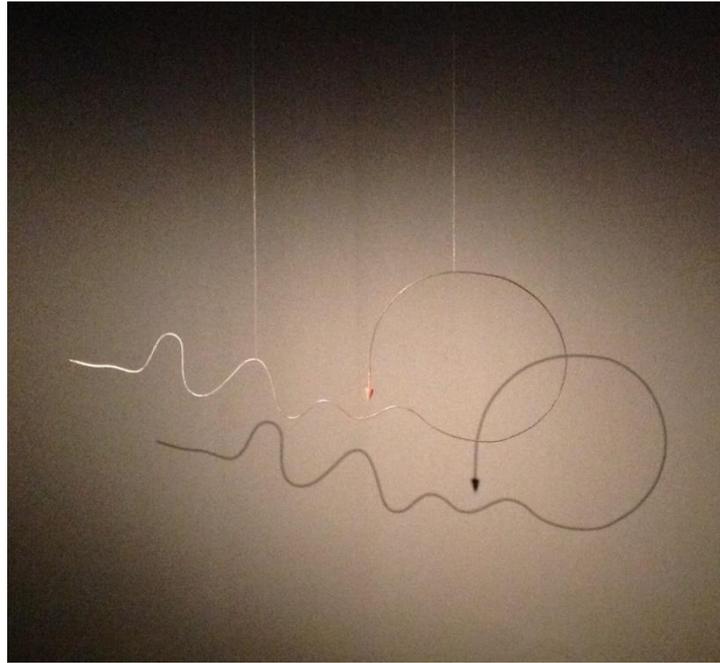
Al entrar a la sala se percibían las paredes oscuras, había muy poca luz, sólo la necesaria para iluminar las esculturas que en su mayoría pendían del techo, el espectáculo estaba creado por la sutileza de las piezas, las luces y sombras.

El montaje de las luces es fundamental para que podamos disfrutar de estas obras ya que las sombras toman un papel protagónico, fundamental, son parte de las obras, crean ritmos en la pared que repiten las sutiles esculturas de Edward Krasinski. A medida que el espectador se mueve, el conjunto obra-sombra se modifica creando una interrelación entre la obra y el espectador.

En la figura 110 y 111 observamos una de estas esculturas desde distintos puntos de vista y cómo influye la sombra en la percepción de la obra a medida que el espectador cambia de posición.



*fig. 112*



*fig. 113*

En las figuras 112 y 113 vemos como la sombra crea ritmos y repite en la pared la forma de las esculturas.

En estos dos casos la forma de la obra se aprecia mejor en su sombra sobre la pared que en la propia obra, porque la sombra ofrece un mayor contraste de valor con el fondo.

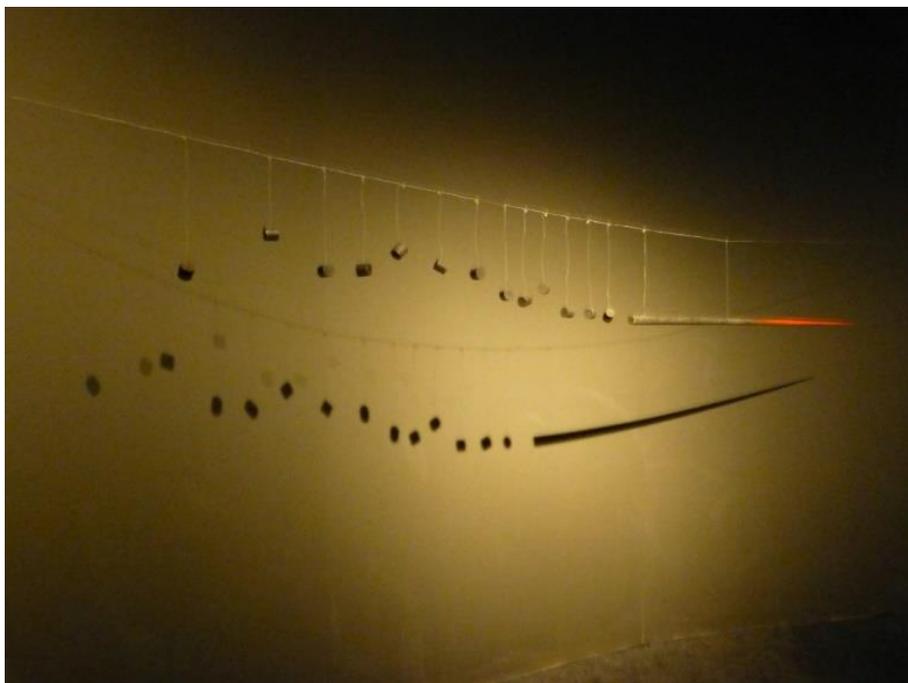


*fig. 114 escultura de Edward Krasinski*



*fig. 115 escultura de Edward Krasinski*

En las figuras 114 y 115 podemos apreciar la misma obra desde diferentes puntos de vista, iluminada por un único foco que hace que la sombra se proyecte en el piso y en la pared. Creando una variación de dirección, al cambiar de superficie, da la impresión de que las sombras “trepan” por la pared.



*fig. 116 Lanza, (1963-1964). Edward Krasinski*

En la figura 116 vemos la obra **LANZA**, que da nombre a la exposición, en este caso se utilizan dos fuentes de luz, una próxima y otra alejada para multiplicar los ritmos que aportan las sombras, cada forma se ve repetida tres veces: el objeto, una sombra nítida y otra muy tenue, casi imperceptible, que se pierde en la zona más iluminada.

En la figura 117 podemos ver al artista Edward Krasinski, experimentando en la creación de esta obra.



fig. 117 Edward Krasinski

#### Obra expuesta en Cuba en marzo del 2015

La otra obra que consideraremos es la que vemos en un acercamiento desde la fig. 118 a 120, en ella el artista se comunica con el espectador literalmente a través de la sombra, estaba expuesta en Museo de Arte Universal de La Habana, Cuba, en marzo del 2015.

Se trata de tres tubos cilíndricos de cemento, donde el artista logra escribir su mensaje a través de sombras proyectadas por alambres, adecuadamente doblados, que se interponen a la luz emitida por un pequeño foco convenientemente ubicado.

Los alambres están en un plano prácticamente perpendicular a la sombra y el foco de luz en el piso. La forma de los alambres, como se ve en la foto de la figura 120, no coincide con la forma de las palabras creadas por sus sombras. El artista dobló de tal forma estos alambres que por sí solos no dicen nada, solo comparten su mensaje a través de su sombra cuando son convenientemente iluminados.



fig. 118

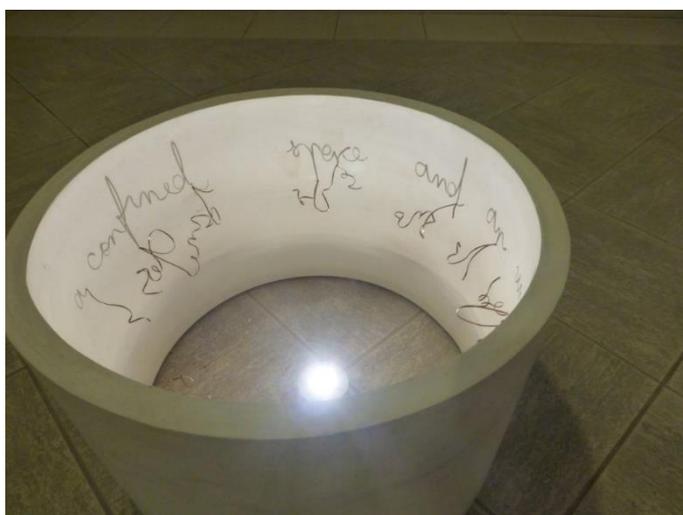


fig. 119

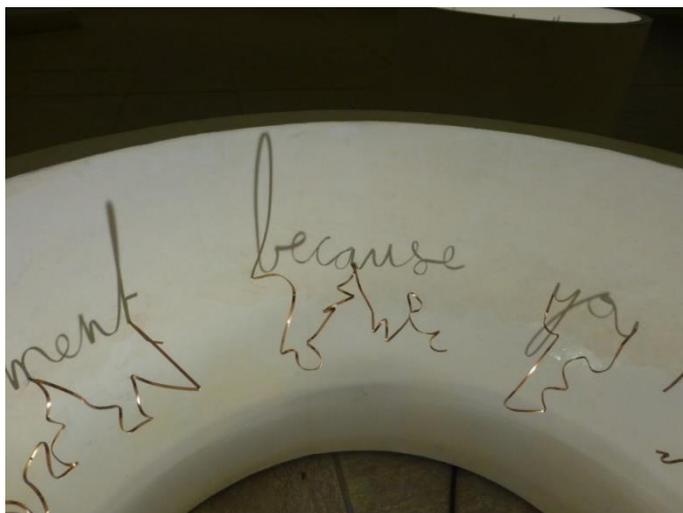


fig. 120

Londres octubre-noviembre 2012

Otro ejemplo de artistas que actualmente se dedican a realizar arte con sombras es el de [Tim Noble y Sue Webster](#)<sup>37</sup>, que han creado una manera muy ingeniosa de hacer arte juntando objetos e iluminándolos con una fuente de luz, de manera que proyecten una sombra sobre una pantalla que por lo general es la pared. En las figuras 121 y 122 vemos a la vez la escultura y su sombra. La sombra en este caso es parte fundamental de la obra y la escultura está en función de su sombra.



*fig. 121 Escultura de Tim Noble y Sue Webster*

Las sombras son semejantes a la producida por una persona u objeto conocido pero no coincide con el objeto opaco que nos imaginamos la produce. Estas esculturas se expusieron en Londres en el 2012.

---

<sup>37</sup> El lector puede obtener información acerca de estos artistas y ver otras de sus obras en:

<http://totalcreativo.com/esculturas-con-sombras>



*fig. 122 Escultura de Tim Noble y Sue Webster*

### *La sombra en otras artes*

Éstos ejemplos son una pequeña muestra de cómo el conocimiento de las sombras fue y es fundamental para el artista como herramienta expresiva.

Nos hemos referido a la pintura y tomamos algún ejemplo de escultura porque es el arte de las luces y sombras, pero en fotografía, cine, teatro, e incluso en literatura la sombra tiene un valor fundamental, no en vano Platón la utiliza para su metáfora en el mito o Alegoría de la Caverna.

En cuanto a la fotografía, su materia prima es la luz, hay autores que manifiestan que los fotógrafos se parecen más a los músicos que cualquier otro artista visual porque el músico, al igual que el fotógrafo, manipula energía más que materia.

Los dos tienen como materia prima las ondas, el fotógrafo trabaja con ondas electromagnéticas y el músico con ondas mecánicas, para los dos el conocimiento acerca del comportamiento de las ondas es fundamental.

Es por eso que en los libros de fotografía, dedican capítulos enteros a fuentes de luz y a la sombra que se puede obtener con cada fuente, se ven esquemas con la trayectoria de los rayos, sombras, y cómo modificarlas, es la física aplicada a la creación de los efectos deseados en fotografía.

Las sombras también han sido utilizadas en el teatro de sombras chinescas, en las culturas de oriente, desde hace más de 2000 años.

### El nacimiento del teatro de sombras

Cuenta la historia, que el teatro de sombras chinescas nació en China, en la dinastía Han Occidental, en la época en que gobernaba el Emperador Wudi (156–87 a.C.).

El Emperador tenía una concubina favorita, llamada Li, que un día enfermó y murió.

La muerte de su amada provocó en el emperador una gran depresión, perdió todo su interés por los asuntos de la corte y las tareas de gobierno.

Toda la corte estaba muy preocupada por el estado en que se encontraba su emperador, por ese entonces uno de sus ministros, vio un niño que jugaba con su muñeco en la calle, las sombras proyectadas en el suelo por el muñeco le parecieron de gran vivacidad, casi como si cobraran vida, esta visión aportó al ministro la idea de “revivir” la imagen de la amada del emperador y así mitigar su pena.

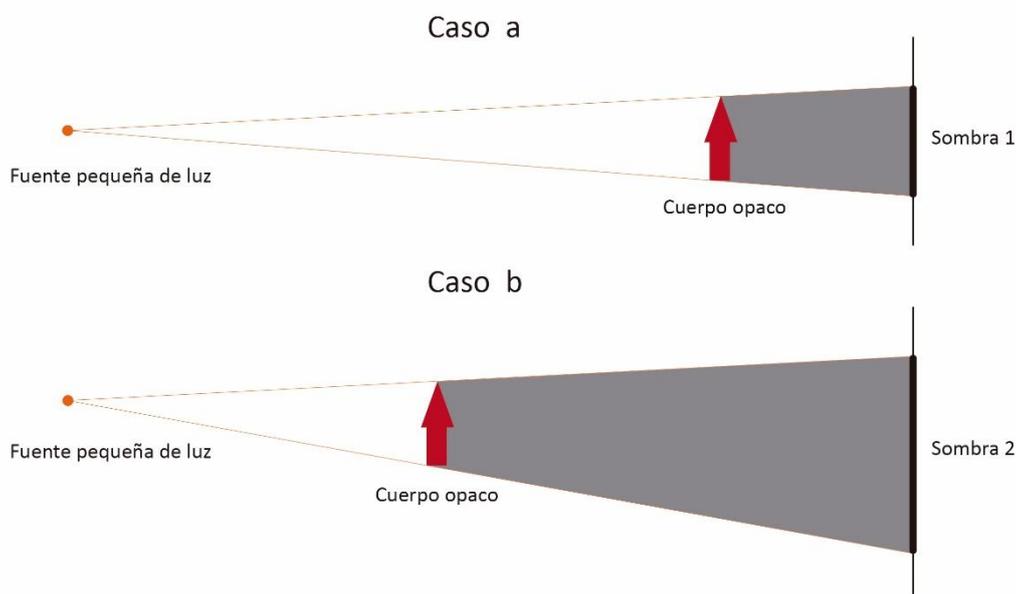
El ministro, regresó al Palacio Imperial y les ordenó a los sirvientes que elaboraran, con sobrantes de seda de colores, una figura lo más parecida posible a Li. Los sirvientes pusieron “manos a la obra” y hay quienes dicen que la figura fue confeccionada con seda y varas de madera para sostenerla, otros aseguran que se fabricó con madera y algodón, lo cierto es que cuando llegó la noche y el ministro invitó al Emperador a ver el espectáculo, éste gozó la ilusión de ver a su amada y tuvo consuelo, quedándose con la impresión de que su espíritu estaba allí.

A pesar de que el espectáculo estaba armado con una cortina, lámparas de aceite y la figura confeccionada, el Emperador quedó encantado con el invento y los teatros de sombras se convirtieron en una de las formas fundamentales de entretenimiento de la Corte Imperial, de este modo, nació el teatro de sombras o sombras chinescas.

Al principio las figuras se hacían de papel o madera, después, se confeccionaron de piel, porque ésta resultaba más resistente que el papel y más liviana que la madera, de allí que el nombre chino de este espectáculo significa “sombras de piel”

En el teatro de sombras, se usaron piezas de acero, piel, madera y papel calados que proyectaban sombras sobre una pantalla. Lograban modificar el tamaño de la sombra en la pantalla cambiando las distancias relativas entre la fuente de luz, el objeto que

producía la sombra y la pantalla, de esta forma lograban crear efectos mágicos de ilusión, figuras que se agigantaban o se empequeñecían.

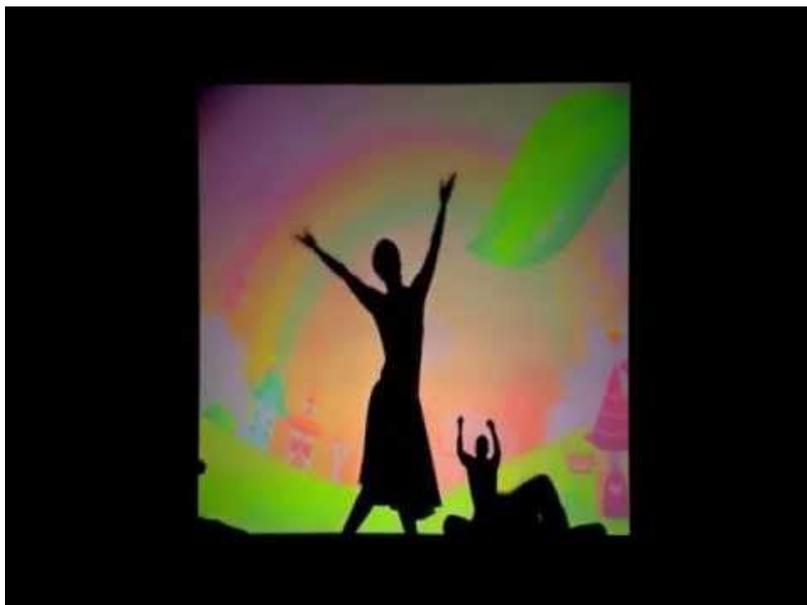


*fig. 123 Variación del tamaño de la sombra al modificar la posición del objeto.*

### Aumento y disminución de tamaño en el teatro de sombras

En la figura 123 vemos como varía el tamaño de la sombra al acercar el objeto a la fuente de luz mientras que se aleja de la pantalla. Los dos objetos representados son iguales y se trazaron los rayos que pasan por los extremos del objeto. El largo de la sombra proyectada es mayor en el caso b, cuando acercamos el objeto a la fuente de luz.

Si colocamos una fuente de luz pequeña (para que los rayos de luz diverjan) que ilumine una pantalla, mantenemos fuente y pantalla a una distancia constante y entre ellas interponemos un objeto opaco, veremos la sombra del objeto en la pantalla. Al mover el objeto, a medida que lo acercamos a la fuente de luz, se logra un aumento de tamaño de la sombra y una disminución en su definición. En el siguiente vídeo podemos disfrutar un espectáculo actual de Teatro de Sombras. Observe como al aumentar el tamaño de la sombras disminuye su definición y trate de imaginar el movimiento que hacen los actores para lograr las variaciones de dimensión de los personajes.



Video 9 Grupo de teatro Shadow<sup>38</sup>

Todos estos ejemplos tienen en común la aplicación de los mismos principios que rigen el comportamiento de la luz y que estudiamos en física.

Es apasionante como la aplicación de unos pocos principios físicos básicos conciben tan variadas expresiones artísticas.

## CÁMARA OSCURA

Es un hecho documentado, como en el caso de Canaletto (pag. 75) que los artistas han utilizado la cámara oscura como herramienta y es uno de los artefactos de óptica que más se ha utilizado desde tiempos remotos.

Durante siglos recibió el nombre de "caja mágica", la más sencilla, es una caja con el interior negro, en la que se ha hecho un pequeño orificio en una de sus caras por donde entran y se cruzan los rayos de luz (**A** en la figura 124), en su interior tiene una pantalla translúcida donde se proyecta la imagen<sup>39</sup> y en la pared opuesta al orificio (**A**) un agujero por donde mirar (**B** en la figura 124).

---

<sup>38</sup> El Lector puede ver este video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=R2ZHrKZ5JIU>

<sup>39</sup> Esta pantalla puede ser corrediza

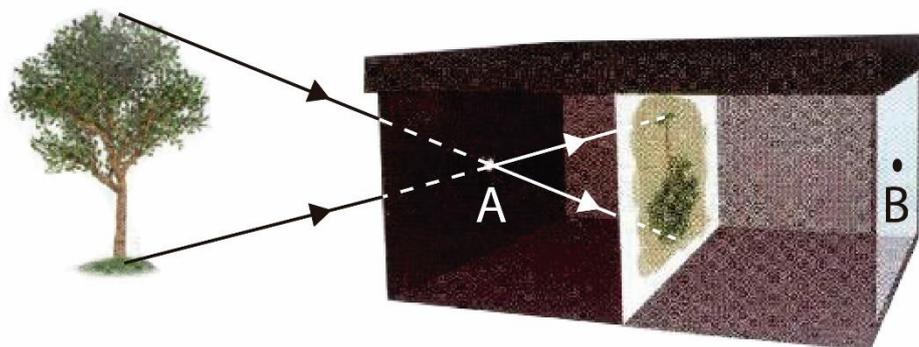


fig. 124 Esquema de cámara oscura

El orificio por donde entra la luz (**A**) debe ser pequeño, aproximadamente de 1mm de diámetro para que la imagen sea nítida, se puede hacer pinchando con la punta de una aguja. Si el orificio es muy grande la imagen será más luminosa pero pierde nitidez, y si es demasiado pequeño corremos el riesgo de que la luz se difracte.

Cuando acercamos la pantalla al agujero por donde entra la luz, la imagen se verá más pequeña y luminosa, porque al estar más cerca del orificio, llega más luz a cada centímetro cuadrado de pantalla

Si alejamos la pantalla al doble de distancia, la intensidad luminosa se divide entre cuarto, y si triplicamos la distancia la intensidad se divide entre nueve ( $3^2$ )

¿Por qué si la distancia aumenta al doble la intensidad luminosa disminuye a la cuarta parte?

Porque se puede relacionar la intensidad luminosa en la pantalla con su distancia al orificio mediante la ley del inverso del cuadrado, si asimilamos el orificio por donde entra la luz a una fuente puntual, la intensidad luminosa que llega a la pantalla, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre la fuente y la pantalla.

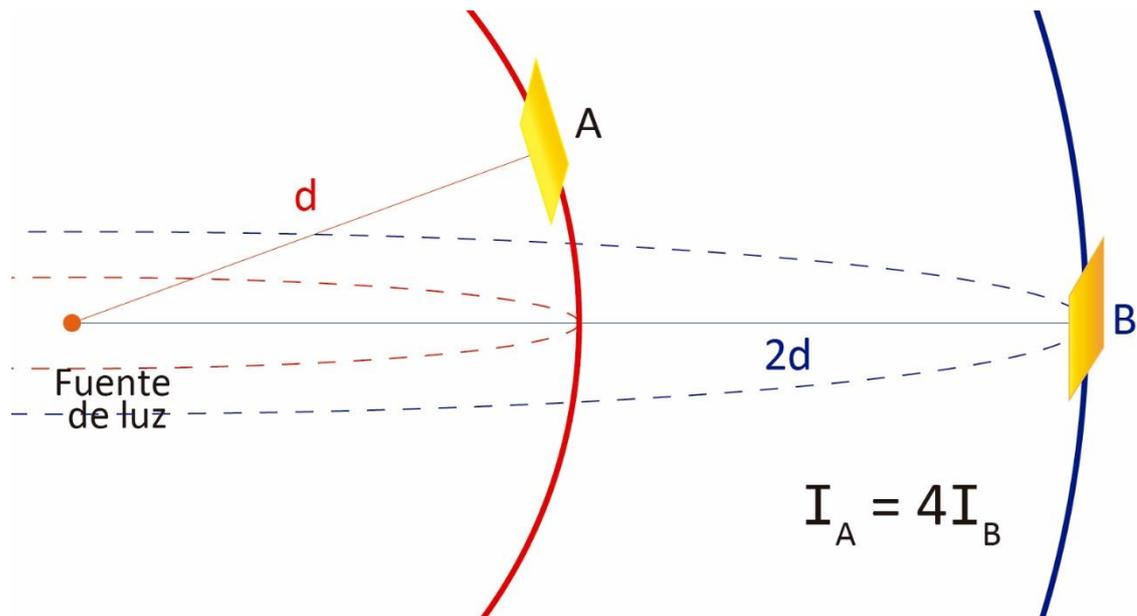


fig. 125 Intensidad en relación a la distancia desde la fuente.

Veámoslo con un ejemplo: en la figura 125 se representa una fuente de luz puntual y dos superficies **A** y **B** que se encuentran a la distancia **d** y **2d** respectivamente de la fuente, la intensidad luminosa que llega a cada superficie se relaciona con a la distancia a la fuente a partir de la ecuación:

$$I = \frac{P_{media}}{S} \quad (1)$$

Donde **P** es la potencia media de la fuente y **S** es la superficie de la esfera que tiene como radio la distancia entre la fuente y el lugar donde se determina la intensidad, en el esquema estas esferas aparecen dibujadas en rosado y celeste.

En este ejemplo, el radio de la esfera rosada es **d** (para determinar la intensidad luminosa en **A**) y **2d** para la esfera celeste con lo que determinamos al intensidad luminosa en **B**.

La superficie de la esfera se determina como  $4\pi R^2$ , en este caso el radio es **d** y **2d** para **A** y **B** respectivamente.

$$I_A = \frac{P_{media}}{4\pi d^2} \quad (2)$$

$$I_B = \frac{P_{media}}{4\pi (2d)^2} \quad (3)$$

Sustituyendo  $\frac{P_{media}}{4\pi d^2}$  por  $I_A$  en la ecuación 3 resulta:

$$I_B = \frac{I_A}{(2)^2} \quad (4)$$

$$4I_B = I_A \quad (5)$$

Aplicando este conocimiento a a cámara oscura, podemos explicar por qué hay un cambio importante en la intensidad luminosa al variar la distancia entre la pantalla y el orificio A de la fig. 124 y es conveniente que en la cámara oscura la pantalla se pueda deslizar.

La imagen que se forma en la pantalla está invertida en el eje vertical y en el horizontal, esta es una prueba de que la luz se propaga en línea recta (vea los rayos representados en la figura 124)

### *Un poco de Historia*

En cuanto a la historia de la cámara oscura hay ciertas controversias acerca de a quién se la adjudica su autoría, pero según parece, su uso comenzó en el siglo V antes de Cristo.

Hace más de 2400 años vivió en China el filósofo Mozi (479aC-372aC), o también llamado Mo Tzu, título honorífico que significa Maestro Mo.

Mozi realizaba experimentos con luz, reflexión y refracción. Entre sus experimentos, hacía pequeños orificios por donde entraba la luz en habitaciones oscuras, observaba y describía que cuando la luz pasaba por los pequeños agujeros, se formaba en la pared opuesta al orificio la imagen invertida del exterior. Mo Tzu le llamó a esta habitación: “el lugar de recoger” o “la habitación del tesoro encerrado”. Estos experimentos lo convierten en precursor de la cámara oscura y por tanto, de la cámara fotográfica.

En la misma época histórica, a más de 10.000km de distancia de donde nació Mozi<sup>40</sup> y cuando éste ya tenía 95 años, nace, en Grecia, Aristóteles (385aC-322 aC), que también trabajó con la cámara oscura y construyó la primera de la cual se tienen noticias en el mundo occidental.

En la época en que vivieron estos dos hombres de personalidades fascinantes, las condiciones eran muy diferentes a las actuales, la comunicación entre lugares tan distantes era muy difícil y es muy poco probable que Aristóteles conociera los trabajos de Mozi con la cámara oscura. Lo que seguramente ocurrió es que Aristóteles construyó la suya a partir de sus observaciones, sin enterarse de los trabajos de Mozi, como ha sucedido muchísimas veces a lo largo de la historia; en ocasiones dos o más personas investigan, descubren o inventan lo mismo, sin enterarse de los trabajos de los otros.

---

<sup>40</sup> Mozi nació en Qufu, China



*fig. 126 Imágenes del sol durante un eclipse solar a través de las hojas de un árbol.  
03 de octubre 2005,  
San Juliens, Malta. [Fuente](#)<sup>41</sup>*

Un día en el cual se producía un eclipse parcial de sol, Aristóteles, observó que los círculos que habitualmente se forman cuando el sol pasa a través del follaje de los árboles, cambiaban su forma, adquiriendo la forma del eclipse, y Aristóteles se preguntó:

*«¿Por qué durante los eclipses de sol, cuando se miran a través de una criba o de los huecos que dejan las hojas como las del plátano o de cualquier otro árbol de hojas grandes, o también cruzando los dedos de una mano con los de la otra, los rayos del sol se convierten en lúnulas en el suelo?»*

*Aristóteles*

Entonces, se dio cuenta de que lo que estaba viendo eran múltiples imágenes del sol, creadas cuando la luz atravesada los pequeños orificios que quedaban entre las hojas (Fig. 126). Esta observación lo llevó a experimentar haciendo agujeros, de diferentes formas, por donde dejaba pasar la luz del sol tratando de reproducir el fenómeno.

Llegó a la conclusión de que la forma del agujero no importaba, siempre la imagen era circular correspondiendo a la proyección de la imagen del sol. Fig. 127.

---

<sup>41</sup> Fuente:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IMG\\_1650\\_zonsverduistering\\_Malta.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IMG_1650_zonsverduistering_Malta.JPG)



fig. 127 "Ojos de sol" circulares a través de las hojas de los árboles

Hay quienes creen que Aristóteles construyó la primera cámara oscura de la que se tiene noticia y describió su construcción de la siguiente manera:

«Se hace pasar la luz a través de un pequeño agujero hecho en un cuarto cerrado por todos sus lados. En la pared opuesta al agujero, se formará la imagen de lo que se encuentre enfrente»<sup>42</sup>

*Aristóteles*

Y.....no se tienen noticias de la cámara oscura hasta 13 siglos después con su aplicación por parte de Alhazen.

¿Quién fue Alhazén? Descubramos parte de su historia:

Donde actualmente es Irak, en el año 965, nace Alhazen (965-1039), que llegaría a ser considerado el creador del método científico porque introdujo la experimentación, fue matemático, físico, astrónomo y realizó importantes contribuciones a la óptica.

---

<sup>42</sup> Aristote, Problèmes, Sect. XI-XXVII, Les Belles Lettres, Paris 1993

En esa época, los científicos musulmanes, entre ellos los de la escuela de Bagdad (Irak)), se encontraban reescribiendo la historia de la ciencia, buscaban y traducían los manuscritos griegos del mundo antiguo a sus idiomas locales, principalmente árabe, siríaco y hebreo, a partir de ellos escribían nuevos tratados.

Alhazen, siendo filósofo y matemático tuvo acceso a los tratados de Aristóteles y Euclides sobre la luz, pero en esa época todavía se explicaba el fenómeno de la visión como lo hacían algunos de los antiguos griegos, entre esos Platón, que creían que los rayos luminosos se emiten desde el ojo hacia los objetos visualizados.<sup>43</sup>

Alhazen experimentaba con la cámara oscura, fue el primero en dar una interpretación clara de su funcionamiento y la relacionó con la formación de imágenes en el ojo humano.

Alhazen se apoyó en los tratados antiguos, discrepó con algunas partes e investigó para refutarlas, enriqueció otras partes en un proceso donde la experimentación fue parte importante, y lo dio a conocer en su libro "Tratado Óptico", considerado uno de libros más influyentes en la historia de la física, donde echa por tierra las teorías griegas predominantes en aquella época, da una descripción detallada del ojo humano, afirma que los rayos luminosos que entran a los ojos provenientes de los objetos, y fundamenta a través de experimentos, de esta manera crea las bases del método científico.

---

<sup>43</sup> "Encontramos las primeras propuestas elaboradas sobre el tema de la visión en la antigua Grecia. En el siglo VI a. de C. Pitágoras (582 a. de C. - 507 a de C.) planteó que la luz emanaba del ojo en forma de rayos luminosos que se propagan en línea recta formando conos con el vértice de éste. Supuso que esta emanación chocaba con los cuerpos y la visión era el resultado de este choque. Medio siglo después, Empédocles (495 a. de C - 435 a. de C) consideró a la luz constituida por efluvios que eran proyectados por las fuentes incandescentes, los ojos y los cuerpos visibles. Medio siglo más tarde Platón (427 a. de C - 347 a. de C.) planteó que mientras nuestros ojos emitían pequeñas partículas de luz, del objeto también emanaba una sutil capa o un efluvio (la "eidola") y que era el contacto entre el fuego visual emitido por el ojo y este efluvio lo que producía la sensación de la visión." [Fuente:](#)

<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/fisica/Vision/Luz-vision03.htm>

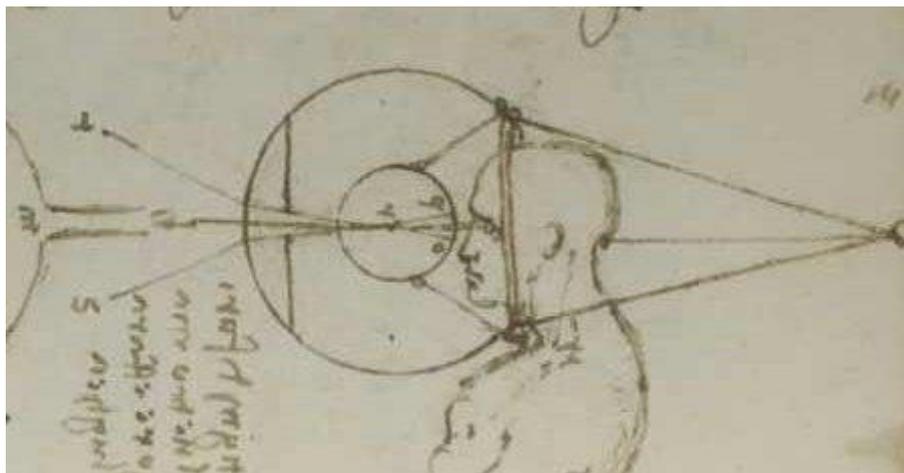


fig. 128 Dibujo del ojo de Leonardo da Vinci

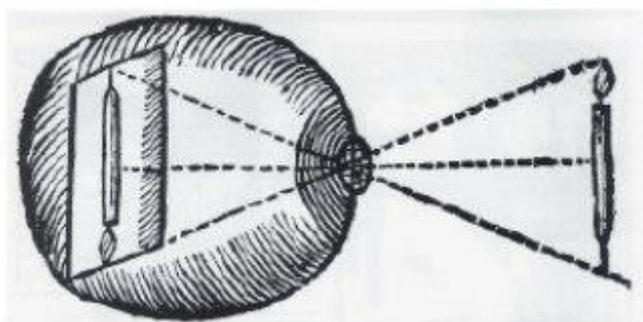


fig. 129 Esquema de cámara oscura - ojo de Leonardo Da Vinci

Y otra vez el silencio en la historia de la cámara oscura....

Hasta que en la segunda mitad del siglo XV Leonardo Da Vinci retomó los conocimientos de Alhazen en cuanto a su funcionamiento, lo comparó nuevamente con el del ojo, y la vinculó para siempre con el arte, dándole aplicación práctica como instrumento auxiliar para el dibujo. En sus manuscritos, describe e ilustra su funcionamiento, y en su TRATADO DE LA PINTURA escribe:

*“Un experimento que muestra como los objetos trasmiten luz imágenes o retratos, cruzándose con el humor cristalino del ojo, en mostrar cómo en las especies de objetos iluminados penetran en una pieza muy oscura a través de un pequeño orificio redondo. Entonces ustedes recibirán esas especies en un papel blanco, semitransparente, colocado relativamente cerca del orificio y todos los objetos en sus verdaderas formas y colores, pero pequeños e invertidos a causa de ese cruzamiento. Estas imágenes, siendo transmitidas desde un lugar iluminado por el Sol, pueden ser pintadas en un papel muy fino por el reverso”*

Leonardo Da Vinci

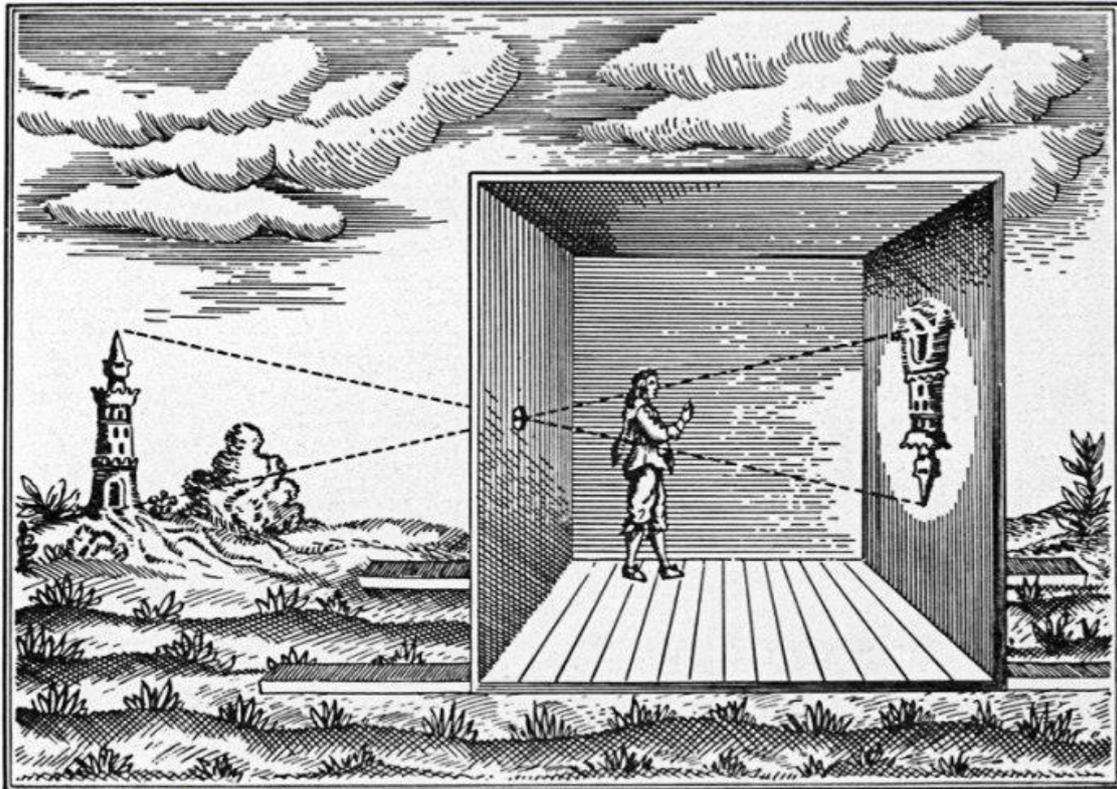


fig. 130 Representación de Cámara oscura<sup>44</sup>

Cuando Da Vinci usó la cámara oscura, ésta era una habitación sin luz, con un orificio pequeño, aunque Da Vinci sugirió incorporar a la cámara varios lentes<sup>45</sup> para perfeccionar la imagen, finalmente nunca lo hizo. A partir de entonces esta cámara sería muy usada para la representación, y fue utilizada como herramienta por muchos artistas y científicos.

Es bien interesante que tanto Alhazen como Leonardo Da Vinci describen a través de la cámara oscura, la propiedad de luz de pasar por un mismo orificio sin modificarse, ésta es una de las características más fascinantes de las ondas: pueden cruzarse, coexistir en el mismo espacio al mismo tiempo, sin cambiar en forma permanente.

Si la materia tuviera esta propiedad, los autos no chocarían, podrían estar en el mismo momento y lugar, se atravesarían y seguirían sin deformación después del cruce.

<sup>44</sup> ATHANASIOS KIRCHER. *Ars magna lucis et umbrae*, 1646

<sup>45</sup> Las primeras lentes con forma de lenteja fueron talladas en el año 1266 por Roger Bacon (1214 – 1294), filósofo, científico, teólogo y fraile franciscano que estudió en Oxford, donde leyó a Aristóteles, en su libro, “Opus maius”, describe claramente las propiedades de una lente para ampliar.

A finales del siglo XIII, en el norte de Italia, se comienzan a fabricar lentes convergentes debido al desarrollo técnico en el pulido de cristales.

Veamos la descripción de esta propiedad que hace cada uno de ellos.

- ➔ Alhazen, trabajando con su cámara oscura, colocó afuera varias velas en fila y en la pantalla aparecían sus imágenes oscilantes en una fila invertida, las velas y su imagen sólo estaban conectadas por el orificio, todo debería pasar por el orificio sin interferir entre sí. De alguna manera la luz de cada vela pasa, simultáneamente, por el mismo orificio. Asombrosamente, por el pequeño orificio de la cámara oscura puede pasar un paisaje entero, con todos sus colores.

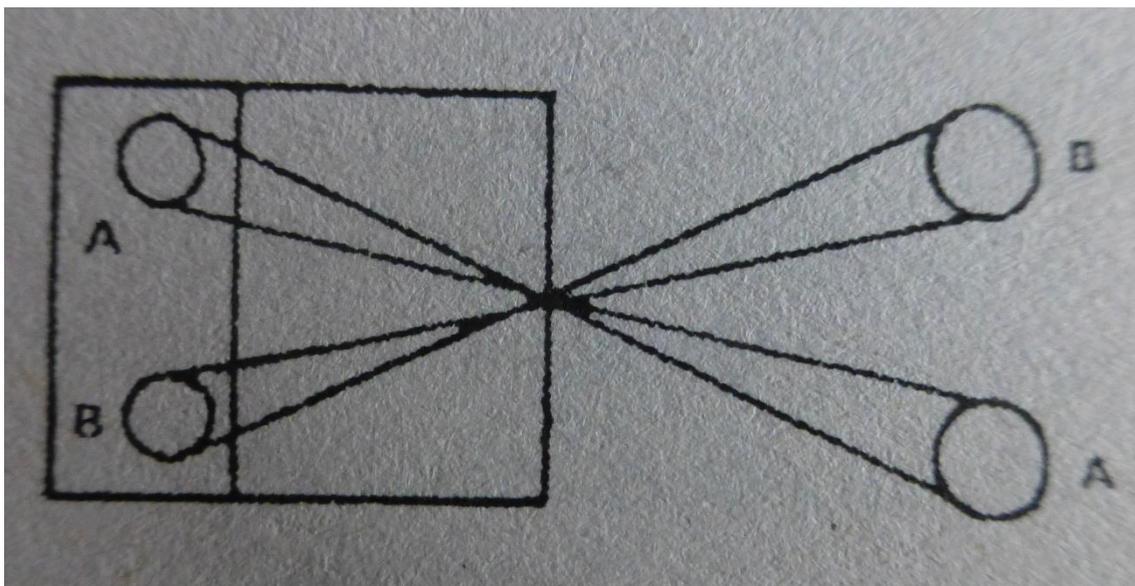


fig. 131 esquema del dibujo de Leonardo da Vinci en Tratado de la pintura

- ➔ Leonardo Da Vinci lo expresa de la siguiente manera:

*“Acerca de cómo pueden confluir en un solo punto los infinitos rayos de infinitas imágenes.”*

*Del mismo modo que pueden, por un punto, pasar infinitas rectas sin que se produzca interferencia alguna, ya que no son corpóreas, pueden, también, pasar por un punto las imágenes de todas las superficies... de igual modo podrán pasar por dicho punto los rayos convergentes proveniente de las imágenes para luego diverger nuevamente, reconstruyendo el tamaño exacto de tales imágenes. Pero sus impresiones aparecerán invertidas”*

*Leonardo Da Vinci*

La misma propiedad de la luz fue utilizada mucho tiempo después por Christiaan Huygens como argumento a favor de su teoría ondulatoria de la luz y en contra de la teoría corpuscular de Newton.

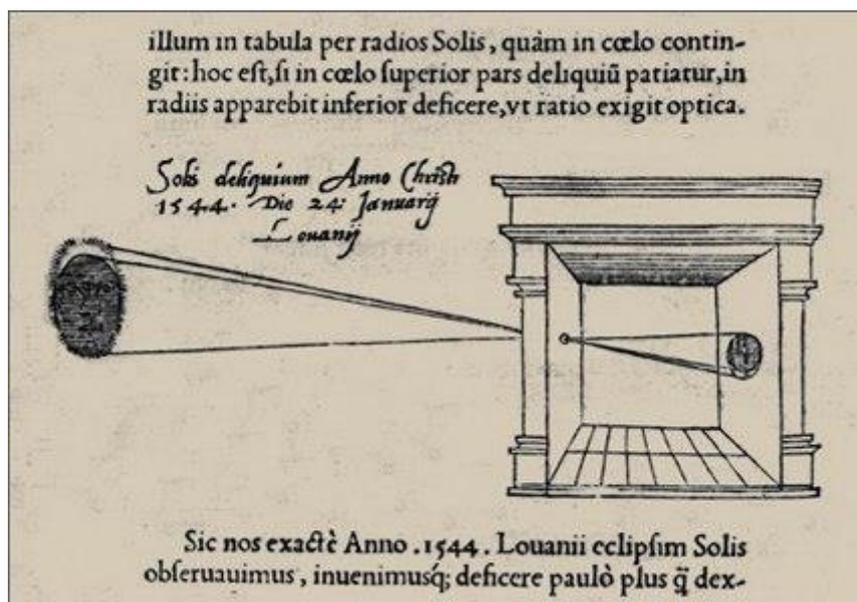


fig. 132 Grabado analizando el eclipse solar de 1544<sup>46</sup>

A partir de entonces la cámara oscura se fue modificando con aportes de, científicos, artistas, astrónomos...

En 1558, Giovanni Battista della Porta, publica su libro *MAGIA NATURALIS* en el que explica como la imagen invertida puede enderezarse utilizando un “espejo cóncavo”, y en la segunda edición de 1589 describe cómo obtener una mejor resolución con la cámara oscura colocando una lente en el orificio. Este aporte ha sido fundamental para el desarrollo de la fotografía, es el nacimiento del objetivo de la cámara fotográfica actual, que permite capturar imágenes enfocadas a diferentes distancias.

Giovanni Battista della Porta era amigo del pintor Caravaggio, que según la investigadora Roberta Lapucci<sup>47</sup>, utilizó la cámara oscura para obtener mayor precisión en sus obras. Según Lapucci, la cámara oscura utilizada por Caravaggio era una sótano iluminado desde una abertura superior, donde colocaba los modelos.

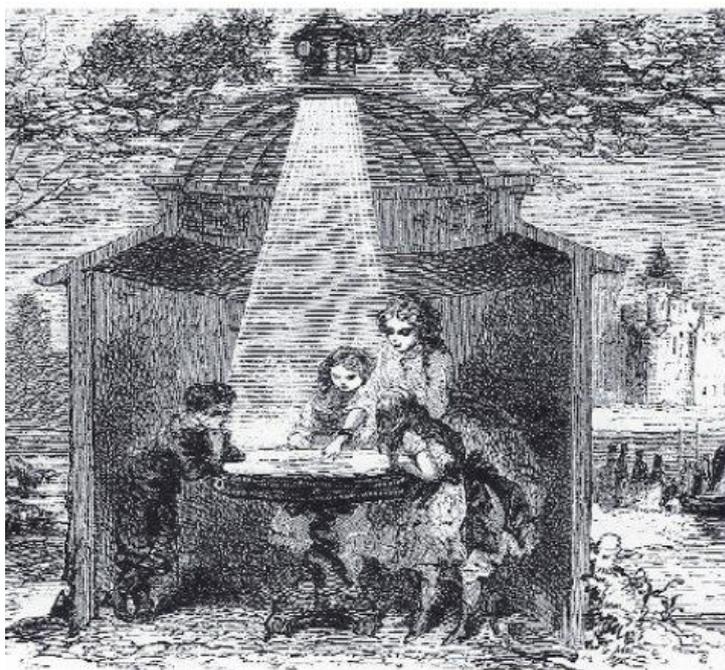
En cuanto a sus dimensiones, la cámara de Caravaggio era semejante a la utilizada por su amigo Della Porta en cierta ocasión, acerca de la cual les contaré a continuación.

Della Porta, estaba tan encantado con la cámara oscura, que construyó una enorme, era tan grande que en ella podían entrar espectadores. Del lado de afuera colocó algunos

<sup>46</sup> Esta es una de las ilustraciones más antiguas que se conserva de una cámara oscura, es publicada en 1545 por el físico y matemático holandés Reiner Gemma Frisius en su obra *De radio astronomico et geometrico liber*.

<sup>47</sup> Profesora del Studio Arte Centers International de Florencia que colaboró en las investigaciones de David Hockney (nos referiremos a esta investigación en el tema refracción).

artistas bien iluminados que se movían. En esa época no existía la fotografía, cine, ni el televisor al que ahora estamos acostumbrados, seguramente su auditorio nunca había visto una imagen proyectada; fue tal el impacto que produjeron las imágenes en los espectadores, que horrorizados, huyeron despavoridos, y Giovanni Battista fue acusado de brujería por la inquisición.



*fig. 133 Cámara oscura*

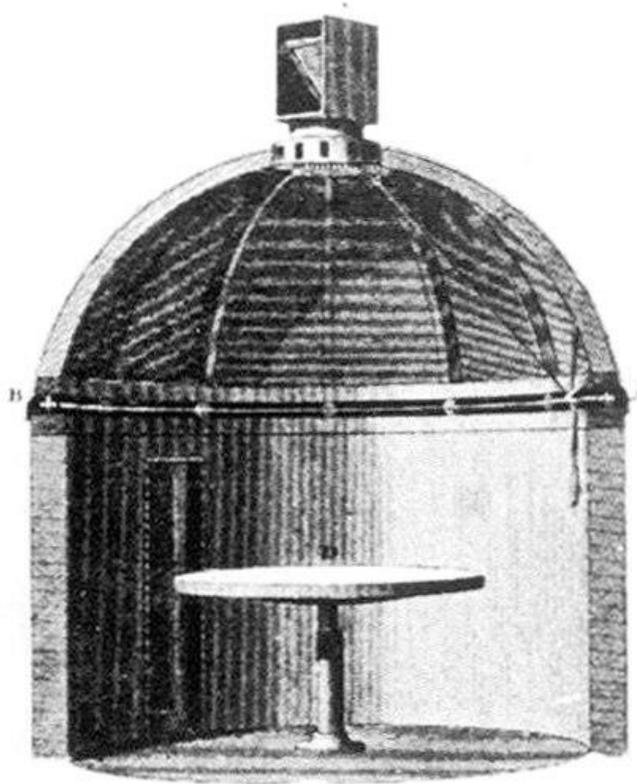


fig. 134 cámara oscura con espejo, 45º y pantalla cóncava

A Della Porta, también se la atribuye la primera cámara óptica construida en edificios como las de la fig. 133 y 134, que son predecesoras de las que se construyeron a finales del siglo XX como atracción turística en lugares como la Habana, Alcázar o Cádiz<sup>48</sup> y que veremos más adelante.

Johannes Kepler (1571-1630), que había leído los trabajos de Alhazen, aportó el estudio geométrico, aplicó las matemáticas a la óptica y creó la primera teoría, fundamentada en las matemáticas, en relación a la cámara oscura. Elaboró hipótesis acertadas acerca del funcionamiento del ojo humano y determinó la relación entre la intensidad observada de una fuente luminosa y la distancia a dicha fuente ( $I \propto 1/d^2$  como vimos en la pag. 117).

El trabajo de Kepler sirvió como base para la construcción del telescopio por parte de Galileo.

Más adelante, Robert Hooke (1653-1703), en un intento de demostrar el mecanismo de la visión humana, construyó, a modo de modelo, cámaras oscuras que proyectaban la imagen en pantallas cóncavas, copiando la forma de la retina del ojo humano. Construyó

---

<sup>48</sup> Cámara oscura [Torre Tavira](http://www.torretavira.com/es/camaraoscura.php):

<http://www.torretavira.com/es/camaraoscura.php>

otros modelos de cámaras oscuras portátiles que se utilizarían para copiar paisajes o cualquier modelo con precisión. De esta forma, también Robert Hooke, el científico que conocemos por la Ley de Hook<sup>49</sup>, influye en el arte, contribuyendo a crear esta intrincada red de interrelaciones que amarran ciencia y arte.

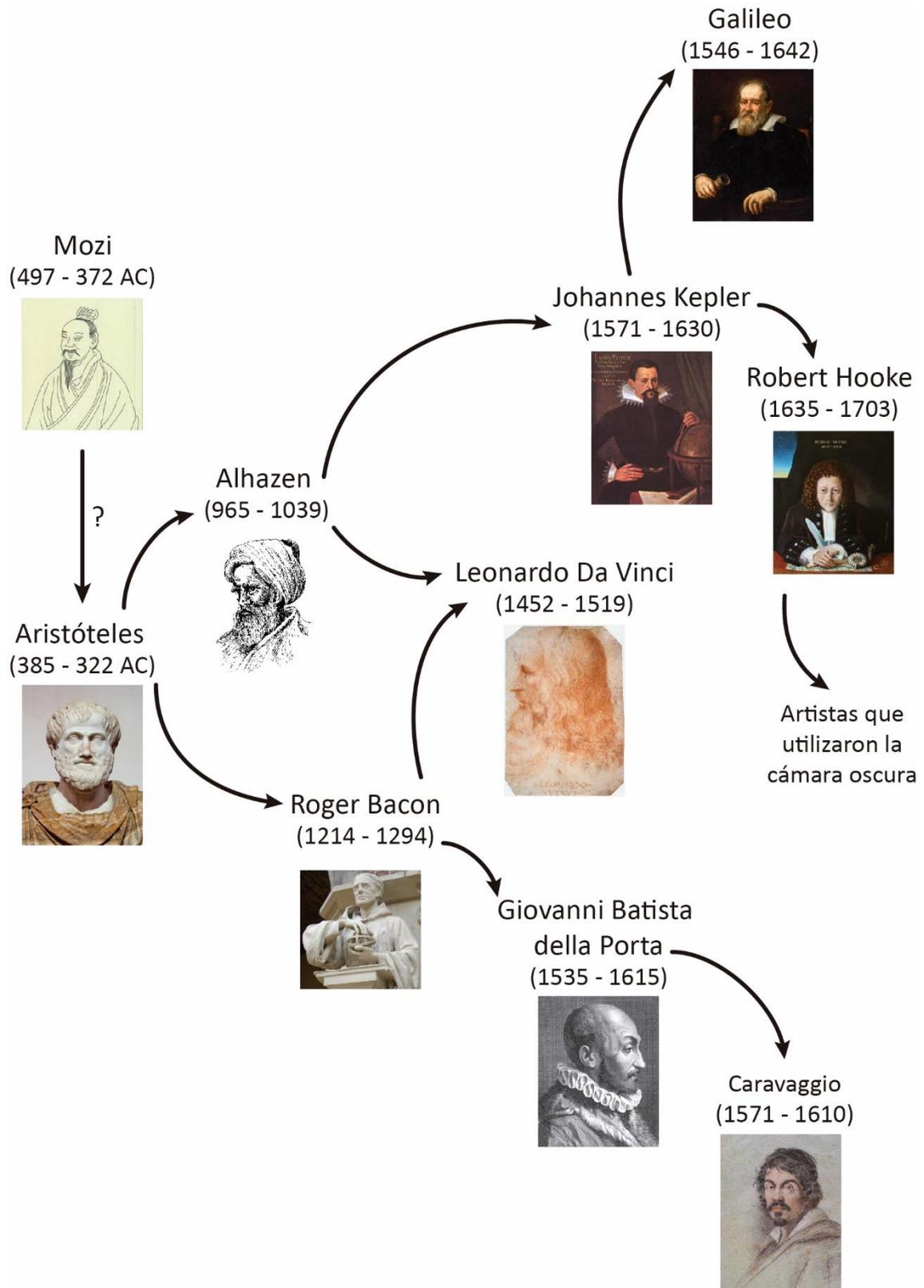
Esbozamos una pequeñísima parte de esta red que relaciona a artistas y científicos en torno a la cámara oscura, el siguiente cuadro.

---

<sup>49</sup> La ley de Hooke relaciona la deformación en un cuerpo elástico con la fuerza aplicada: Para un objeto linealmente elástico, la deformación debida a una fuerza aplicada es directamente proporcional a esta fuerza.

$$F=K.\Delta l$$

Donde F es la fuerza,  $\Delta l$  la variación de longitud y K una constante que depende de las características del cuerpo.



Es indudable que en el siglo XVII, cuando aún no se conocía la fotografía, las imágenes producidas por la cámara oscura creaban en los europeos enorme fascinación y asombro, es testimonio de ello una famosa carta que Constantijn Huygens, padre de del famoso científico Christiaan Huygens (1629 -1695) escribió desde Londres, donde tuvo la oportunidad de experimentar con la imagen producida por la cámara oscura de Cornelis Drebbel [1572-1633]

*“No me es posible describirle a usted esta belleza en palabras: en comparación toda la pintura parece muerta, ya que aquí está la vida misma, o algo más noble, que no necesita las palabras. Figura, contorno y movimiento se unen con naturalidad entre sí, de una forma totalmente placentera”*

*Constantijn Huygens 1622*

Su hijo, el padre de la teoría ondulatoria de la luz, Christiaan Huygens en un manuscrito escrito en 1659 hace la primera referencia conocida a un aparato capaz de proyectar imágenes. A partir de la cámara oscura, crea la linterna mágica, un aparato óptico con el que se proyectan imágenes y es el precursor del cinematógrafo.



*fig. 135 Linterna mágica*

En 1685, en una obra<sup>50</sup> publicada por Johann Zahn, se muestra y explica un modelo de cámara oscura con un espejo plano a 45° que proyecta la imagen sobre un papel a la vez que la invierte e incluye una lente que se desliza dentro de un tubo, con lo que se logra enfocar objetos colocados a diferentes distancias (fig. 136 y 137), este modelo se siguió utilizando hasta que en el siglo XIX, a partir de la cámara oscura se inventó la fotografía.

---

<sup>50</sup> "OCULUS ARTIFICIALIS TELEDIÓPTRICUS"

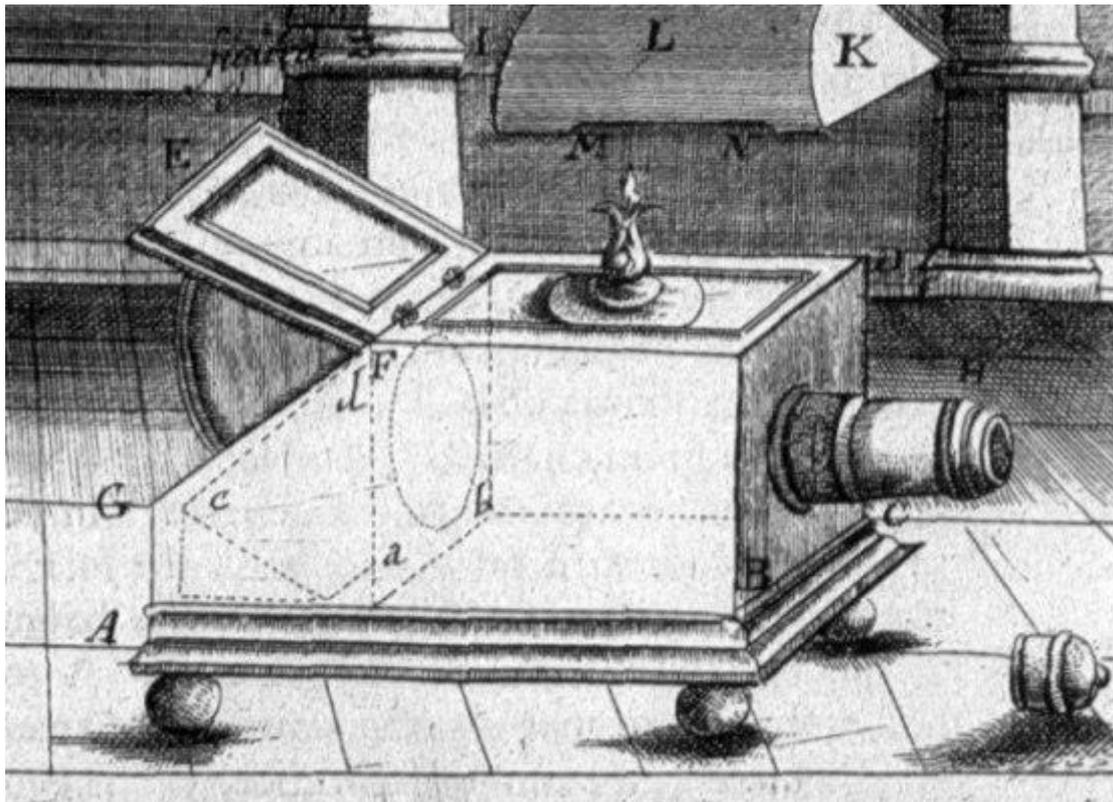


fig. 136 Cámara de Johann Zahn

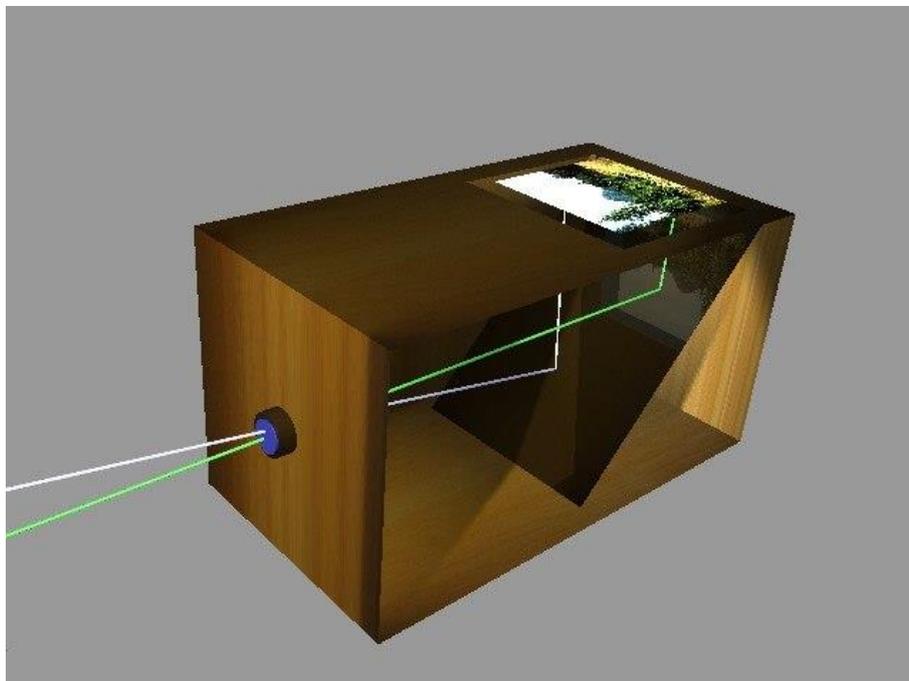


fig. 137 Esquema de cámara oscura con lente y espejo plano a 45°

En 1994 se instala como atracción turística la cámara Oscura de la [Torre Tavira](#)<sup>51</sup> en Cádiz, y desde entonces se siguen instalando en lugares como la Habana, Alcázar o Jaén entre otros, estas cámaras tienen en lo más alto del edificio un espejo plano a 45º, montado en un tubo giratorio, como un periscopio que se mueve todo en derredor y conduce la luz a la lente, la imagen real del paisaje se proyecta en una pantalla cóncava colocada horizontalmente, a modo de mesa, que se sube y baja para enfocar la imagen (figura 138).

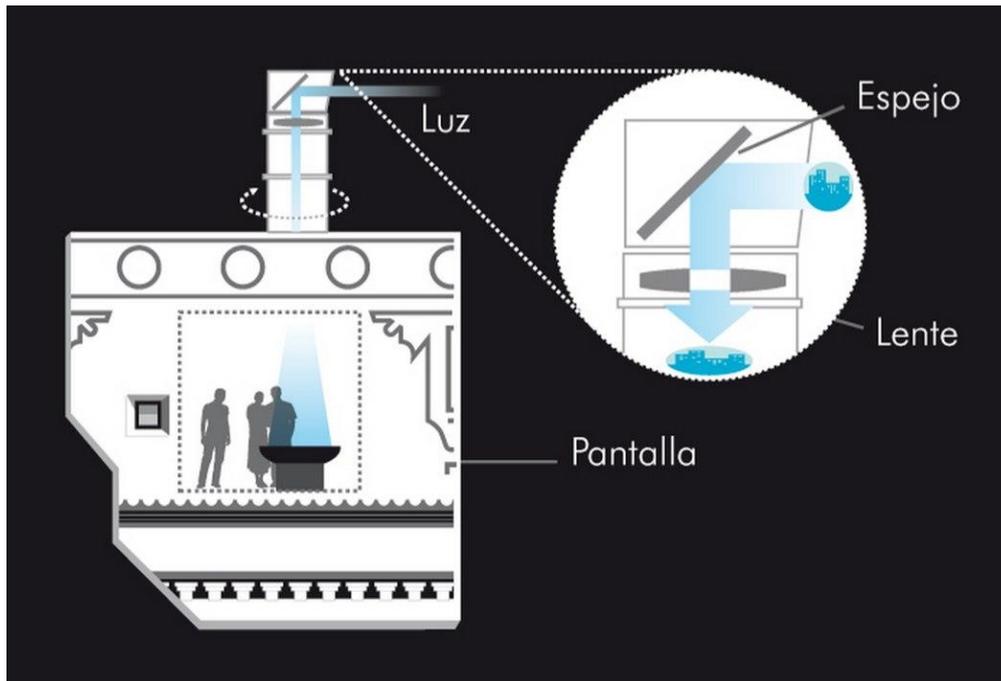


fig. 138 Cámara oscura en Torre Tavira de Cádiz [Fuente](#)<sup>52</sup>

Las imágenes son sorprendentes, se ve lo que está sucediendo en la ciudad, pájaros volando, barcos que llegan y salen del puerto, gente caminando por las calles, la ciudad en movimiento en tiempo real, como si fuera una fotografía en movimiento, bien distinto a una pantalla de televisor en cuanto a su luminosidad (figura 139 y video 10)

<sup>51</sup> <http://www.torretavira.com/es/funcionamiento.php>

<sup>52</sup> <http://www.torretavira.com/es/funcionamiento.php>



fig. 139 Imagen en la pantalla cóncava de la cámara oscura de torre Tavira. [Fuente](#)



Video 10 Cámara Oscura de Cádiz<sup>53</sup>

---

<sup>53</sup> El lector puede ver este video en: <https://www.youtube.com/watch?v=Agw8DMvG5zo>

## LA LUZ EN SU INTERACCIÓN CON LA MATERIA

### REFLEXIÓN

Además de la propagación de la luz que nos conduce a la obtención de sombras, es fundamental para el artista el conocimiento del comportamiento de la luz en su interacción con la materia, lo que nos lleva a tratar los temas reflexión y refracción.

Cuando la luz incide en la superficie de un cuerpo, interactúa con los electrones exteriores de los átomos que constituyen la superficie, la absorción y emisión de luz a través de estos átomos es responsable de casi todos los fenómenos ópticos de la naturaleza.

Gran parte del comportamiento óptico y químico de una sustancia está determinado por sus electrones exteriores, cada átomo excitado puede funcionar como una pequeña fuente de luz.

Para explicar ciertos fenómenos ópticos como la reflexión y refracción podemos hacer una simplificación representando los rayos que apuntan en la dirección y sentido de propagación del frente de ondas, con ellos podemos describir de una forma sencilla el comportamiento de la luz cuando llega a una interfase.

Siempre que la luz llega a una superficie opaca, parte de la radiación es absorbida y otra regresa al medio del cual provino cumpliendo con las leyes de reflexión.

Recordemos las leyes de reflexión:

- 1) El rayo incidente, el reflejado y la normal a la superficie en el punto de incidencia se encuentran en un mismo plano.
- 2) El ángulo de incidencia es igual al de reflexión.

Según la superficie del cuerpo sea lisa o rugosa estaremos frente a la reflexión especular o difusa respectivamente.

### REFLEXIÓN DIFUSA

Cuando la luz incide en una superficie rugosa como papel, una pared, o nuestra piel, parte de la luz es absorbida y otra regresa al medio del cual provino, cumpliendo con las leyes de reflexión.

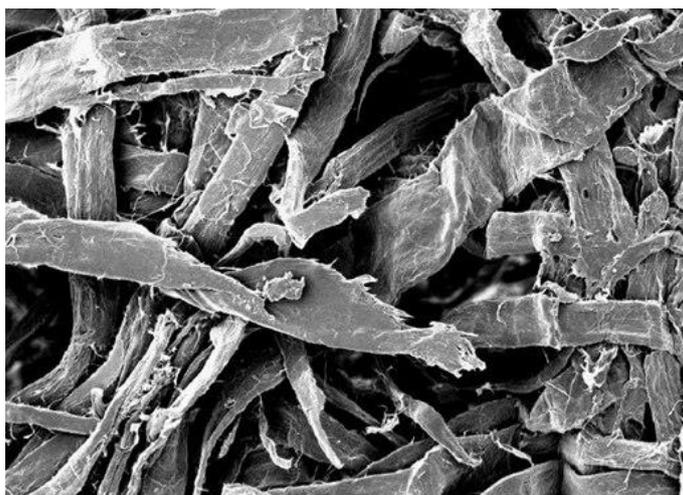
Estas superficies a simple vista parecen lisas, pero eso depende de la escala en la cual la observemos, si las ampliamos, vemos que tienen protuberancias y depresiones, lo liso se transforma en rugoso si modificamos su escala.

Cuando la luz llega a una superficie en la que el tamaño de las rugosidades es grande en comparación con la longitud de onda de la radiación incidente, se produce la reflexión difusa.



*fig. 140 Piel humana*

Muchas veces, cuando queremos dar la idea de algo muy liso y suave decimos “lisa como la piel de un bebé”, sin embargo, si cambiamos de escala, la piel ya no nos parece lisa, la figura 140 muestra la ampliación de un trozo de piel humana donde se puede apreciar su rugosidad, podríamos descomponer esta superficie en muchos pequeños planos cuyas normales tienen direcciones diferentes como se ve en el esquema de la figura 142 que muestra un corte transversal de una superficie rugosa (rugosa para longitudes de onda del orden de las de la luz visible  $\lambda=10^{-7}$  m).



*fig. 141 Papel visto con microscopio electrónico*

Lo mismo sucede con la superficie de una hoja de papel, a simple vista la vemos lisa pero...

¿Qué ocurre a otra escala?

La figura 141 muestra un trozo de papel visto a través de un microscopio electrónico de barrido, a esta escala las fibras del papel forman un entramado que está lejos de ser liso. Las leyes de reflexión se cumplen igualmente para la reflexión difusa y la especular.

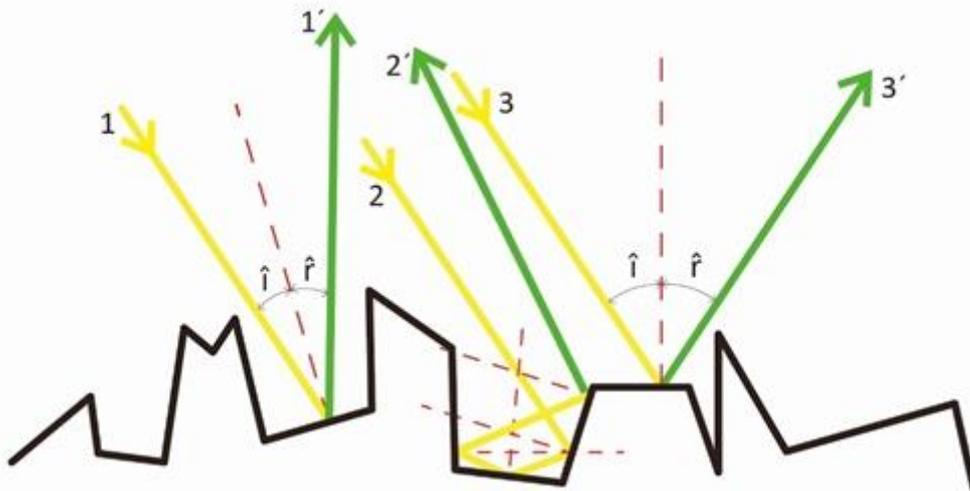


fig. 142 Esquema de superficie donde se produce reflexión difusa

Cuando un haz de rayos paralelos llega a una superficie rugosa, cada rayo incide formando un ángulo diferente con cada una de esas pequeñas superficies, esto hace que los rayos que llegan paralelos entre sí (1, 2 y 3 en amarillo en la figura 142), se reflejen en todas direcciones como se ve en el esquema (1', 2' y 3' en verde) que muestra un corte transversal de una superficie rugosa para longitudes de onda del orden de las de la luz visible ( $10^{-7}\text{m}$ ).

Esta figura representa una simplificación de la superficie rugosa y tres rayos de luz (1, 2 y 3), pintados en amarillo, paralelos entre sí que inciden en ella.

La línea punteada en rojo, representa la normal a cada superficie en el punto de incidencia y con verde se representan los rayos reflejados (1', 2' y 3'). Vemos que en todos los casos se cumplen las leyes de reflexión. Cada rayo incide en una pequeña superficie, estas superficies tienen inclinaciones diferentes por lo que el ángulo de incidencia es diferente para cada rayo, como consecuencia, los rayos reflejados se alejan en todas direcciones.

El rayo numerado con 2 tiene múltiples reflexiones, en cada una de ellas se cumplen las leyes de reflexión y parte de la luz es absorbida por el material.

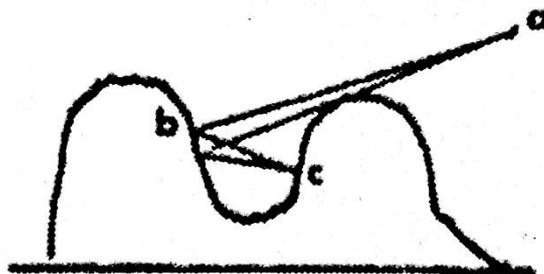
Los rayos de luz que se alejan de una superficie rugosa en todas direcciones hacen que la podamos ver desde todos lados y que esa luz reflejada aporte su color a los cuerpos del entorno.

Alberti observó este efecto de la reflexión difusa en la naturaleza, y al igual que Leonardo da Vinci la aplica al color. Según sus palabras:

*“los rayos reflejados asumen el color que hallan en la superficie desde la que se reflejan. Vemos que esto ocurre cuando parece que las caras de la gente que anda por los prados tienen un tinte verdoso”*

*León Battista Alberti*

Leonardo da Vinci en el capítulo titulado Color del TRATADO DE LA PINTURA, explica como la luz, proveniente de la reflexión difusa, cambia los colores de las sombras. Para Leonardo, la pintura es una ciencia, por lo tanto, su técnica debe ser expuesta como tal. Para explicar la reflexión que ahora llamamos difusa, se vale de un esquema semejante al de la figura 143 donde representa la trayectoria de los rayos y escribe:



*fig. 143 Esquema según Leonardo da Vinci*

*“Si **a** es una fuente luminosa y **b** se encuentra iluminado por dicha luz, **c** que no puede ver tal luz sólo ve la zona iluminada que, a modo de ejemplo, es roja. En este modo, teñirá a **c** de rojo. Y si también **c** fuera rojo verías que tal rojo sería mucho más profundo que el de **b**, mientras que si **c** fuera amarillo, verías entonces allí un color distinto, mezcla de rojo y amarillo”*

*Leonardo Da Vinci*



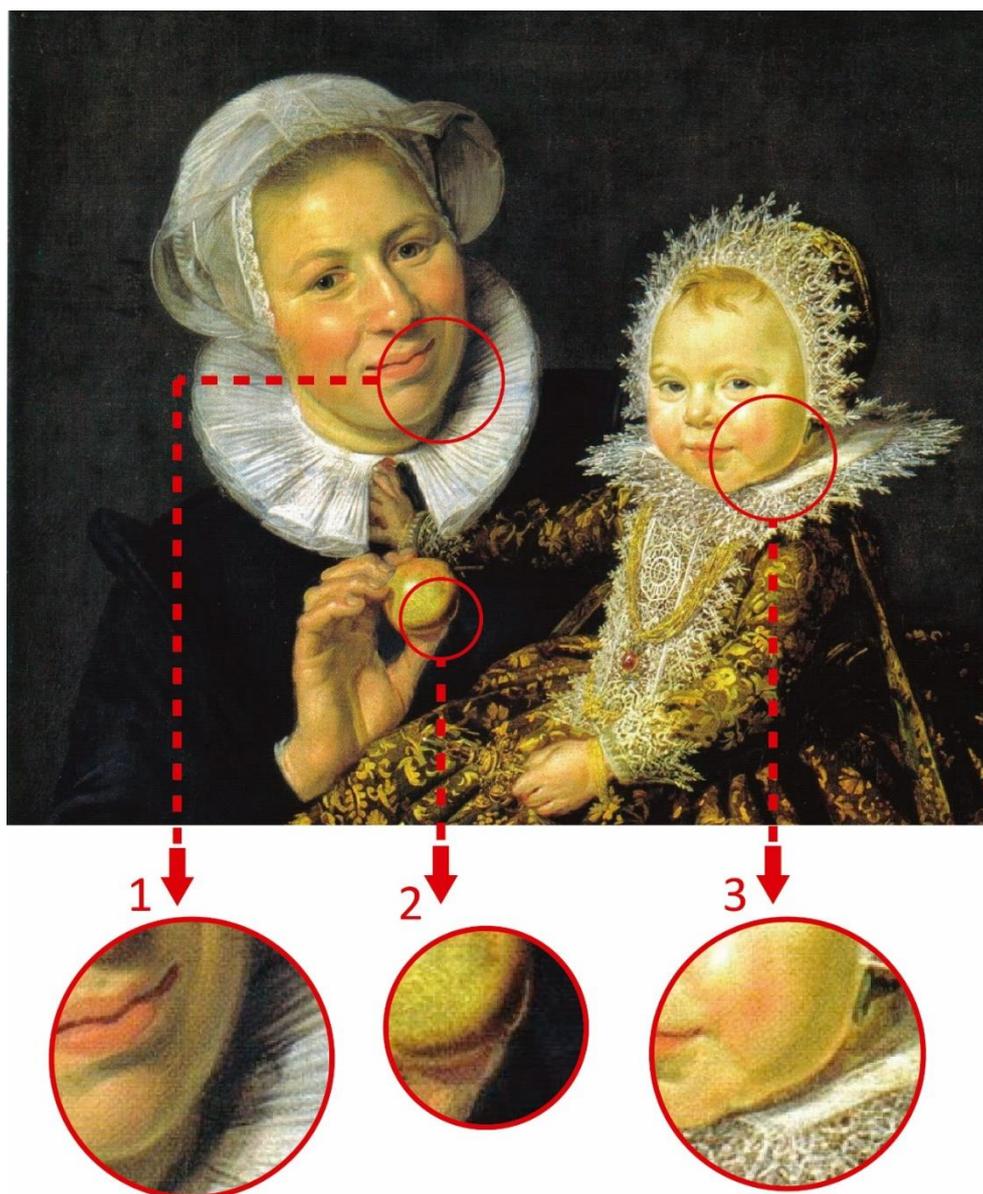
fig. 144 CATHARINA HOOFT CON SU NIÑERA  
Frans Hals

Estos conocimientos en cuanto a la reflexión difusa fueron utilizados por Leonardo y muchísimos artistas, aportando calidad a sus obras en cuanto al manejo de la luz, analicemos algunos ejemplos concretos:

Si observamos la obra de Frans Hals, CATHARINA HOOFT CON SU NIÑERA (fig.144), veremos cómo el artista maneja los efectos de la reflexión difusa.

La luz en esta escena proviene desde el frente, arriba y a la izquierda en el cuadro, como si proviniera del vértice superior izquierdo y en la dimensión z (perpendicular a la superficie del cuadro) estuviera hacia adelante. Si Frans Hals sólo tuviera en cuenta la luz de esa fuente, todo lo que está detrás de un cuerpo opaco debería estar en sombra, sin embargo el artista pinta luces en zonas que están en sombra.

Analizaremos tres de esas zonas que amplifiqué y marqué con 1, 2 y 3 en la figura 145.



*fig. 145 reflexión difusa en obra de Frans Hals*

- 1) En la zona marcada con el número uno, Frans Hals pinta una luz en la cara, en un lugar que, a no ser por la reflexión difusa, debería estar a la sombra, es la luz reflejada en el cuello del vestido de la niñera lo que crea esa mancha de luz que también llega a iluminar muy sutilmente, desde abajo la zona que limita el labio y la comisura.
- 2) La ampliación de la fruta que sostiene la niñera en su mano, nos deja ver las pinceladas claras en los bordes inferior y derecho, tienen diferente color, abajo amarillo que corresponde a la luz reflejada por la falda del vestido, a la derecha las pinceladas son más claras porque esta luz proviene de la reflexión en la pechera del vestido de la niña que es mucho más clara que la falda.

- 3) En la zona que, de acuerdo a la fuente de luz que ilumina la escena, debería existir sombra, el artista pinta una mancha de luz que limita la carita de la niña, es la luz que proviene de la reflexión difusa en el cuello del vestido, además, si observamos la sombra que proyecta la cara de la niña en el cuello del vestido, veremos que contiene el color de la piel, corresponde a la reflexión difusa de la luz en la cara de la niña.

Veamos cómo aplica la reflexión difusa Jan van Eyck, la figura 146 es un detalle de su famoso cuadro, EL MATRIMONIO ARNOLFINI, pintado en 1434, que veremos más adelante en su totalidad. ( fig. 169 EL MATRIMONIO ARNOLFINI,

JAN van Eyck)

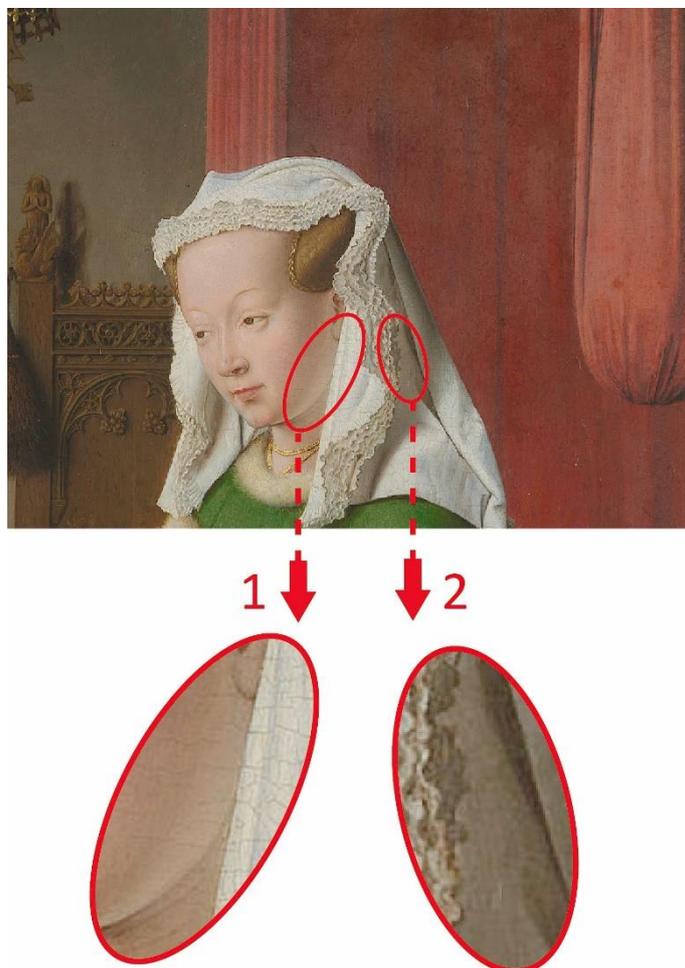


*fig. 146 detalle de la obra de Jan van Eyck: El matrimonio Arnolfini*

Jan van Eyck estaba intensamente interesado en los efectos de la luz, lo demuestra en esta obra pintada con óleo sobre madera de roble y considerada una obra maestra.

La parte del rostro que se encuentra a la derecha en el cuadro y la oreja, seleccionada con el número 1 y ampliada en la figura 147, es iluminada por la luz que refleja el manto

blanco, de esta forma el artista, además de aportar calidad y luminosidad a la obra, realza la blancura de la señora, que en esa sociedad, lugar, y momento histórico era muy apreciada.



*fig. 147 reflexión difusa en obra de Jan van Eyck*

La zona del manto seleccionada con el número 2 y ampliada en la fig. 147, a la que no llega la luz de la ventana, se tiñen de rosa pálido, proveniente de la reflexión difusa de la luz en la tela que cubre y adorna la cama, esta reflexión aporta poca luz comparada con la que aporta el manto a la cara de la señora.

Analicemos porqué el manto se tiñe de rosa en la zona de sombra; en la figura 148 comparamos los colores del rostro y el manto. Tomamos el color de estas zonas con el cuentagotas de un programa de tratamiento de fotografías y pintamos los cuadrados 1 y 2 con ellos.

Si comparamos los cuadrados 1 y 2, los colores son muy semejantes en cuanto a matiz, los dos tienen un porcentaje de rojo, comprensible en el rostro, pero ¿Por qué el manto blanco se tiñó de rojo en la zona de sombra?

El rojo que colorea el manto, es aportado por la luz que proviene de la reflexión difusa en la tela roja del fondo.

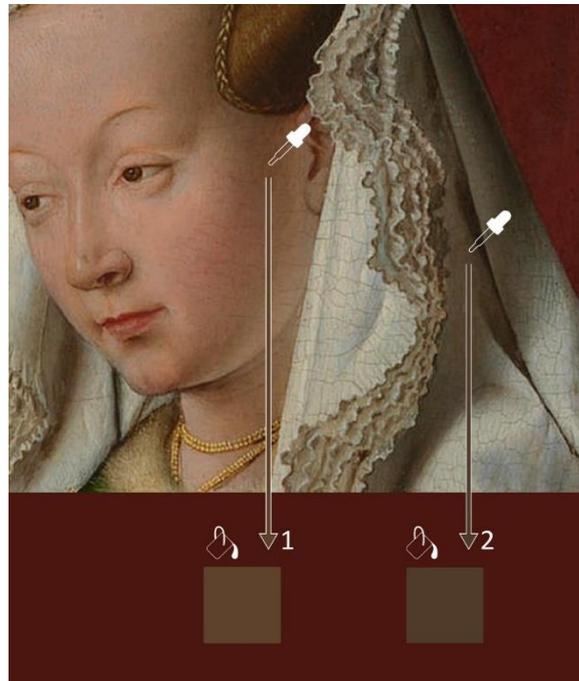


fig. 148 reflexión difusa en obra de Jan van Eyck

El tratamiento de la luz en esta obra coincide con fenómenos físicos reales, la intensidad de luz en la zona 1 es mayor que en la zona 2 y hay al menos dos motivos para ello:

- 1) La luz en el rostro (zona 1), proviene de la luz reflejada en el manto que está muy próximo, mientras que de la zona 2 proviene de la reflexión en la tela roja de fondo que se encuentra alejada.

Como vimos cuando tratamos el tema de cámara oscura, para una fuente puntual, la intensidad está en relación inversa al cuadrado de la distancia, y aunque la tela no sea una fuente puntual, el factor de atenuación para la reflexión difusa también depende del cuadrado de la distancia y la intensidad disminuye a medida que aumenta la distancia.

Debemos aclarar que la diferencia de distancias es uno de los factores, pero existen otros, las dos telas en las que se produce la reflexión difusa no son iguales, por lo que existen otras variables a tener en cuenta, como el coeficiente de reflexión, que a su vez depende del material con que está hecha la superficie, temperatura, textura o rugosidad y ángulo con que incide la luz en esa superficie reflectora.

En este caso algunos de estos factores influyen acentuando la diferencia de intensidad luminosa.

- 2) La tela blanca del manto, absorbe menos radiación que la oscura, refleja más luz, entonces la intensidad aportada por cada  $\text{cm}^2$  de tela blanca es mayor que la que

aporta cada  $\text{cm}^2$  de tela roja. Aunque estuvieran a la misma distancia, la tela blanca aporta más luz reflejada que la oscura.

La luz proveniente de la reflexión difusa nos da información acerca del entorno.



*fig. 149 Iluminando con Reflexión difusa*

Si observamos la figura 149 vemos que la parte de la cara de la muchacha a la derecha en la foto, está iluminada por luz de color rojo y la que vemos a la izquierda por luz blanca, podemos predecir que a la derecha en la foto, existe una fuente de luz roja o una superficie roja en la que se produce la reflexión difusa.

Veamos si la predicción es correcta: en la figura 150 vemos la fotografía de la cual se extrajo el detalle anterior.

La luz blanca entra por la ventana a la izquierda en la fotografía, se refleja en el buzo rojo de la chica que vemos a la derecha e ilumina con luz roja la cara de la muchacha y las zonas de la pared que de otra forma estarían en sombra.



fig. 150 Reflexión difusa

Este efecto de reflexión difusa que vemos en la fotografía, es aplicado intensamente por la pintora contemporánea [Isabel Guerra](#)<sup>54</sup>, conocida como la pintora de la luz por el manejo que hace de ella.

Isabel Guerra, nacida en Madrid en 1947, pinta los efectos de la luz, por eso el escritor y periodista español Luis María Ansón comenta acerca de ella:

*“no pinta las mujeres, las telas, las maderas, los cestos, las niñas, las frutas, las vasijas, las mesas, los bodegones. Eso son pretextos. Pinta las luces que los envuelven y dan forma”*

*Luis María Ansón*

En la obra de la figura 151, que se titula **SEGURIDAD EN LA ESPERANZA**, la artista se vale de la reflexión difusa en la falda de la protagonista para iluminar las sombras y aportar su color a la cara, dedos de la mano derecha de la muchacha, cuello y manga de la camisa.

---

<sup>54</sup> El Lector puede leer un reportaje a la artista en:

<http://www.elmundo.es/magazine/2004/267/1099505460.html>

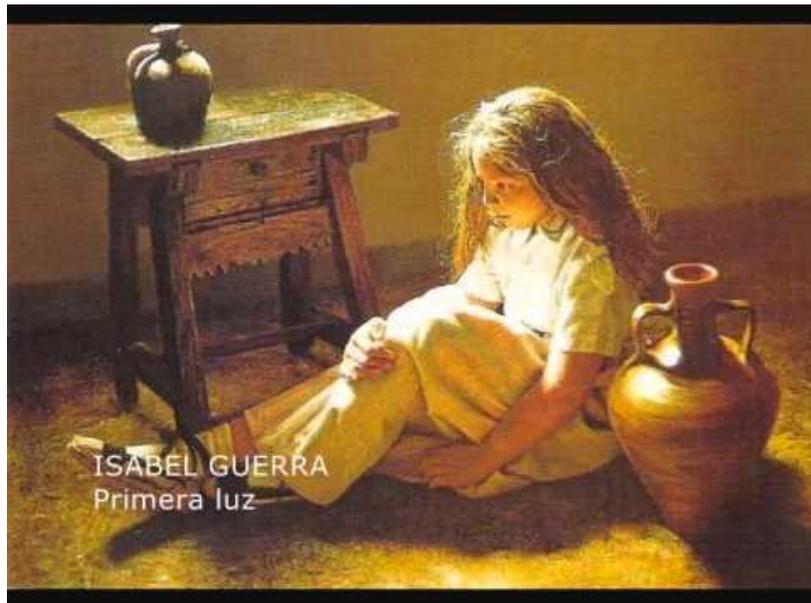


*fig. 151 SEGURIDAD EN LA ESPERANZA, Isabel Guerra.*

De esta forma, la artista aporta luz a las sombras y el cuadro se ve muy luminoso, las sombras se transforman en zonas iluminadas y coloreadas con el tono de la falda, éste es un recurso aplicado magistralmente por la artista en sus obras.

Veamos un breve video en el que el Lector puede encontrar el efecto de la reflexión difusa en algunas obras, es deseable que aplique estos conocimientos, observando y ubicando las zonas iluminadas por reflexión difusa en cada cuadro.

Puede ubicar en cada cuadro, cuál es la fuente principal de la cual proviene la luz, los objetos en los que se refleja y explicar el cambio de coloración que produce en las superficies.



Video 11 Reflexión difusa en obras pictóricas<sup>55</sup>

Está claro que en muchas de estas obras el artista se expresa a través de la luz, es una alegoría en la que la luz representa sentimientos e ideas, en la segunda obra del video, titulada “ASÍ CON NOSOTROS SU TERNURA”, de Isabel Guerra, la cara de la madre es iluminada por el niño que lleva en brazos, la expresividad no está sólo en la forma de representarlo, acentuando el efecto del comportamiento físico de la luz, sino en cómo utiliza ese efecto para expresar sentimientos.

En la cuarta obra que vemos en el video 11 “ENSÉÑAME TUS CAMINOS”, Isabel Guerra representa a una muchacha iluminada por las páginas de un libro, es una alegoría donde la luz es el símbolo.

### REFLEXIÓN ESPECULAR

La reflexión, que se produce cuando la luz incide en superficies muy lisas, ha sido utilizada ampliamente por los artistas desde tiempos remotos, está asociada a la perspectiva, representación de paisajes, retratos y obras naturalistas; actualmente muchos artistas usan espejos como materia prima en la construcción de sus obras.

Cuando hablamos de superficies lisas, debemos recordar que una superficie puede ser lisa y reflejar especularmente ciertas ondas, pero rugosa para otras de diferentes longitudes de onda, todo depende de la magnitud de las imperfecciones en relación a la longitud de onda de la onda incidente.

---

<sup>55</sup> El Lector puede ver este video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=Ah7VcYdrcOc>

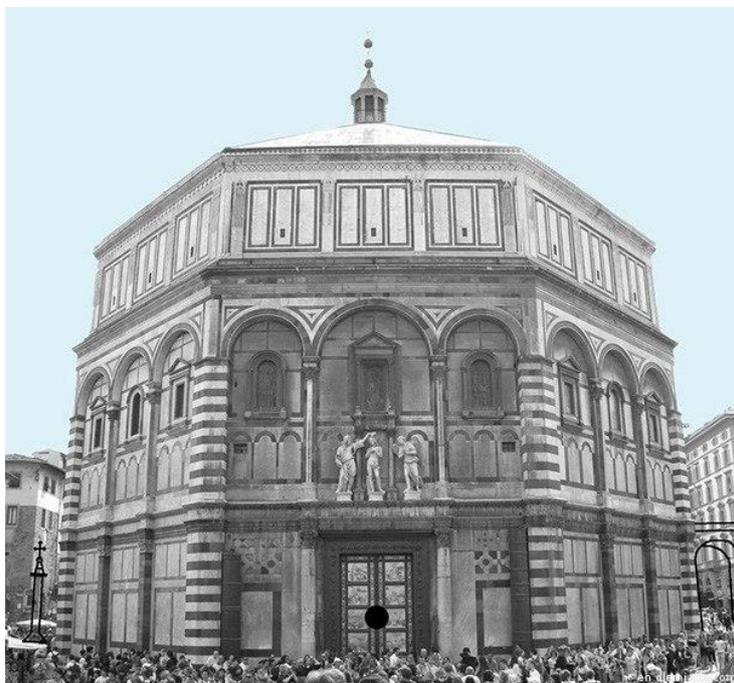
Un acantilado, o la ladera de una montaña, pueden ser lisas para ondas de radio de longitud de onda de 200m, pero no lo son para la luz visible, de longitud de onda del orden de  $10^{-7}$ m.

### *Reflexión especular y perspectiva*

¿Qué relación puede existir entre reflexión especular y perspectiva?

Desde la antigüedad, para representar en un plano de dos dimensiones los edificios tridimensionales, el artista debía utilizar la perspectiva y técnicas básicas para medir anchos, largos y alturas. Se valía de la triangulación, que se basa en la trigonometría de Euclides, hay registros de técnicas que utilizaban pequeños espejos colocados en el suelo o colgados de reglas verticales para obtener ópticamente dos triángulos semejantes, uno pequeño y otro grande, de forma de poder calcular por triangulación la medida que faltaba. Pero éste no es el único aporte de la reflexión a la perspectiva, algunos historiadores suponen que el descubrimiento de la perspectiva por Brunelleschi también puede haber estado atado a la reflexión especular.

El primer biógrafo de Brunelleschi, Antonio Manetti, fue el único que vio el experimento realizado por Brunelleschi en 1425, que está relacionado con lo que se llama “el descubrimiento de la perspectiva”.



*fig. 152 Baptisterio de San Juan*

Manetti nos cuenta este descubrimiento a través de dos obras que están desaparecidas hace mucho tiempo y que representan dos edificios de Florencia: el Baptisterio de San

Juan (fig. 152) y el Palacio de gobierno. El problema es que Manetti no cuenta cómo se llegaron a trazar esas obras, solamente expresa el enorme grado de fidelidad que conseguía Brunelleschi de forma sistemática, logrando lo que se llamaría “precisión científica”.

Los historiadores creen que el logro de esta precisión puede haber sido debida a los siguientes procedimientos:

- ➔ Habilidades planimétricas que se basaban en la triangulación.
- ➔ El uso de plantas y alzados a escala
- ➔ el uso de instrumentos elaborados como en astrolabio
- ➔ Las fórmulas geométricas de la ciencia óptica medieval
- ➔ Las técnicas proyectivas de la geografía de cosmología de Ptolomeo.
- ➔ Pintar directamente sobre la imagen del Baptisterio en un espejo.

No sabemos el método que utilizó Brunelleschi para crear la perspectiva, pero lo que sí se sabe con certeza es que la obra del Baptisterio, con la que nace la perspectiva científica está íntimamente ligada a la reflexión de la luz.

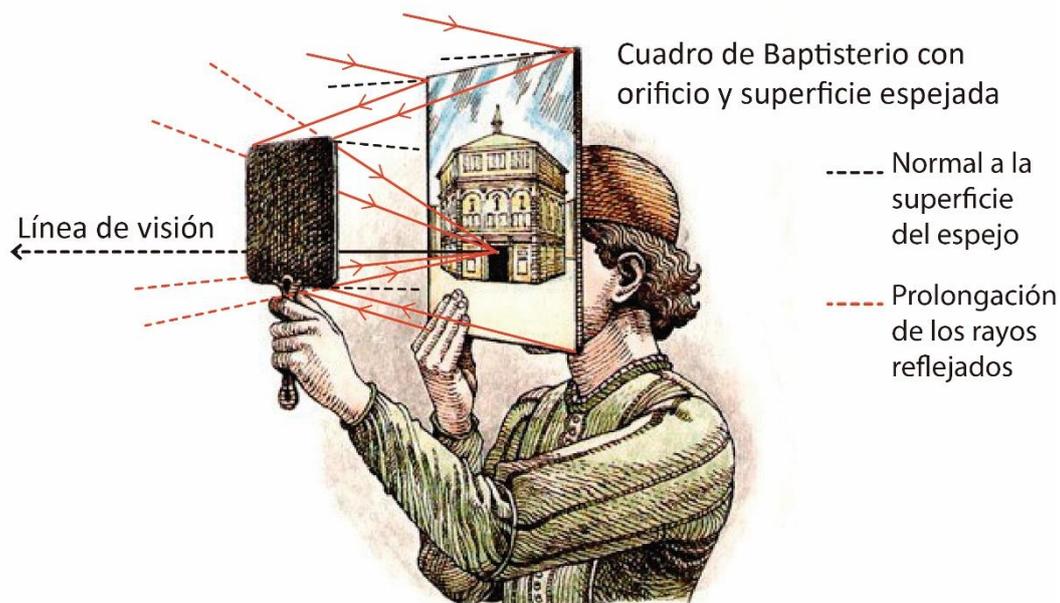


fig. 153 Experimento de Brunelleschi<sup>56</sup>

Con el fin de lograr que la obra del Baptisterio se viera con mayor realismo, Brunelleschi utilizó la reflexión especular dos veces. Pintó su obra con gran maestría y puso plata

<sup>56</sup> Intervención de la imagen obtenida de [olemiarte](http://www.olemiarte.com/blog/noticias/el-experimento-de-brunelleschi/) <http://www.olemiarte.com/blog/noticias/el-experimento-de-brunelleschi/>

bruñida, como superficie reflejante, donde debería haber pintado el cielo, de esta forma allí se veía el cielo real (zona que en la figura 152 aparece en celeste), e hizo un orificio atravesando el cuadro a la altura del punto de vista del observador. El espectador debería mirar desde la parte de atrás del cuadro, a través del orificio, la imagen del cuadro en un espejo (fig. 153).

Con esto Brunelleschi lograba un realismo mágico, las nubes reales, después de la doble reflexión de la luz que proviene de ellas, creaban imágenes virtuales que se movían y acentuaban la ilusión óptica.

Lo que vería el observador si llegara a superponer la imagen del cuadro con el edificio real, a la distancia adecuada, se esquematiza en la figura 154.

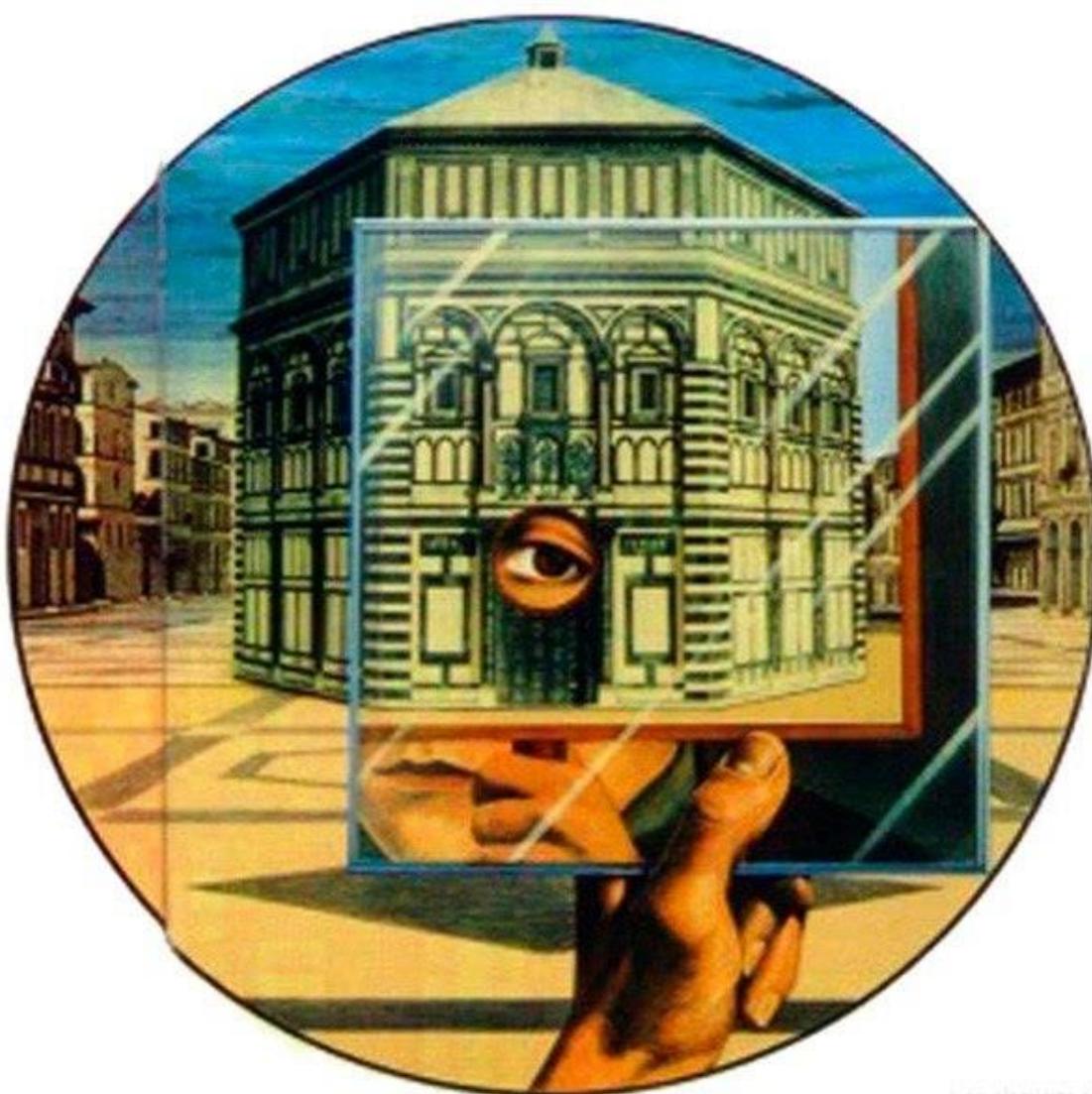
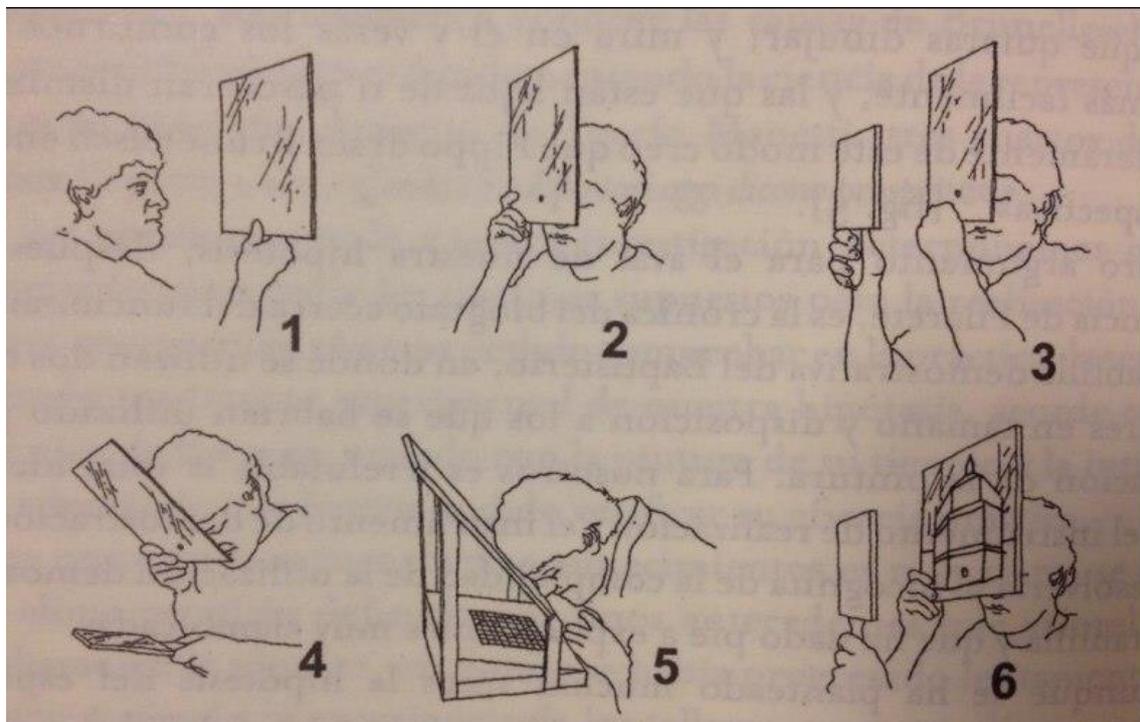


fig. 154 Experimento de Brunelleschi [Fuente de imagen](#)

Acerca de cómo Brunelleschi logró tanta precisión en una obra tan pequeña, existen algunas hipótesis que involucran la reflexión de la luz, una de ellas, de L. Cabezas Gelabert y J. C. Oliver Torelló y otra del artista inglés David Hockney.

### *Hipótesis de L. Cabezas Gelabert y J. C. OliverTorelló*

Estos autores suponen que Brunelleschi, para dibujar con tanta precisión el Baptisterio de San Juan, utilizó dos espejos planos como se muestra en el esquema de la figura 155.



*fig. 155 Esquema de la Hipótesis de L. Cabezas Gelabert y J. C. OliverTorelló*

La secuencia muestra que a uno de los espejos se le practica un pequeño orificio y se lo coloca a 45° con respecto a la horizontal de tal forma que la imagen del Baptisterio se ve reflejada en un segundo espejo más pequeño y cuadrado colocado como se muestra en el esquema de la figura 155 con el número cinco.

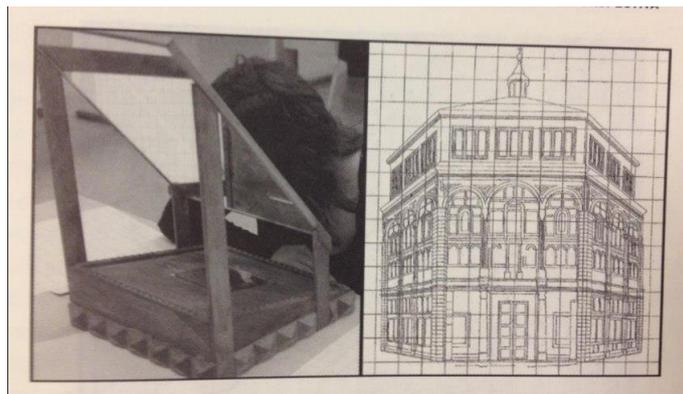


fig. 156 Dispositivo de Brunelleschi según la Hipótesis de L. Cabezas Gelabert y J. C. Oliver Torelló

Según esta hipótesis con este dispositivo, Brunelleschi veía a través del orificio algo semejante a lo que se muestra a la derecha en la figura 156 y dibujando en papel cuadriculado podía copiar perfectamente las formas del edificio y su perspectiva.

#### *Hipótesis de David Hockney y Charles M. Falco.*

David Hockney, artista inglés contemporáneo y el físico o Charles M. Falco presentan una nueva hipótesis, suponen que Brunelleschi obtuvo la obra a partir de la proyección de la imagen, utilizando un espejo cóncavo.

Desde dentro del edificio que está frente al Baptisterio (la catedral de Florencia), Hockney logra con un espejo cóncavo proyectar una imagen real del Baptisterio en un soporte de 30cm de lado y copiarla.

En el siguiente vídeo lo vemos explicado por el mismo David Hockney.

Video 12<sup>57</sup>

Estas dos hipótesis involucran al experimento de Brunelleschi con la reflexión especular, las dos incluyen espejos, en el primer caso dos espejos planos y en el segundo uno cóncavo. Si alguna de estas hipótesis es verdadera, Brunelleschi, además de valerse de la reflexión especular para atrapar al espectador con la mágica sensación de realidad, con nubes moviéndose, utilizó las mismas leyes físicas en “la invención de la perspectiva”.

### *El taller de Rafael y la reflexión*

Casi un siglo después de Brunelleschi, también en Italia, funcionaba el taller de Rafael Santi (o Rafael Sanzio), con 50 pupilos y ayudantes, posiblemente el mayor taller bajo la regencia de un único maestro de pintura. Prácticamente, todos los métodos nuevos de perspectiva se utilizaron y/o inventaron en el estudio de Rafael, manejaban la perspectiva de una forma brillante, pero existe poca información en cuanto a cómo se trabajaba en el taller.

Se hicieron varios trabajos donde se modificaba visualmente la arquitectura de un edificio a través de la pintura, elevando la altura de las bóvedas o creando columnas y bajorrelieves, generando la ilusión de que pertenecían a la arquitectura del edificio,

---

<sup>57</sup> El Lector puede ver este video en:

[https://www.youtube.com/watch?v=vwWY7pJ\\_rYQ](https://www.youtube.com/watch?v=vwWY7pJ_rYQ)

vemos una de estas obras de Rafael en la figura 157, un fresco que se encuentra en el Vaticano, Roma, donde Rafael da la ilusión de que la bóveda es más alta que la real, a través de columnas pintadas.



*fig. 157 1518-19 Fresco LOGGIA Palacio del Vaticano- Rafael.*

No existen documentos que acrediten con certeza qué técnica utilizó Rafael para lograr la extremadamente habilidosa perspectiva de las formas arquitectónicas en los ángulos de las bóvedas, pero junto a Rafael trabajó como asistente, en la concreción de los diseños del maestro, su joven discípulo Giulio Romano que aporta datos acerca de las técnicas del momento.

A la muerte de Rafael, Giulio Romano tenía sólo 21 años y siguió trabajando en el taller del maestro, llegó a ser un pintor y arquitecto muy reconocido y de él sí sabemos el método que utilizaba para la proyección perspectiva de arquitectura ilusionista en un techo: el método del espejo.

Y con ello, otra vez los artistas utilizan la reflexión especular en la técnica de perspectiva.

Su método consistía en construir un modelo de lo que querían representar que se colocaba sobre un espejo cuadrículado, se situaba el ojo en el lugar adecuado y se transcribía la imagen reflejada cuadrado por cuadrado a papel también cuadrículado.



*fig. 158*

Las figuras 158 a 161 son fotos de una maqueta que muestra el método del espejo de Giulio Romano para realizar la perspectiva de la arquitectura ilusionista en el techo.

En esta maqueta de la fig. 158 el espejo que utilicé es de vidrio grueso, si le llamamos **e** al espesor del vidrio, la imagen de la línea que tracé con marcador en el espejo, se verá a una distancia  $2e$  de la línea trazada, cuanto más fino es el vidrio utilizado para fabricar el espejo, más próximas estarán estas líneas. Si en lugar de un espejo fabricado con vidrio azogado, hubiera utilizado un espejo antiguo de metal pulido, veríamos una sola línea en lugar de la doble (la línea y su imagen en la superficie reflejante), porque el trazado se produce directamente sobre la superficie reflejante.

Los espejos de metal bruñido, generalmente cobre, plata o bronce, se dejaron de construir en el siglo XVIII, si Giulio Romano los utilizaba para su método del espejo, no tendría el inconveniente de las líneas dobles del cuadrículado que se ven en esta maqueta.

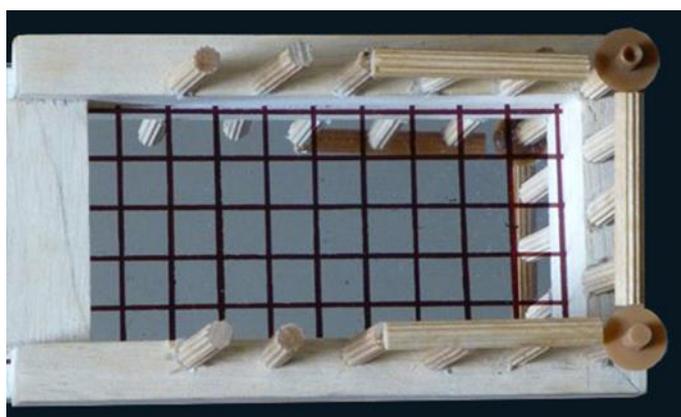


*fig. 159 Maqueta del método de Giulio Romano*



*fig. 160 Ampliación de la foto de la figura 159  
invertida verticalmente*

Para lograr algo más parecido a lo que sería trabajar sobre un espejo de metal pulido, coloqué la maqueta directamente sobre la parte azogada de un espejo cuadrado, en las figuras 159 a 161 vemos el resultado desde diferentes puntos de vista y la figura 160 es la misma foto de la fig. 159 invertida y algo ampliada donde se aprecia el cambio que se produce, al invertirla nos da la sensación de que estamos mirando las columnas desde abajo.



*fig. 161 Maqueta del método de Giulio Romano*

En la siguiente obra de Giulio Romano podemos ver algo parecido a lo mostrado en esta maqueta pero en forma circular.



*fig. 162 Caída de los gigantes Fresco de Giulio Romano*

Giulio Romano, fue el arquitecto de una de las obras que es emblema del manierismo, el Palacio del Té, que se encuentra en las afueras de Mantua, donde pintó CAÍDA DE LOS GIGANTES, que se muestra en la figura 162.

La CAÍDA DE LOS GIGANTES, es el fresco más famoso del manierismo en el que Giulio Romano cambia, con la pintura, la arquitectura de la habitación, creando ilusión de una cúpula, mucho más alta que el techo real.

Giulio, fue un estímulo para Veronese y los hermanos Cristoforo y Stefano Rosa, que utilizando las técnicas de perspectiva de Giulio, llegaron a ser los pintores más importantes del ilusionismo arquitectónico de Venecia.



*fig. 163 Veronés, fresco en el techo de la sala del Olimpo  
Villa Barbaro, Italia*

En la figura 163 vemos un ejemplo de arquitectura ilusionista de Veronés, un fresco realizado en el techo de la sala del Olimpo de Villa Barbaro, en Italia.



*fig. 164 LA SABIDURÍA  
Tiziano*

Otro ejemplo lo podemos ver en la zona más antigua de la biblioteca San Marcos, de Venecia, en el techo del vestíbulo, podemos observar la obra de Tiziano (figura 164), *LA SABIDURÍA*, enmarcada por la perspectiva ilusionista pintada por los hermanos Cristoforo y Stefano Rosa, que adoptaron las técnicas de Giulio, muchos otros artistas, utilizaron de esta técnica para crear este tipo de arquitectura fingida con la que se prolongaba la altura aparente los techos.

### *El espejo de Claude*

La reflexión especular, además de haber influido en la perspectiva, a fines del siglo XVIII y principios del XIX, fue utilizada como técnica para pintar paisajes.

Es esa época, cuando aún no se había inventado la cámara fotográfica, que nace con el descubrimiento de los elementos fotosensibles alrededor de 1830, era muy común que, así como ahora llevamos una cámara fotográfica cuando salimos de turismo, los viajeros llevaran en su equipaje “El espejo de Claude” que consistía en un espejo ligeramente convexo, con su superficie entintada, por lo general de sepia, negro o marrón y que se protegía en un estuche.

El entintado funcionaba como filtro, por lo que, desde ahora lo llamaré filtro.



*fig. 165 Espejo de Claude. 1775-1780  
The Victoria & Albert Museum, Londres*

En la figura 165 vemos la fotografía de un espejo de Claude que se conserva en The [Victoria & Albert Museum](#)<sup>58</sup>, en Londres. Fue construido entre 1775 y 1780 y es de cristal ennegrecido.

La imagen de un paisaje en un Espejo de Claude se vería como la fotografía en la figura 166 en el caso de que el filtro del espejo fuera negro. Se pierden las estridencias de color y el paisaje toma colores suaves, de grises coloreados.



*fig. 166 Experimentación con el Espejo de Claude, fotografía de Tintern Abbey*

Si cambiamos el color del filtro por sepia, se vería con una coloración semejante a la del cuadro de la figura 167.

El espejo de Claude debe su nombre a Claudio de Lorena, no porque conste que este artista lo utilizara, sino porque las imágenes de los paisajes, vistos a través de este espejo, adquirirían una coloración semejante a los cuadros de este reconocido paisajista.

Claudio de Lorena o en francés Claude Lorrain, nació en el año 1600 en Francia, vivió en Italia, fue muy famoso por sus paisajes y por la coloración que lograba, innovó en el género paisajístico, creando paisajes idealizados, donde lo primordial estaba en la utilización de la luz, evocando un paisaje ideal, perfecto, que ejerció su influencia en los jardines ingleses.

---

<sup>58</sup> <http://collections.vam.ac.uk/item/O78676/claude-glass-unknown/>



*fig. 167 PAISAJE CON SAN ONOFRE, Claudio de Lorena.*

En la obra: PAISAJE CON SAN ONOFRE, (fig. 167) pintado por Claudio de Lorena en 1638, que se conserva en el Museo Nacional del Prado en Madrid, podemos apreciar la coloración típica de los paisajes de Claudio de Lorena donde los colores pierden intensidad, se ven atenuados como si miráramos el paisaje a través de un filtro, similar a las imágenes en un espejo teñido.

Como dijimos, a fines del siglo XVIII y principios del siglo XIX, el espejo de Claude fue muy utilizado, no solamente por los viajeros, que podían observar la imagen del paisaje en el espejo disminuida en tamaño y ver todo a la vez, como quien mira una fotografía, sino que también fue utilizada por los pintores para obtener bosquejos de los paisajes, ya que una amplia zona se veía reducida en el espejo convexo a una pequeña superficie como el papel, también fue utilizado para hacer apuntes de colores y lograr paisajes con los colores atenuados al estilo de Claudio de Lorena.

El pintor que utilizaba este método debería colocarse de espaldas al paisaje que quería representar, con la superficie reflejante del espejo apuntando hacia el paisaje, y mirar la imagen en el espejo como lo representa, Thomas Gainsborough en la obra "ARTISTA CON EL ESPEJO DE CLAUDE" que se conserva en el British Museum de Londres (figura 168)



fig. 168 Thomas Gainsborough, "ARTISTA CON EL ESPEJO DE CLAUDE"

En el espejo de Claude tenemos la aplicación en la pintura de los fenómenos físicos:

- ➔ Reflexión especular y formación de imágenes en espejos curvos.
- ➔ Propagación de la luz a través de filtros, ya que la capa de tinta actúa como un filtro de color.

### *Espejos curvos en el arte de los siglos XV y XVI*

Los espejos curvos fueron utilizados en el arte, no sólo como técnica para copiar y hacer bosquejos, sino que fueron introducidos en las obras como elementos que formaban parte de la escena. Veamos dos ejemplos:

RETRATO DE GIOVANNI ARNOLFINI Y SU ESPOSA o EL MATRIMONIO ARNOLFINI de Jan van Eyck, una de las obras más conocidas en historia del arte, que actualmente se encuentra en la National Gallery de Londres y AUTORRETRATO ANTE EL ESPEJO de Parmigianino.



fig. 169 EL MATRIMONIO ARNOLFINI,  
JAN van Eyck

Veremos EL MATRIMONIO ARNOLFINI, porque fue la primera obra donde aparece pintado un espejo convexo y AUTORRETRATO ANTE EL ESPEJO, porque es una obra muy significativa en la historia del arte manierista donde Parmigianino, uno de los máximos exponentes del manierismo (que se caracteriza por la deformación de las figuras), utiliza en este caso el espejo para la deformación de su propia imagen.

En EL MATRIMONIO ARNOLFINI, obra de la que ya vimos un detalle cuando trabajamos en reflexión difusa, van Eyck representa un espejo convexo, según se cree, ésta es la primera vez que se usa el espejo convexo como recurso pictórico, aumentando la profundidad e incluyendo en el cuadro lo que se encuentra delante de la escena pintada. Esta idea tuvo mucho éxito y fue imitada por otros artistas.

El uso de estos espejos era habitual en aquella época, se colocaban junto a ventanas y puertas porque se creía que espantaban la mala suerte y se les llamaban “brujas”.



*fig. 170 Detalle de EL MATRIMONIO ARNOLFINI,  
Jan van Eyck*

En el fondo de esta obra, el artista escribe, con caracteres góticos entrelazados, como si fuera un graffiti “Jan van Eyck estuvo aquí 1434” y pinta un espejo convexo donde se ven las imágenes de dos figuras además de las del matrimonio, una de las figuras, el vestido de azul puede ser el pintor que aparece como testigo de la escena y el otro el espectador que contempla la obra, representando la imagen virtual en el espejo, el artista integra al espectador en la obra. En la figura 170 se muestra un detalle del fondo del cuadro donde aparece el espejo convexo.

Esta obra sin duda tuvo su influencia en otros artistas como Velázquez, que en *LAS MENINAS*, *LAS HILANDERAS* o *LA VENUS DEL ESPEJO*, al igual que van Eyck en esta obra, muestra varios puntos de vista superpuestos.



fig. 171 "AUTORRETRATO EN UN ESPEJO CONVEXO", 1524  
Parmigianino

En la figura 171 vemos la obra "AUTORRETRATO EN UN ESPEJO CONVEXO", pintada en 1524 por Parmigianino, con óleo, sobre una tabla circular de 24 cm de diámetro, cuya superficie copiaba exactamente la forma curva de la superficie del espejo que utilizó para la realización de esta obra, el tamaño de la tabla también coincidía con el del espejo.

Parmigianino pinta su imagen con la deformación producida por el espejo curvo, en un soporte que imita la forma del espejo, la obra pasa a ser una imitación de lo que ve el artista mientras realiza el acto de pintar, representa a la vez un experimento con la ciencia de la óptica y el arte de la perspectiva, el artista lo pintó con sólo 21 años como carta de presentación ante el Papa Clemente VII.

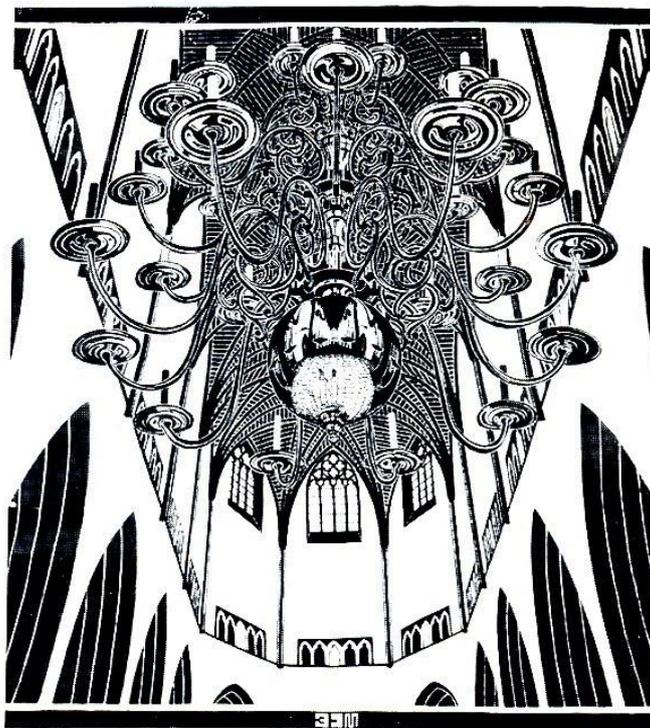
En el siglo XVI estaba muy de moda entre los pintores el juego entre la perspectiva y la ciencia de la óptica, se multiplicaban los cuadros que representaban juegos ópticos, pensados para ser mirados desde diferentes puntos de vista, y muchos de ellos, cambiaban su forma dependiendo desde donde se los mirara, fue una característica del manierismo, es el gusto por la transformación y cambio, este gusto dio paso luego al barroco.

Los artistas siguieron utilizando, muchos magistralmente, la reflexión especular, a veces como herramienta, otras como modelo o como forma expresiva. Utilizaron los efectos de la reflexión, no solo en espejos, sino con la representación de múltiples superficies reflejantes, desde la superficie del agua, los reflejos en superficies metálicas, en los elementos de cristal de un bodegón o los ojos de las personas, dándonos idea muchas veces, de la textura de una superficie a través de los reflejos que se producen en ella.

### *M. Escher y la reflexión*

Adelantémonos varios siglos, para considerar el uso de la reflexión especular por parte de los artistas en tiempos más próximos.

Veremos como ejemplo obras de M. Escher, porque desde sus primeras obras utiliza la reflexión especular para expresarse, y algunas esculturas de artistas contemporáneos, como prueba de que el uso de la reflexión especular no ha perdido vigencia en el mundo del arte actual.



*fig. 172 SAN BAVÓN, HAARLEM, Tinta china  
Escher 1920*

Cuando miramos una imagen virtual en un espejo o superficie reflejante, vemos esta imagen en el lugar que en realidad ocupan otros cuerpos. Cuando vemos el paisaje y nuestra propia imagen reflejada en un charco, vemos estas imágenes en el lugar donde en realidad hay tierra, es como si existiesen al mismo tiempo dos mundos distintos en el mismo espacio físico, tenemos la sensación de estar frente a algo mágico. Escher, a partir de 1934 hizo dibujos en los que buscaba esta simultaneidad, logrando representar en un mismo dibujo dos y hasta tres mundos que tienen lugar al mismo tiempo, el motivo de los espejos convexos fue de gran utilidad para lograr este efecto deseado.

En la obra más temprana de Escher, de 1920, cuando todavía concurría a la escuela de Arquitectura y Artes Haarlem, ya vemos, debajo de un gran candelabro, una esfera muy pulida que refleja las imágenes de la catedral. En esta obra, que vemos en la figura 172, realizada en tinta china aplicada a pluma sobre una gran hoja de más de 1m de largo, Escher, ya demuestra su interés por representar varios mundos en un mismo espacio valiéndose de la reflexión, en este caso en una superficie curva. También utiliza, desde sus comienzos como artista, la reflexión especular en espejos planos, como en otra de sus obras realizada cuando aún concurría a la escuela de Arquitectura y Artes Haarlem; **AUTORRETRATO SENTADO** (figura 173), un grabado en madera, bastante peculiar en cuanto a la ubicación del espejo para la ejecución de la obra.

Por lo general los autorretratos se hacen frente a un espejo vertical, colocado frente al artista, para lograr este autorretrato Escher colocó el espejo en posición oblicua, apoyado sobre el borde de la cama, lo que produce la modificación en las relaciones entre las partes del cuerpo.



*fig. 173 Grabado, AUTORRETRATO SENTADO,  
Escher.*

Escher estuvo siempre interesado en el tema de la simultaneidad, en la mezcla de distintos mundos que se fusionan, y a medida que pasa el tiempo sus soluciones resultan cada vez más convincentes, logra dibujos de gran calidad y belleza como lo son ONDULACIONES EN EL AGUA, grabado en linóleo, de 1950 y TRES MUNDOS, litografía de 1955.

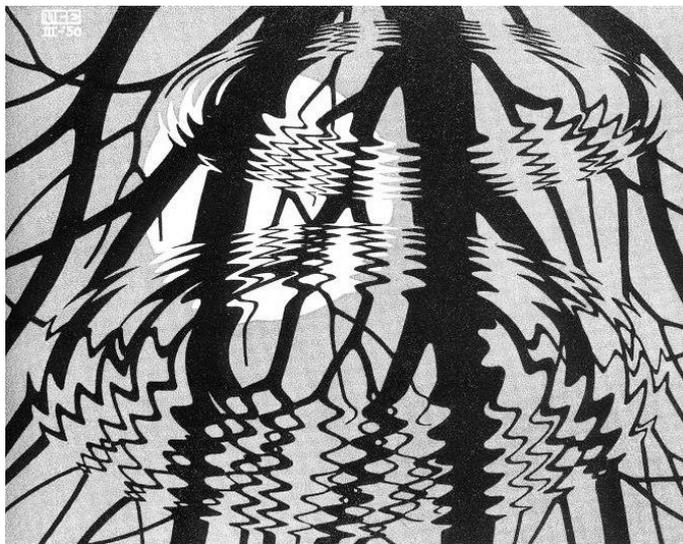


fig. 174 ONDULACIONES EN EL AGUA,  
Escher

En la obra ONDULACIONES EN EL AGUA, que vemos en la figura 174, Escher representa en el plano del papel dos mundos a la vez, la superficie del agua, que se hace visible solo porque en ella caen dos gotas que generan ondulaciones concéntricas, transformando en sinusoides los reflejos de las ramas de los árboles deshojados, y la imagen de lo que se encuentra sobre la superficie del agua: los árboles, el cielo y un sol pálido que acentúa la sensación invernal.

La propagación de las ondas en círculos concéntricos en la superficie del agua, de acuerdo a la perspectiva, se transforma en dos elipses que tienen la misma excentricidad.



fig. 175 Litografía, *TRES MUNDOS*,  
Escher 1955.

En su litografía *TRES MUNDOS*, que vemos en la figura 175, el artista logra fusionar el mundo que se encuentra bajo la superficie del agua, con la superficie, a través de las hojas caídas que flotan y con el mundo que se encuentra arriba de la superficie del agua, valiéndose de la reflexión especular.

Esta obra demuestra el conocimiento de Escher en cuanto al comportamiento de la luz, el pez está colocado en la zona en la cual, la luz que refleja, incide en la superficie de separación agua-aire con un pequeño ángulo de incidencia,  $\alpha$  en el esquema de la figura 176, de tal forma que puede atravesar la superficie y lo vemos desde el aire. Si el pez estuviera colocado más alejado, (arriba en el cuadro), que corresponde a la posición B en la figura 176, el ángulo de incidencia  $\beta$ , podría llegar a ser mayor que el ángulo límite y estaríamos frente al fenómeno de reflexión total interna, entonces, la luz reflejada en el pez regresa al agua y no lo podríamos ver desde el aire.

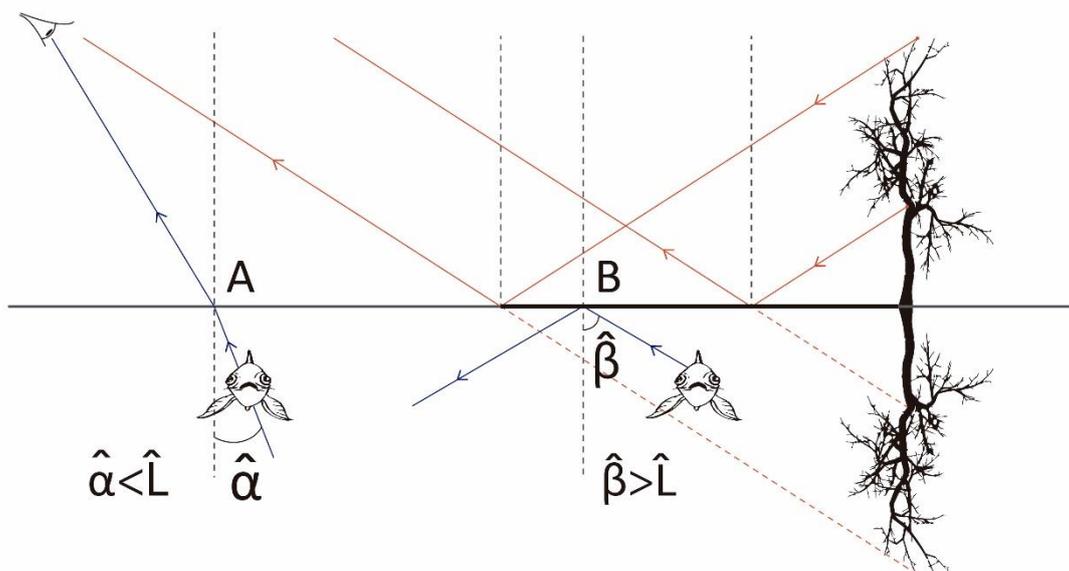


fig. 176 Esquema de reflexión en TRES MUNDOS

Para saber desde que posiciones podemos ver el pez mirando desde afuera del agua, determinemos cuánto vale ángulo límite  $\hat{L}$  entre el agua y el aire.

Sabemos que el ángulo límite se determina como:

$$\sin \hat{L} = \frac{n_2}{n_1}$$

Donde  $\hat{L}$  es el ángulo límite,  $n_2$  el índice de refracción del aire y  $n_1$  índice de refracción del agua, puesto que para que veamos el pez, la luz debe pasar del agua al aire.

Supongamos que el índice de refracción del agua del estanque que representa Escher es  $n_{\text{agua}}=1,33$

Recordemos que el índice de refracción es un cociente entre dos velocidades, por lo que no tiene unidades.

$$\hat{L} = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$$

Sustituyendo por los valores

$$\hat{L} = \sin^{-1} \left( \frac{1,0}{1,33} \right)$$

$$\hat{L} = \sin^{-1} 0,75$$

$$\hat{L} \cong 49^\circ$$

Por lo que si el ángulo  $\beta$  en la figura 176 es mayor a  $49^\circ$ , se produce la reflexión total interna y no se podría ver el pez desde la posición del observador en el cuadro, por lo tanto, Escher coloca al pez en el único lugar que, de acuerdo al comportamiento físico real de la luz, puede ser visto por el espectador.

Escher nos proporciona múltiples ejemplos de reflexión especular en su obra donde utiliza espejo planos, curvos, superficies reflejantes sólidas y líquidas, que en algunos casos se dejan ver como objetos que forman parte de la obra, y en otros, sólo vemos la imagen reflejada en dicha superficie.



fig. 177 Litografía *NATURALEZA MUERTA CON ESPEJO*,  
Escher, 1934

En la Litografía *NATURALEZA MUERTA CON ESPEJO*, realizada en 1934, Escher insinúa la compenetración de dos mundos mediante la imagen reflejada en un espejo plano de

tocador que en este caso se muestra como objeto formando parte de la obra, mostrándonos la imagen virtual del paisaje circundante.

Esta obra es la única que no está vinculada con ningún período en particular de la producción del artista, pero ya deja ver su mundo imaginario, la unión de dos mundos, y algo de sus figuras imposibles que serán características de la obra posterior, ya que no vemos en el espejo la imagen virtual de la vela que se encuentra en primer plano en la litografía y el espejo no nos devuelve la imagen de la alcoba sino el de una calle estrecha que se introduce en el universo de la alcoba.

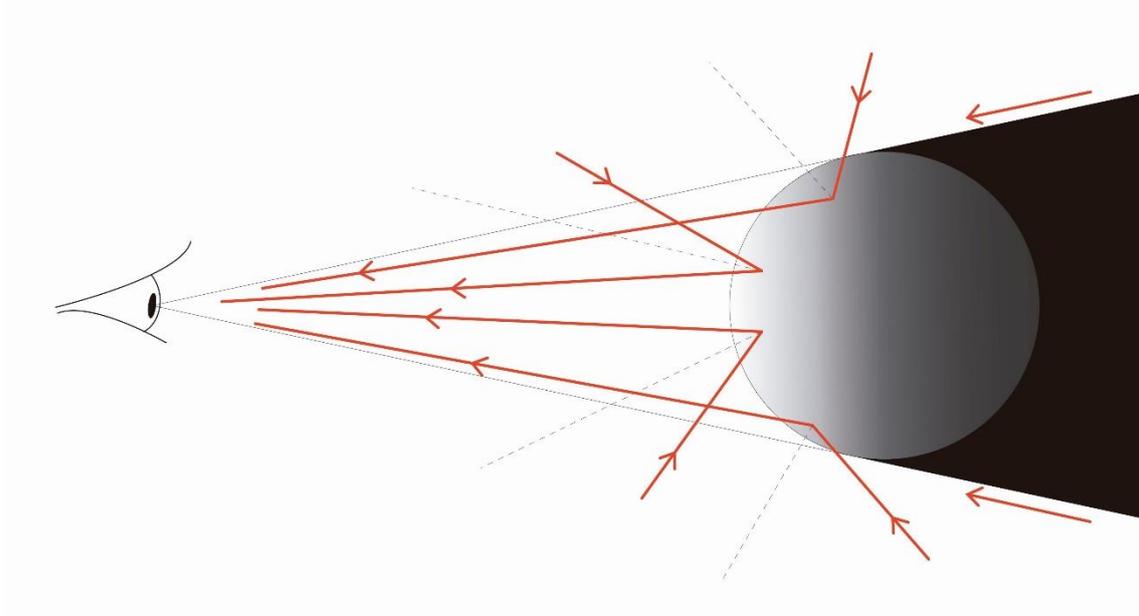


*fig. 178 Litografía, MANO CON ESFERA REFLEJANTE, Escher, 1935.*

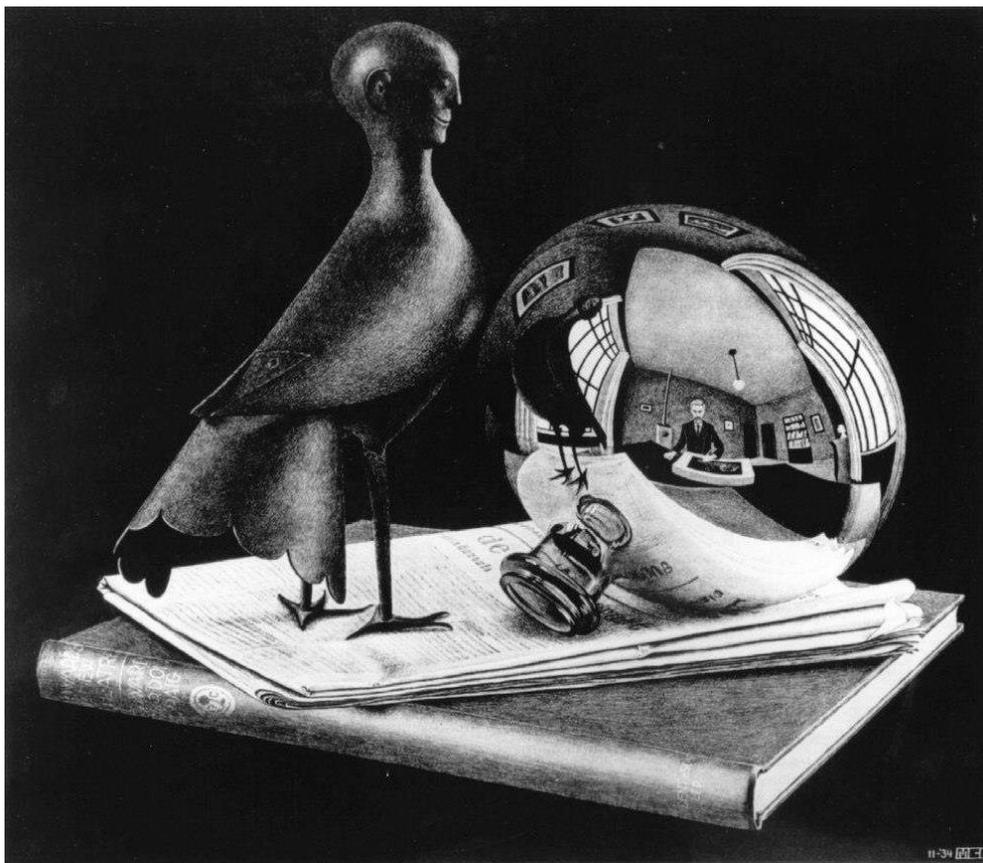
En la obra “MANO CON ESFERA REFLEJANTE”, litografía, realizada en el año 1935, Escher se vale de la reflexión en superficies curvas para mostrar sus dos mundos. El hombre que se ve reflejado en la esfera con todo su entorno es el propio artista que hace coincidir el ojo que observa con el centro de la esfera (figura 178).

En esta imagen Escher sostiene además de la esfera reflectante todo lo que aparece en ella reflejado.

En una esfera con superficie muy pulida, se refleja todo lo que tiene alrededor, podríamos decir que “abarca el universo”, si la miramos de un lado vemos todo lo que está de ese lado, no se ve, solamente lo que queda tapado por la propia esfera, oculto tras ella, ya que es un cuerpo opaco (figura179) .

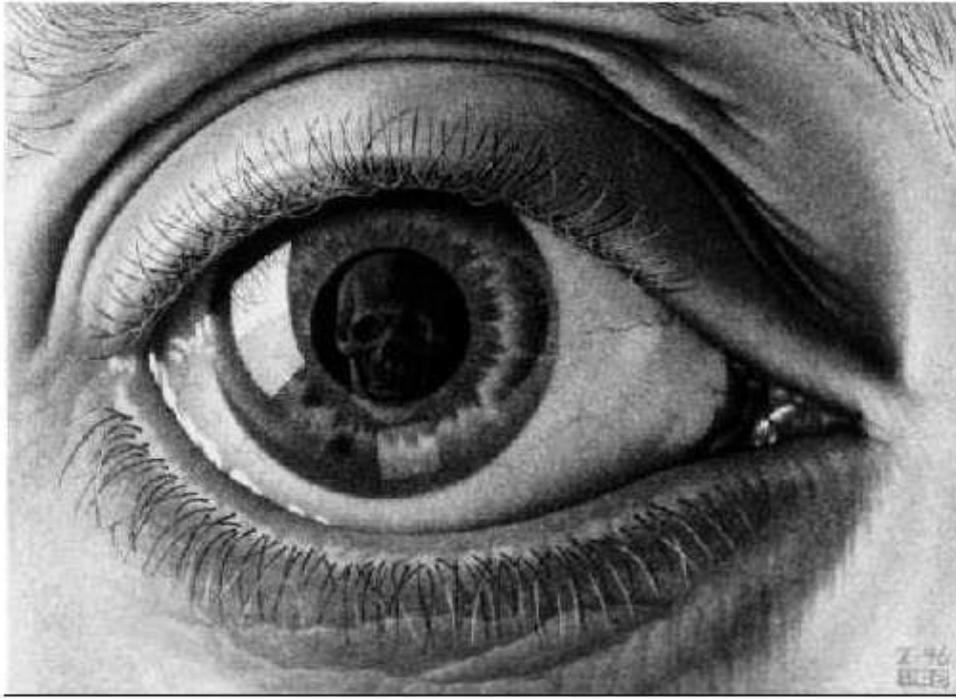


*fig. 179 Esquema de reflexión especular en esfera*



*fig. 180 Litografía, NATURALEZA MUERTA CON ESFERA REFLEJANTE,  
Escher 1934,*

En Naturaleza muerta con esfera reflejante, nuevamente se vale de la reflexión en superficies curvas para mostrar los mundos simultáneos, donde en una porción pequeña de espacio, como el volumen de un tintero, está, a la vez, el universo entero; y el artista es parte de él.



*fig. 181 Media tinta, OJO,  
Escher 1946*

En la figura 181 vemos la media tinta<sup>59</sup> realizada por Escher en 1946, titulada OJO donde nuevamente utiliza la reflexión como recurso expresivo para representar tres mundos en un pequeño plano de 19,8cm x 14,1 cm.

---

<sup>59</sup> El “grabado a media tinta” es una forma de realizar grabados que logra reproducir matices y claroscuros, se trabaja con una plancha a la que se deja rugosa para producir los plenos negros, se va suavizando para producir los medios tonos, y se bruñe para conseguir blanco. Al entintar la plancha, la tinta penetra en los orificios de la parte rugosa para luego ser transferida al papel en el proceso de prensado.

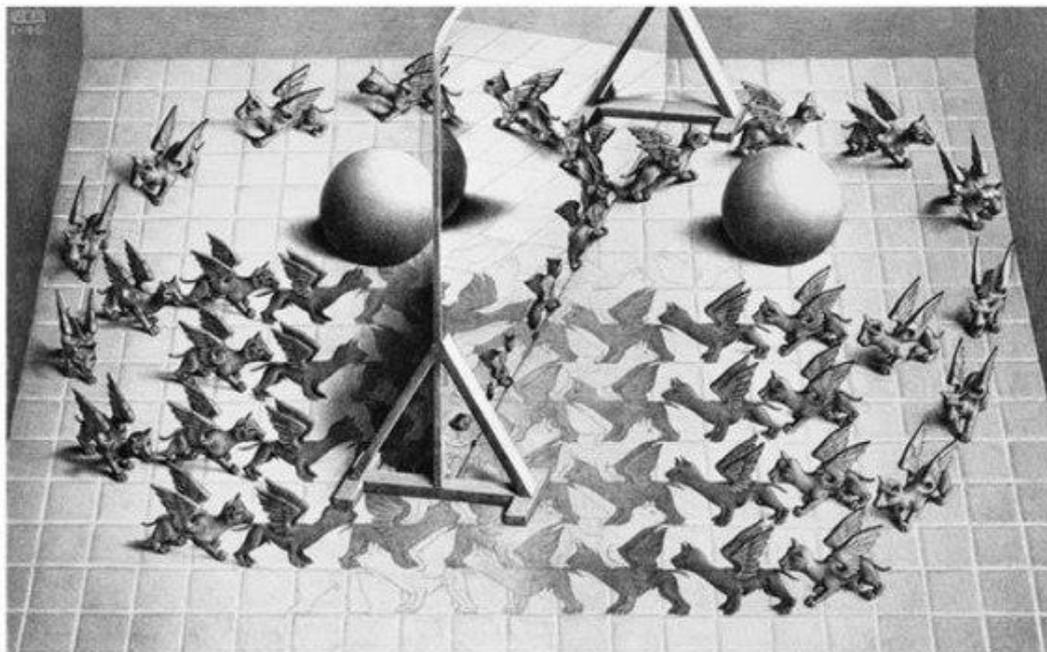


fig. 182 Litografía, EL ESPEJO MÁGICO  
Escher 1946

Continuando con Escher y la reflexión observemos en la figura 182 la litografía titulada EL ESPEJO MÁGICO, obra que da nombre al libro escrito por el matemático Bruno Ernst: EL ESPEJO MÁGICO DE M.C. ESCHER.

Por ser ésta la obra que da nombre a su libro, transcribo textualmente lo que dice Ernst acerca de ella, además, Ernst fue amigo de Escher, estaba familiarizado con sus ideas, y lo que redactó fue revisado por el propio Escher:

*“En la litografía el espejo mágico de 1946, Escher fue todavía más lejos. No sólo vemos un espejo sino que además se sugiere que las imágenes reflejadas adquieren vida y que dicha vida continúa en otro mundo. Uno recuerda enseguida la historia de Alicia en el País de las Maravillas.*

*En el ángulo inferior izquierdo del espejo, debajo del soporte, vemos surgir un ala diminuta, así como su imagen reflejada en el espejo. Si seguimos mirando el espejo, veremos como sale, poco a poco, de él un perro alado. Pero esto no es todo. También la imagen reflejada ha sufrido los mismos cambios: y así como el perro verdadero se aleja del espejo su imagen hace lo propio en la dirección opuesta. Llegado al borde del espejo, el reflejo parece incorporarse al mundo real. Las dos filas de perros duplican su número dos veces en una avanzada, en el curso de la cual terminan convirtiéndose en una superficie partida periódicamente; los perros blancos se convierten en negros y viceversa. De un espejo nacen realidades y un mero reflejo se torna detrás del espejo en realidad.*

*El extraño carácter de esta transformación se ve acentuado por las dos esferas situadas delante y detrás del espejo.”<sup>60</sup>*

*Bruno Ernst*

### *Reflexión especular en el arte contemporáneo*

Como último punto del tema reflexión especular, veremos algunas esculturas de tres artistas contemporáneos que se valen de la reflexión como medio expresivo, elegí a Jeppe Hein por sus esculturas con espejos planos, a Anish Kapoor por sus superficies reflejantes curvas, los dos tienen grandes esculturas e instalaciones donde la protagonista fundamental es la reflexión.

Como tercer artista contemporánea, veremos una obra de Kimsooja porque sus espectaculares obras son la física aplicada magistralmente: reflexión, difracción y sonido....



*fig. 183 Jeppe Hein proyecto Sígueme, Bristol*

Jeppe Hein es un artista danés, nacido en 1974 en Dinamarca, conocido por sus obras interactivas, que se sitúan entre arte, arquitectura e invenciones tecnológicas. Sus obras

---

<sup>60</sup> Pág. 77 Bruno Ernest –El espejo mágico de M.C. Escher- Ed. Taschen Alemania 1992

cautivan a los espectadores a los que el artista coloca en el centro de los acontecimientos. El espectador se percibe junto al espacio circundante a través de su imagen virtual en espejos planos, formando parte de la obra.



*fig. 184 Proyecto SÍGUEME, BRISTOL,  
Jeppe Hein*

Las figuras 183 a 185 muestran fotografías del PROYECTO SÍGUEME, de Jeppe Hein, Instalación permanente en la Universidad de Bristol, Reino Unido, ejecutada en el año 2009, cuyas dimensiones son 6,0m x 6,0m de base y 2,20m de altura, realizada en acero inoxidable súper pulido, de tal manera que se transforma en una superficie reflejante a la que el artista llama súper-espejo.



*fig. 185 Proyecto SÍGUEME, BRISTOL*

Jeppe Hein

Jeppe Hein presenta esta obra con un texto, que después de la traducción se transforma aproximadamente en:

*“Equidistantes láminas de espejo de pie en el parque de la Universidad de Bristol, en la forma de un laberinto cuadrado de 6 x 6 m. Después de entrar en el laberinto de espejos, los visitantes pueden seguir el pasillo hacia el centro de la plaza, sólo para ser llevados de nuevo al otro lado. Las superficies de espejos reflejan no sólo los espectadores y su entorno, sino también los espejos adyacentes. El espacio físico es visible a la distancia entre las láminas verticales, y se inserta entre las imágenes de espejo. Por tanto, la reflexión multifacética produce una vista fragmentada del espacio, que rodea al espectador con un entorno desconocido y desorientador similar a la de un laberinto.”<sup>61</sup>*

Los invito a ver un video de la construcción de una de sus obras en Art Park Ordrupgaard que es un proyecto en el que artistas de renombre internacional crean obras en el parque de los alrededores del museo.



Video 13 Reflexión en Art Park  
Ordrupgaard<sup>62</sup>

<sup>61</sup> <http://www.jeppehein.net/pages/works.php>

<sup>62</sup> El Lector puede ver este video en: <https://www.youtube.com/watch?v=t5SIwBPMIj0>

Pasemos ahora a ver la reflexión sobre superficies curvas en obras de Anish Kapoor, escultor nacido en Bombay en 1954, es uno de los escultores hindúes más reconocidos de su generación que vive y trabaja en Londres.



*fig. 186 EL GRAN ÁRBOL Y EL OJO,  
Anish Kapoor*

En la figura 186 vemos la obra EL GRAN ÁRBOL Y EL OJO, realizada en acero inoxidable y acero al carbono en el año 2009, de 13m x 4.4m x 4.4 m y que se encuentra en el exterior del museo Guggenheim de Bilbao.

Está construido con 73 esferas reflejantes asentadas sobre tres ejes. Las superficies de las esferas reflejan el entorno y se reflejan entre sí, creando y disolviendo simultáneamente, el espacio circundante a medida que nos movemos. Las múltiples imágenes cambian continuamente, son inestables, y el artista nos da una visión de lo efímeras que son nuestras percepciones, y por extensión, nuestro mundo.



*fig. 187 "PONIENDO EL MUNDO AL REVÉS, JERUSALÉN",  
Anish Kapoor*

En la figura 187 vemos la obra de Anish Kapoor titulada PONIENDO EL MUNDO AL REVÉS, JERUSALÉN que se encuentra en los exteriores del museo de Israel desde el año 2010, es una superficie curva, espejada, con forma semejante a la de un reloj de arena, que nos muestra la imagen invertida del paisaje y los espectadores, además de producirse una doble reflexión en cada uno de sus extremos.

Otra obra monumental de este artista se encuentra en el Millennium Park, ubicado en Chicago, estados Unidos, y se titula PUERTA A LAS NUBES. la vemos en las figuras 188 y 189.



*fig. 188 PUERTA A LAS NUBES,  
Anish Kapoor*



*fig. 189, PUERTA A LAS NUBES,  
Anish Kapoor*

PUERTA A LAS NUBES fue construido entre 2004 y 2006, su exterior es de 168 placas de acero inoxidable pulido soldadas entre sí, tiene 10 metros de altura, la base es de 20 m × 13 m, pesa 99,8 toneladas y su forma y brillo está inspirado por el mercurio, que es líquido a temperatura ambiente, es como una gigantesca gota de mercurio.

Su exterior pulido refleja y distorsiona la ciudad. Los visitantes caminan alrededor y debajo del arco de 3,70 m de alto que contiene una cámara cóncava llamada "ombligo",

donde las imágenes se ven distorsionadas de una forma diferente. Lo podemos ver en el video 14



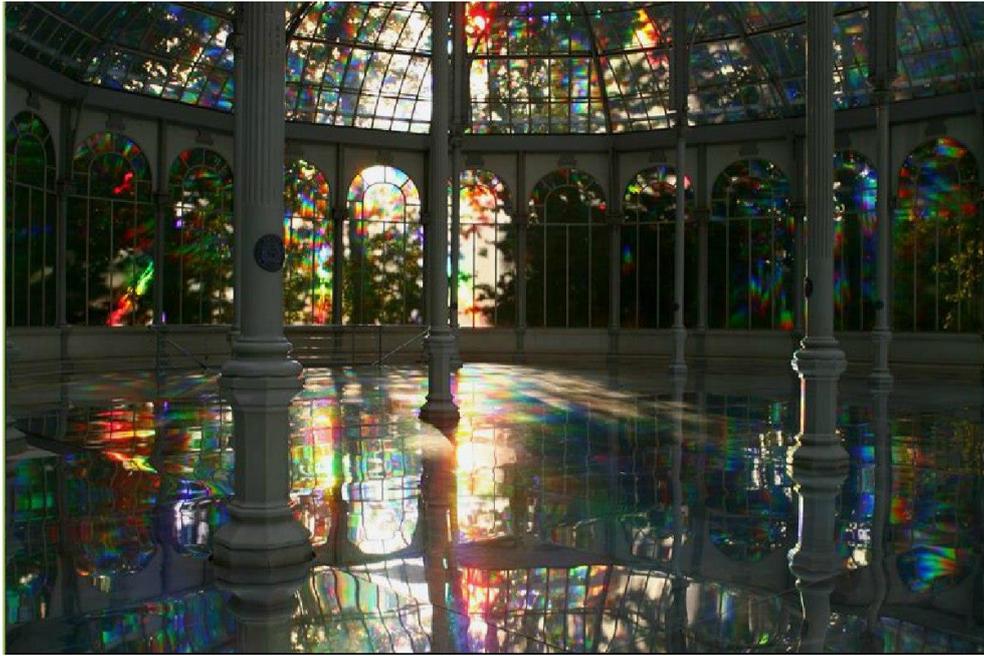
*Video 14 PUERTA A LAS NUBES  
Anish Kapoor<sup>63</sup>*

La última obra que vemos como ejemplo de aplicación de reflexión especular en el arte contemporáneo es RESPIRAR-UNA MUJER ESPEJO DE la artista, Kimsooja, nacida en 1957 en Corea, pero que vive en Nueva York.

---

<sup>63</sup> El Lector puede ver este video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=w2YNQt3zF2g>



*fig. 190 RESPIRAR-UNA MUJER ESPEJO*  
*Kimsooja*

Esta artista, creadora de sensaciones, tiene como objetivo principal, que el público lleve a cabo una experiencia transformadora y única, en la que mente, sentidos, conciencia e imaginación se vean afectados, y lo logra valiéndose en este caso de tres fenómenos físicos: la difracción, con la que logra crear un ambiente multicolor, la reflexión y el sonido.



*fig. 191 RESPIRAR-UNA MUJER ESPEJO,  
Kimsooja*

Con la reflexión todo se multiplica, la realidad y su imagen virtual se funden y logra una mayor amplitud y unión del espacio.

El resultado final son deslumbrantes arco iris que surgen desde dentro del palacio confundiendo realidad y fantasía.



*fig. 192 RESPIRAR-UNA MUJER ESPEJO,  
Kimsooja*

“Kimsooja ha realizado una instalación para el Palacio de Cristal formada por una intervención en el espacio y una pieza de sonido. La artista ha querido que la estructura arquitectónica del edificio forme un todo unitario. Con los mínimos elementos, una película de difracción translúcida que cubre toda la estructura acristalada del palacio, un espejo que recorre el suelo y el sonido de su respiración, sumerge al visitante en una experiencia transfiguradora en la que le invita a experimentar con la mente y los sentidos y a activar sus percepciones sensoriales y su imaginación”<sup>64</sup>

## REFRACCIÓN

Si bien hay muchos artistas que de una u otra manera demuestran su conocimiento acerca de este fenómeno físico a través de su obra, representando sus efectos en objetos transparentes, como herramienta, utilizando lentes o en los materiales y técnicas practicadas en la ejecución de la obra, trataré de continuar trabajando al principio, a partir de obras y artistas que ya hemos nombrado para incorporar otros al final de este tema.

---

<sup>64</sup> Comentario de la obra en el Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía Palacio de Cristal, Parque del Retiro, Madrid, [Link:](#)

<http://www.museoreinasofia.es/exposiciones/kimsooja-respirar-mujer-espejo-breathe-mirror-woman>

Jan Van Eyck también nos demuestra, a través de su obra, el conocimiento del comportamiento de la luz al atravesar cuerpos transparentes, además de ser un gran maestro como artista, era un intelectual, teólogo y científico, un perfecto conocedor de la óptica y de la catóptrica<sup>65</sup>, lo que le permitía crear una ilusión perfecta del espacio tridimensional.

Recordemos que cuando trabajamos el tema sombras, también nos apoyamos en una obra de Jan van Eyck<sup>66</sup>, lo que reafirma la idea de que este artista poseía un vasto conocimiento acerca de la física de la luz, o se valía de medios ópticos para la ejecución de su obra, lo que también significa que Jan van Eyck dominaba la rama de la física que estudia las leyes y los fenómenos de la luz, o sea la óptica.



fig. 193 detalle de EL MATRIMONIO ARNOLFINI de Jan van Eyck fig. 194 detalles de EL MATRIMONIO ARNOLFINI

<sup>65</sup> Parte de la óptica que estudia la reflexión de la luz.

<sup>66</sup> Figura 82 DÍPTICO DE LA ANUNCIACIÓN

Observemos en la figura 193 y 194 detalles de la obra que ya vimos como ejemplo, cuando trabajamos reflexión difusa y reflexión especular: EL MATRIMONIO ARNOLFINI.

En el fondo del cuadro, a la izquierda del espejo convexo, se halla un rosario de cuentas transparentes colgado en la pared, si observamos detenidamente la representación de las cuentas del rosario vemos la aplicación perfecta de las leyes de reflexión y refracción en cada cuenta, que parece ser de vidrio o cristal.

Comparemos las cuentas representadas en el cuadro con la fotografía de una cuenta de vidrio transparente, en condiciones de iluminación parecidas a las que se ven en el cuadro. (Fig. 195)

En el cuadro, al igual que en la fotografía se ven para cada cuenta tres zonas intensamente iluminadas, dos en la cuenta y otra dentro de la zona de sombra proyectada en la pared.



fig. 195 Fotografía de una bolita de vidrio transparente



fig. 196 Detalle del MATRIMONIO ARNOLFINI

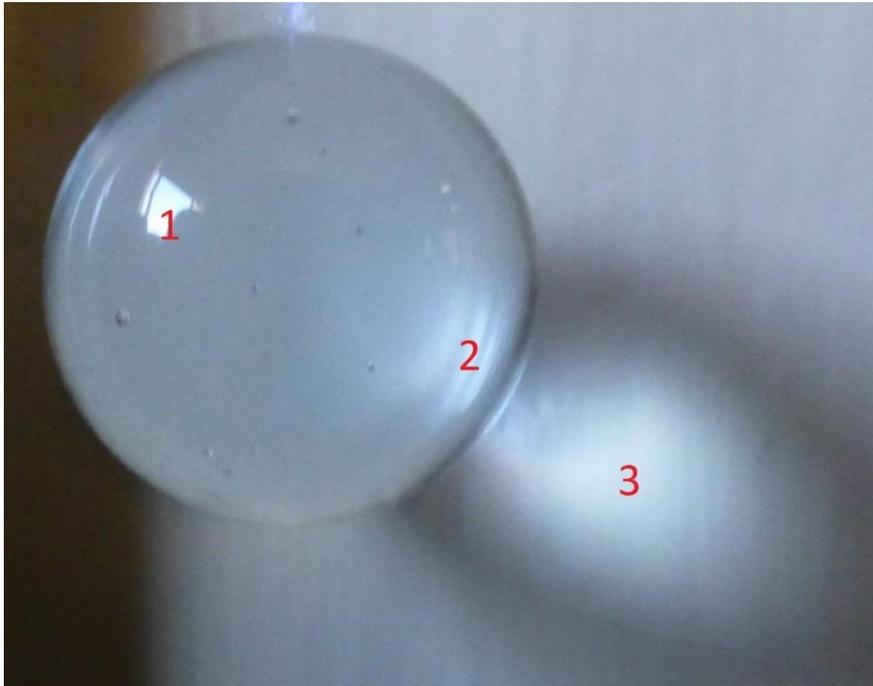
La luz entra por la ventana que está a la izquierda en el cuadro, al llegar a la superficie de separación aire-vidrio, en este caso muy lisa, parte de la luz se refleja especularmente, creando la imagen virtual de la ventana en el lado izquierdo de la cuenta (1 en la fotografía de la fig. 197).

Otra parte de la luz se refracta, atravesando la cuenta de vidrio a la vez que converge hasta llegar a otra superficie de separación, también lisa, esta vez la interfase vidrio-aire, nuevamente parte de la luz se refleja, creando la mancha de luz 2 en la fotografía<sup>67</sup>, los

---

<sup>67</sup> Vemos la zona 2 iluminada luego que estos rayos que se reflejaron en la superficie interna (zona 2 fig. 197) emergen por la cara delantera de la bolita.

rayos que atraviesan esta la superficie de separación convergen creando la zona luminosa 3, en todos los casos se cumplen las leyes de reflexión y refracción.



*fig. 197 Detalle de la fotografía de la figura 195 donde se numeraron las zonas de luz*

La luz que atraviesa el vidrio y se refracta, converge, la bolita actúa como una lente convergente.

Si la bolita se encuentra a la distancia adecuada de la pared, vemos la imagen invertida de la ventana proyectada en la pared del fondo (fig. 198), a medida que esta distancia varía, vemos una mancha de luz, como en la zona 3 de la fig.197, que corresponde a la imagen real de la ventana, sólo que desenfocada.

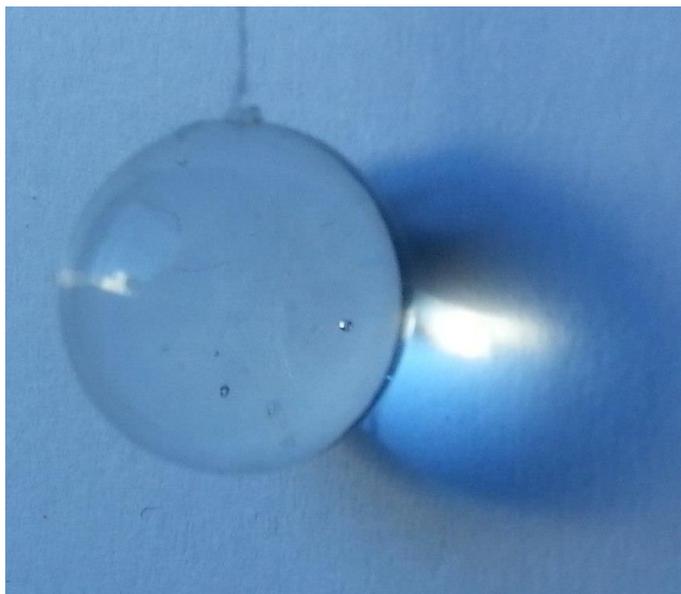


fig. 198 foto de una bolita de vidrio, imagen virtual e imagen real de una ventana.

En la foto de la figura 198 podemos ver a la izquierda, en la bolita, la imagen virtual y derecha de una ventana a través de la cual divisamos el cielo y un edificio blanco, porque la superficie de la bolita de vidrio es muy lisa y actúa como un espejo convexo.

A la derecha en la foto, vemos la imagen real e invertida de la misma ventana, proyectada en la pared.

Esta foto, de una bolita de 1,0cm de diámetro, fue tomada con el macro de la Cámara de fotos desde muy cerca<sup>68</sup>, a medida que nos alejamos es cada vez más difícil diferenciar a simple vista las zonas de luz y de sombras. A 3m de distancia, no se distinguen a simple vista las tres zonas de luz. Sin embargo en las cuentas del fondo del cuadro se distinguen perfectamente las tres zonas de luz.

¿Cómo pudo Van Eyck pintar con tanto detalle las luces en las cuentas tan lejanas?

Van Eyck, como todos los pintores de la época, pintaba en su taller, por lo que seguramente la escena del cuadro no es una habitación real, es una recreación, imaginada o armada en forma de escenografía en su estudio, pletórica de simbología en torno a la historia que quiere contar.

Concuera con esta afirmación, la precisión con que pinta los detalles del fondo, que están a una distancia de por lo menos 3 m, y a simple vista sería imposible ver ese nivel de detalle.

---

<sup>68</sup> Distancia entre el objetivo y la bolita  $3\pm 1$  cm

Tratemos de hacer una estimación de la distancia entre el pintor y la pared del fondo, donde se encuentra colgado el rosario de cuentas de cristal, para ello trataremos de estimar las dimensiones de los objetos y espacios representados en el cuadro:

- ➔ un gran sillón rojo, adornado en el lugar de los habituales leones, con la talla de una figura monstruosa, semejante a una Gárgola<sup>69</sup>, que como un mal augurio acecha a los esposos tras sus manos cruzadas. Estimemos la profundidad del sillón en **0.9 m**.
- ➔ Según se ve en el espejo convexo hay un espacio entre el sillón y el mueble que se encuentra debajo de la ventana, porque en la imagen del espejo vemos el mueble en su totalidad pero no se llega a ver el sillón. Estimemos como mínimo una distancia de **0.3 m**.(fig. 170 [Detalle de EL MATRIMONIO ARNOLFINI, Jan van Eyck](#)). (Ctrl + clic sobre el nombre anterior para seguir el vínculo)



fig. 199 Intervención de un detalle de EL MATRIMONIO ARNOLFINI

<sup>69</sup> “Las Gárgolas son creadas y se desarrollan durante la Edad Media. La palabra Gárgola proviene del francés gargouille, originalmente garganta. A su vez, este deriva del latín gurgulio o gargula, y, más atrás, de la raíz indoeuropea Gar, "tragar", matiz que la lengua española conserva en la palabra garganta. En Italia se las conoce como Doccione o Gronda Sporgente, término arquitectónico que significa algo así como "alero prominente". En Alemania las Gárgolas son llamadas Wasserspeier, "vomitador de agua"; término análogo al holandés Waterspuwer, "escupe agua".

Toda esta terminología sobre las Gárgolas apunta a su utilidad arquitectónica, ya que las Gárgolas son, además de un símbolo y un recordatorio de las aberraciones del infierno, un elemento necesario en las catedrales para desaguar los tejados mediante imperceptibles caños que las atraviesan.”

Fuente: [Gárgolas: leyendas, origen y significado. :](#)

<http://despiertaalfuturo.blogspot.com/2013/09/gargolas-leyendas-origen-y-significado.html>

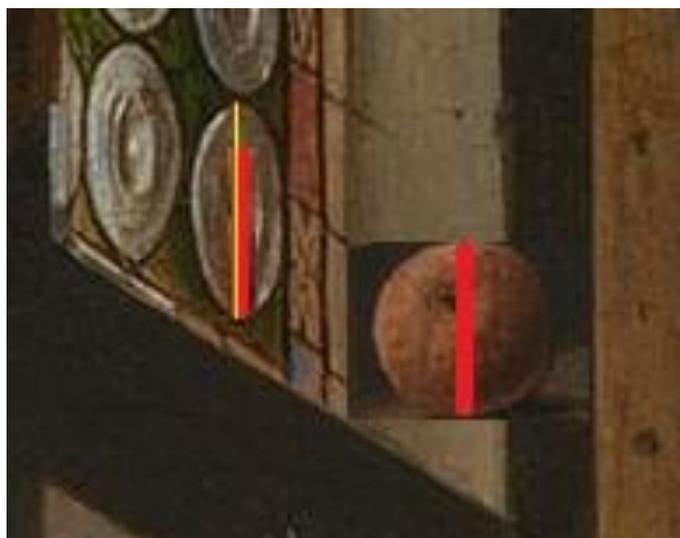
➔ Bajo la ventana, se encuentra un mueble, sobre el cual están apoyadas las naranjas<sup>70</sup>, su largo supera el de la ventana en los dos extremos, en el extremo que está más próximo al espectador, podemos estimar esa distancia comparándola con el diámetro de las naranjas, en la intervención de la obra<sup>71</sup> de la figura 199 vemos que esa distancia corresponde aproximadamente al diámetro de dos naranjas.

A través de la imagen del mueble en espejo, observamos que también sobresale de la ventana en el otro extremo.

Suponiendo que el diámetro de las naranjas es de 8cm cada una<sup>72</sup>, y que el mueble está centrado con el eje de la ventana, el largo del mueble superaría al de la ventana aproximadamente en **32cm** (dos naranjas de cada lado).

En cuanto al largo de la ventana lo estimaremos con nuestra unidad de medida (diámetro de naranja).

Comparemos el diámetro de la naranja que está sobre el antepecho de la ventana, con el diámetro de los círculos que adornan el vitral en la parte superior de la ventana. Trazamos una vertical que pasa por la naranja y elegimos el círculo más próximo a la vertical. Copiamos esa naranja y la pegamos próxima al vitral para comparar su diámetro con el círculo de vidrio.



*fig. 200 Intervención de un detalle de EL MATRIMONIO ARNOLFINI  
Jan van Eyck*

<sup>70</sup> Las naranjas aparecen en muchos cuadros de la época junto a vírgenes y supuestamente eran símbolo de fertilidad.

<sup>71</sup> Se intervino un detalle de la obra agregándole las dos naranjas, copiadas de la que se numeró con 1.

<sup>72</sup> Esto es una aproximación promediando el diámetro de naranjas actuales, no encontré información acerca de las magnitudes de las naranjas en el siglo XV. Este valor posee gran incertidumbre.

Comparamos el diámetro del círculo<sup>73</sup> con el de la naranja (figura 200). Sabiendo que la línea roja equivale a 8cm, por simple regla de tres llegamos a que el diámetro de los círculos es de 10cm. Cada hoja de la vidriera de colores tiene tres de estos círculos más la guarda que por estar en escorzo la comparo con el diámetro del círculo en la horizontal, resultando el ancho de la guarda como mínimo de 7cm. Por lo general en los vitrales del siglo XV la guarda era simétrica de los dos lados. Estimamos por lo tanto el largo de cada hoja de vitral en 44 cm (Fig. 201)

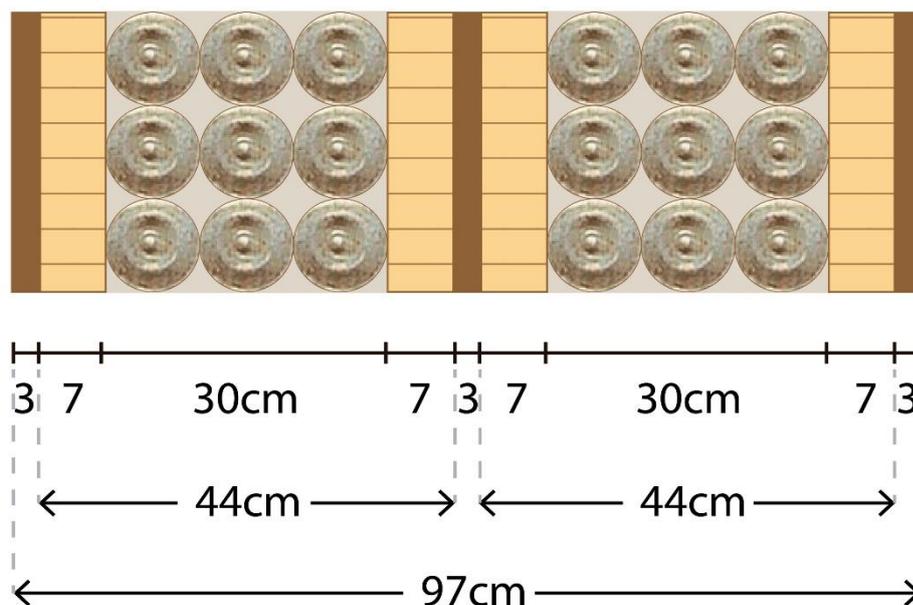


fig. 201 Esquema del vitral y ventana

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, la ventana mediría como mínimo, teniendo en cuenta los tres parantes de madera, 97cm.

De acuerdo a esto la longitud del mueble es de aproximadamente

$$0.32m + 0.97m = 1,29m$$

- ➔ Delante del mueble se encuentran los protagonistas de esta historia, él con una capa muy amplia que cae desde los hombros y se abre hacia abajo. Comparando el diámetro de la capa con el largo del pie, estimamos que el señor Arnolfini ocupa 0,70m delante del mueble.
- ➔ El perro y la distancia desde allí al pintor, que no podemos estimar, aumentarían esta longitud que ya suma 2,89m  $\cong$  3m. Representamos esta medida con una cifra significativa porque tiene una gran incertidumbre debido a la imprecisión con que trabajamos.

<sup>73</sup> Comparamos el diámetro del círculo y la naranja en la vertical porque los círculos del ornamento son planos, están en escorzo y por efecto de la perspectiva el diámetro en la horizontal se ve cada vez de menor magnitud.

El resultado de esta estimación concuerda con el realizado por el científico David G. Stork<sup>74</sup> y cuyo modelo de la habitación, hecho por computadora mostramos a continuación.



fig. 202 Modelo de la obra EL MATRIMONIO ARNOLFINI<sup>75</sup>

A 3m es imposible ver a simple vista los objetos del fondo con ese nivel de detalle, lo que hace pensar en varias posibilidades para explicar los sorprendentes logros Jan van Eyck.

Algunas de esas posibilidades son:

- 1) Pintaba cada detalle muy próximo al modelo para poder divisar ese nivel de detalle.
- 2) Conocía las leyes físicas en cuanto al comportamiento de la luz, y las aplicaba a la perfección.
- 3) Usaba como herramientas instrumentos ópticos para perfeccionar su obra.

La tercera posibilidad está ampliamente discutida por científicos, artistas e historiadores del arte y ha llevado a controversias entre los que opinan que Jan van Eyck usaba instrumentos ópticos y los que defienden la postura contraria.

<sup>74</sup> Dr. David G. Stork: Científico de Investigación y Director de Investigación en Rambus laboratorios, ha ocupado cargos docentes en ocho disciplinas y programas: Física, Matemáticas, Ciencias de la Computación, Ingeniería Eléctrica, Estadísticas, Neurociencias, Psicología y Arte e Historia del Arte de diversas maneras en el Wellesley Colegio Swarthmore College, Clark U., Boston U. y Stanford U.

<sup>75</sup> Esquema extraído de la Tesis Doctoral de Enrique Corrales Crespo, LA OBRA FOTOGRÁFICA DE DAVID HOCKNEY UNA REFLEXIÓN SOBRE LO MÚLTIPLE FOTOGRÁFICO, T, Universidad Complutense de Madrid, Madrid 2012 – Pag.408

*¿Jan van Eyck usaba como herramientas instrumentos ópticos?*

Analicemos esta tercera posibilidad a través de algunas de las argumentaciones realizadas en defensa de esta hipótesis. Aunque no son las únicas, desarrollaremos ocho de ellas.

- 1) **Primer argumento:** Jan van Eyck conocía los instrumentos ópticos. ¿Por qué no usarlos para perfeccionar su obra?

Es indudable que Jan van Eyck conocía los instrumentos ópticos, espejos cóncavos, convexos y lentes, de hecho, según el autor Albert D.M. Edwards la primera representación pictórica de unas gafas con lentes cóncavas<sup>76</sup>, corresponde a una obra de Jan van Eyck.



fig. 203, LA VIRGEN DEL CANÓNIGO VAN DER PAELE ,  
Jan van Eyck 1436

El cuadro es LA VIRGEN DEL CANÓNIGO VAN DER PAELE pintada en 1436 (figura 203), aunque según otras fuentes<sup>77</sup>, la representación conocida más antigua de alguien que

<sup>76</sup> Albert DM, Edwards DD. The History of Ophthalmology. Blackwell Science, 1996.

<sup>77</sup> [JF Ptak Science Books](#)

lleva gafas en el arte occidental datan de 1352 y corresponden a un fresco pintado por Tommaso da Modena en la Basílica de San Nicolás en Treviso, Italia. Figura 204

De cualquier manera, sea o no Van Eyck el primero en representarlas en un cuadro, su obra es una prueba de que se usaban en su época y de que él las conocía.



fig. 204, Fresco EL CARDENAL UGO DI PROVENZA  
Tommaso da Modena 1352

- 2) **Segundo argumento:** las luces en algunas zonas de los cuadros de J. van Eyck están pintados como círculos de confusión<sup>78</sup>.

Cuando miramos a través de una lente, los puntos brillantes que se encuentran fuera de foco se ven como círculos más claros llamados técnicamente círculos de confusión.

---

Vincent Ilardi, Renaissance Vision from Spectacles to Telescopes, the American Philosophical Society, Philadelphia 2006

<sup>78</sup> “El término círculo de confusión se creó en la óptica para establecer una definición objetiva de lo que es la nitidez focal. El círculo de confusión define cuánto tiene que estar un punto fuera de foco para ser percibido por un ser humano con capacidad visual normal. Cuando el círculo de confusión es percibido por el ojo humano se dice entonces que esa región de la imagen está fuera de la profundidad de foco, o no tiene una nitidez aceptable.

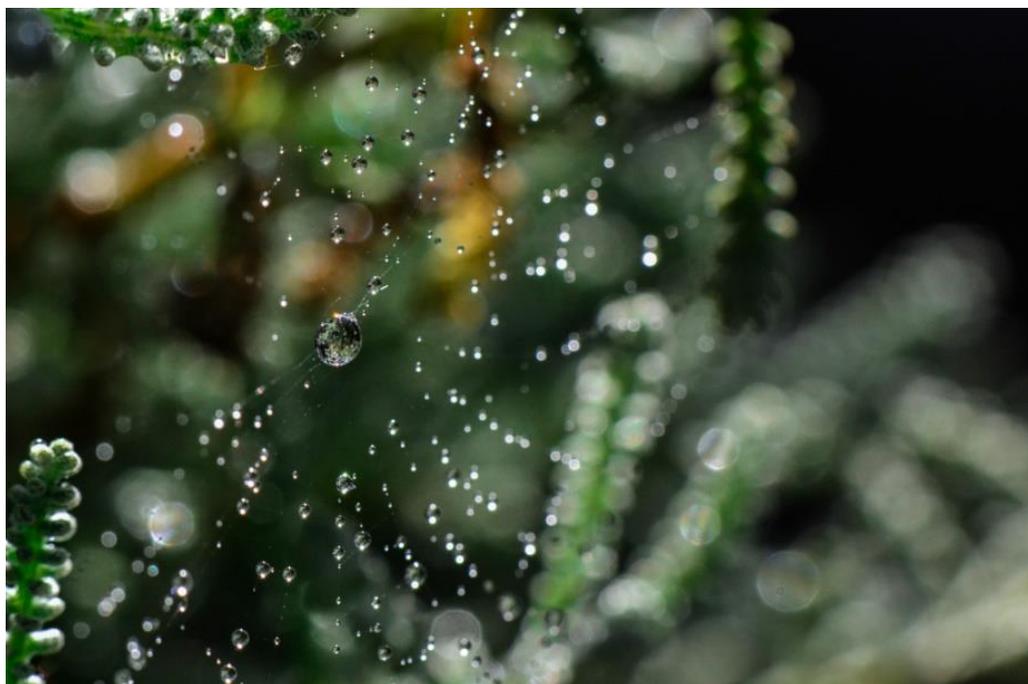
La industria de la fotografía ha establecido que un círculo de confusión aceptable es aquel punto que ampliado en una foto impresa de tamaño 8 x 10” vista desde una distancia de 24” no puede ser percibido por el ojo humano. Se reconoce internacionalmente que círculo de confusión no debe ser mayor de 0.01 pulgadas (250 µm) de diámetro.” [vínculo a la fuente:](#)

[https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%ADrculo\\_de\\_confusi%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/C%C3%ADrculo_de_confusi%C3%B3n)



*fig. 205 Fotografía con círculos de confusión, en fotografía se les llama bokeh*

En la fotografía de gotas de rocío en la hierba que vemos en la fig. 205, la zona enfocada, a la derecha y abajo en la foto, se ve con gran nivel de detalle, mientras que en las zonas desenfocadas, los reflejos aparecen como círculos de confusión.



*fig. 206 Fotografía con círculos de confusión o bokeh  
Beatriz de Mattos*



*fig. 207 Fotografía con bokeh no circulares<sup>79</sup>*

En fotografía, estos desenfoques se utilizan como elemento compositivo para lograr los efectos buscados, se les llama bokeh y pueden tener otras formas, no tienen por qué ser círculos. Fig. 207



*fig. 208 Fotografía: Gotas en un pétalo de flor*

---

<sup>79</sup> Dtalde de fotografía de ingen-hatterkep.hu

Los círculos de confusión, también aparecen, en las zonas que se encuentran fuera de foco, cuando proyectamos una imagen real creada a partir de un espejo cóncavo.

Observando obras de van Eyck vemos que los brillos son tratados como pequeños círculos semejantes a círculos de confusión. Fig.209 a 211



*fig. 209 detalle de Virgen del canónigo Van der Paele Jan van Eyck*



*fig. 210 detalle de Virgen del canónigo Van der Paele Jan van Eyck*



fig. 211 Detalle de "Adoración del cordero" de J. van Eyck - Macrofotografía<sup>80</sup>

Dentro de los que defienden la postura de que van Eyck utilizó elementos ópticos para la elaboración de su obra, se encuentra David Hockney, pintor inglés contemporáneo que junto al físico Charles M. Falco desarrolló una teoría acerca de la relación entre arte y óptica, que escribió en su libro "EL CONOCIMIENTO SECRETO: REDESCUBRIENDO LAS TÉCNICAS PERDIDAS DE LOS VIEJOS MAESTROS" y publicado en el año 2001.

La tesis de Hockney-Falco es una teoría de la historia del arte según la cual, a partir de 1430, algunos artistas como Van Eyck, Caravaggio, Lotto, Vermeer y, más adelante, Ingres, utilizaron dispositivos como lentes, espejos cóncavos y cámaras oscuras, para ayudarse a realizar pinturas de aspecto realista, logrando una representación casi fotográfica, pero Hockney deja claro que él no acusa a ningún artista de hacer trampa y asegura:

*"La óptica no produce arte. Las lentes, el espejo y la cámara oscura son sólo herramientas. Lo cierto es que los artistas las descubrieron mucho antes de lo que se pensaba."*

David Hockney

Mientras que su compañero Falco utiliza el tamaño de los objetos y personas en las pinturas para el cálculo de diámetros, distancias focales, y otras características de espejos y lentes que podrían haber sido utilizados para proyectar las imágenes.

Algunos de los argumentos de la teoría Hockney-Falco son:

---

<sup>80</sup> Fuente: Más cerca de Van Eyck: [Redescubriendo el Retablo de Gante:](https://redescubriendoelretablodegante.com/)

<http://clostertovaneyck.kikirpa.be/#viewer/id1=37&id2=0>

- 3) **Tercer argumento:** hubo un salto notorio en el aumento del naturalismo en la pintura a partir del 1400, que coincide con la aparición de elementos ópticos.



fig. 212 Parte de la colección de fotos de cuadros de D. Hockney [ver imagen ampliada](#)<sup>81</sup>

D. Hockney coleccionó fotografías de pinturas y las ordenó de acuerdo a dos criterios: cronológicamente y según a su procedencia (fig. 212).

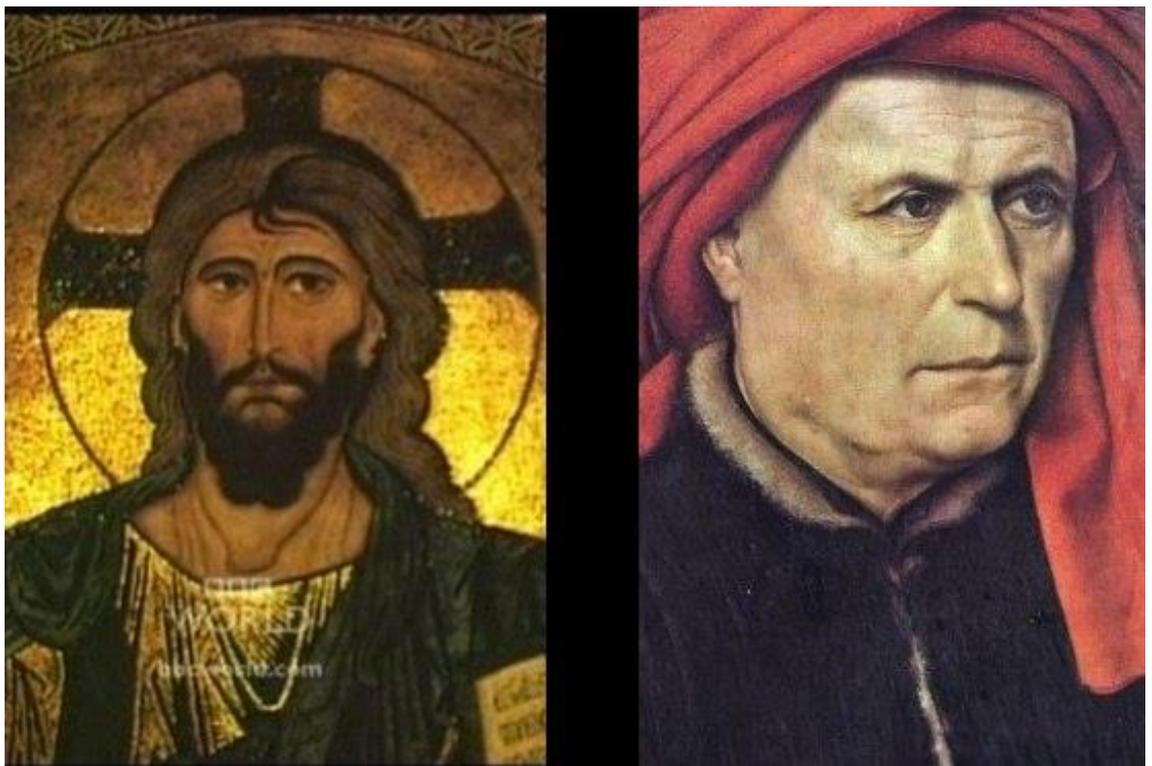


fig. 213 Cambio en la representación que se produjo en el siglo XV

<sup>81</sup> El lector puede ver esta imagen ampliada en:

<https://cartografiasepositivas.files.wordpress.com/2012/04/hockneygreatwall13.jpg>

Se dio cuenta de que alrededor del año 1400 hubo un salto en la representación pictórica, los cuadros tomaron el aspecto de fotografías, aunque en esa época todavía no existía la fotografía. (Figura 213)

En el vídeo 15 lo explica el propio autor.



Video 15 Aumento del naturalismo [Link a video completo](#)<sup>82</sup>

Hockney observa que en el siglo XV se produce un cambio en la representación pictórica, algunos pintores comienzan a crear obras con un enorme aumento del naturalismo, razón por la cual vincula esta realidad en la pintura casi fotográfica, con los hechos históricos del momento: en esa época en Brujas, donde vivía Van Eyck se fabricaban espejos curvos. En el norte de Europa se usaban, lentes, espejos cóncavos o de aumento y espejos convexos. Hockney supone que los artistas aprovecharon estos adelantos y utilizaron lentes y espejos para pintar cuadros asombrosamente realistas.

- 4) **Cuarto argumento:** en muchas de estas obras no hay dibujo previo, la inexistencia de dibujos o bocetos en muchas obras de grandes artistas y retratistas de la época, sugieren que pueden haber sido realizados directamente utilizando la imagen producida por una lente, espejo cóncavo o cámara oscura.

<sup>82</sup> Fuente BBC <http://www.bbc.co.uk/programmes/b0074m8f>

El lector puede ver este video en:

[https://www.youtube.com/watch?v=EV-p6l\\_loSg&feature=youtu.be](https://www.youtube.com/watch?v=EV-p6l_loSg&feature=youtu.be)

La complicada araña en el cuadro “EL MATRIMONIO ARNOLFINI” no tiene dibujo previo ni correcciones.

Según las palabras de Hockney:

*“Ahí está de nuevo el espejo convexo. Si volviera al revés el plateado y luego lo girara, este sería todo el equipo óptico que necesitaría para el detalle meticuloso y de aspecto natural del cuadro. La araña siempre me ha fascinado, está hecha sin dibujo preparatorio ni correcciones (es el único objeto del cuadro pintado de esa manera), sorprendente por su complicada forma escorzada. Van Eyck pudo haber colgado el panel al revés cerca del agujero por donde se mira y pintarlo directamente, siguiendo las formas que podía ver en la superficie. Obsérvese que la araña está vista de frente (no desde abajo como se esperaría). Éste es el efecto que se esperaría con un espejo-lente, que debe estar nivelado con los objetos que se quieren dibujar o pintar. Habría sido un tema magnífico para hacer gala de sus habilidades.”*

David Hockney

El análisis de reflectografía por infrarrojos de este cuadro confirma que debajo de la lámpara no existen trazos correctores de dibujo.

5) **Quinto argumento:** la existencia de varios puntos de fuga.

Hay algunas obras que poseen varios puntos de fuga, trabajando con elementos ópticos el artista debería enfocar un objeto por vez, cambiando el objeto enfocado según la zona del cuadro a pintar, esto originaría varios puntos de vista. Se puede ver el ejemplo, explicado por David Hockney en el siguiente video.



Video 16 Porqué de varios puntos de fuga [link a video completo](#)<sup>83</sup>

<sup>83</sup> El Lector puede ver este video en:

- 6) **Sexto argumento:** todos los objetos, incluido los lejanos del fondo están enfocados.

En algunas obras de J. van Eyck, todo está enfocado, como si el espectador estuviera próximo a todo, Hockney lo explica haciendo una analogía con una de sus obras en la que utilizó de la técnica del collage uniendo varias fotografías, cada una de ellas en foco, logrando un efecto parecido en el que no hay zonas desenfocadas. (Video17)



Video 17 Todo enfocado-[Link a video completo](#)<sup>84</sup>

- 7) **Séptimo argumento:** la representación en pintura de superficies brillantes como armaduras o el candelabro de la figura 214.

---

<https://www.youtube.com/watch?v=z2a4U6rNTcQ>

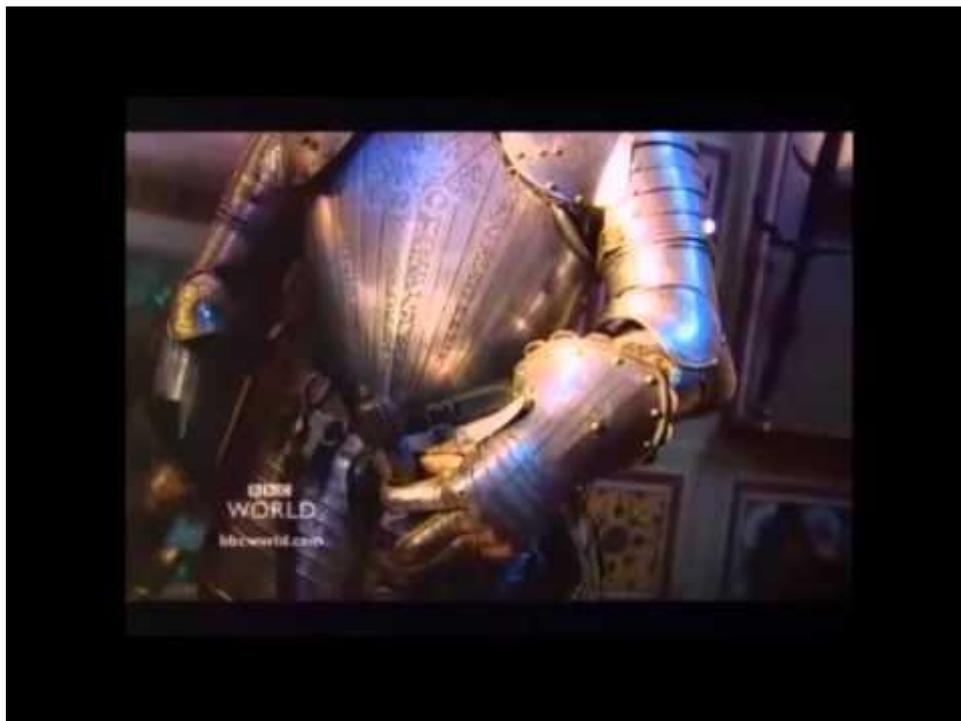
<sup>84</sup> El Lector puede ver este video en:

[https://www.youtube.com/watch?v=EV-p6l\\_loSg&feature=youtu.be](https://www.youtube.com/watch?v=EV-p6l_loSg&feature=youtu.be)



*fig. 214 Detalle del cuadro EL MATRIMONIO ARNOLFINI*

Es muy difícil pintar superficies que brillan, porque cuando el ojo cambia de posición también lo hacen los brillos, es muy complicado lograrlo sin la ayuda óptica, porque un pequeño movimiento de la cabeza del artista hace que los brillos se modifiquen en el modelo.



Video 18 Tratamiento de superficies brillantes [Link a video completo](#)<sup>85</sup>

8) **Octavo argumento:** el tamaño de las obras.

Una gran cantidad de obras de esa época miden no más de 30cm de lado, coincidentemente con que en el siglo XV los espejos que se fabricaban<sup>86</sup> podían dar imágenes reales proyectadas próximas de esas dimensiones.

---

<sup>85</sup> El Lector puede ver este video en:

[https://www.youtube.com/watch?v=EV-p6l\\_loSg&feature=youtu.be](https://www.youtube.com/watch?v=EV-p6l_loSg&feature=youtu.be)

<sup>86</sup> Los espejos cóncavos se fabricaban a partir de vidrio soplado y la distancia focal del espejo es la cuarta parte del diámetro de la esfera, para construir espejos de gran distancia focal tendría que soplarse una esfera de vidrio gigantesca y a altísima temperatura, incompatible con los medios con los que se contaba en esa época.



Video 19 Video [Tamaño de las obras, selección de video de D. Hockney- Link a video completo](#)<sup>87</sup>

No sabemos si las hipótesis de Hockney- Falco son verdaderas o falsas, algunos de sus argumentos han sido rebatidos por científicos como David G. Stork y la teoría sobre los espejos es uno de los argumentos más discutidos. Pero esta teoría incentivó a científicos, historiadores y artistas a investigar y creó una vorágine de discusiones que enriquece el tema de la física en el arte.

Según los cálculos de Stork, el reverso del espejo que aparece en el cuadro del Matrimonio Arnolfini no serviría para proyectar una imagen de las dimensiones de este cuadro. Calcula la distancia focal del espejo que se necesitaría, basándose en las dimensiones del cuadro y los objetos que aparecen en él, llegando a la conclusión de que el espejo cóncavo tendría una distancia focal de  $61 \pm 8 \text{cm}$ , que de acuerdo al método de fabricación en la época, hubiera exigido crear una esfera de vidrio de 2.4m de diámetro<sup>88</sup> de donde cortar el espejo, prácticamente imposible para la tecnología de la época.

---

<sup>87</sup> El Lector puede ver este video en:

[https://www.youtube.com/watch?v=EV-p6l\\_loSg&feature=youtu.be](https://www.youtube.com/watch?v=EV-p6l_loSg&feature=youtu.be)

<sup>88</sup> De acuerdo a la distancia focal y su incertidumbre ( $61 \text{cm} \pm 8 \text{cm}$ ), y a que el diámetro de la esfera es  $4d_f$ , el diámetro que debería tener la esfera de la que se obtiene el espejo sería  $(2,4 \pm 0,3) \text{m}$ , es decir que estaría entre 2,1m y 2,7m de diámetro.

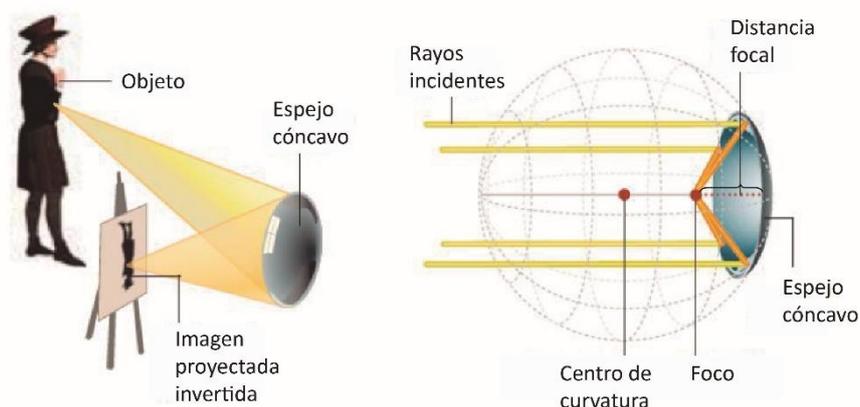


fig. 215 [Fuente](#)<sup>89</sup>

Stork descarta la hipótesis del espejo de vidrio cóncavo como herramienta de proyección para esta obra y considera que sí se puede haber fabricado un espejo de metal pulido con una distancia focal de 61 cm, pero esos espejos, necesitan una gran cantidad de luz para proyectar una imagen nítida, incompatible con la escena interior del cuadro.

Stork realiza otros estudios en el cuadro, incluyendo algunos sobre la araña metálica, y concluye que la teoría de Hockney aplicada a El matrimonio Arnolfini sería del todo errónea, pero considera que sobre Vermeer si hay pruebas suficientes para asegurar que usaba instrumentos ópticos en la ejecución de su obra, lo mismo en cuanto a Vermeer opina Philip Steadman.

Philip Steadman<sup>90</sup> es arquitecto, profesor en la Universidad College de Londres, Universidad de Cambridge, la Universidad Abierta, y escribió el libro “Cámara de Vermeer” donde da a conocer su trabajo acerca del pintor holandés, realiza una meticulosa reconstrucción del estudio de Vermeer con una cámara oscura, que proporciona evidencia nueva para apoyar la opinión de que Vermeer utilizó la cámara oscura con lente.

<sup>89</sup> <http://eprints.ucm.es/16771/1/T34016.pdf>

<sup>90</sup> . Ha publicado varios libros sobre la geometría de la arquitectura y el diseño asistido por ordenador, co-autor de un libro sobre el arte cinético.

### *El Caso Vermeer*

Actualmente es aceptado por científicos, historiadores del arte y artistas, que Vermeer utilizó la cámara oscura como herramienta para trabajar en sus obras, existen libros y estudios científicos a favor de esta hipótesis.

Si tenemos en cuenta el momento histórico y el lugar en el que vivió, es muy probable que utilizara estas herramientas, sin desmerecer por eso su obra, al contrario, además de ser un gran maestro de la pintura, supo utilizar los adelantos científicos para lograr los efectos deseados.

¿Por qué de acuerdo al lugar y el momento en el que vivió es probable que Vermeer utilizara instrumentos ópticos?



*fig. 216 Vista de Delft, de Johannes Vermeer*

Acerquémonos a través de su historia:

En el hermoso lugar que vemos representado en la figura 216, una zona de Holanda llamada Delft, a finales de octubre de 1632, nacen dos niños con solo una semana de

diferencia, los dos, por sus aportes, dejarían huella y pasarían a formar parte de la Historia de la humanidad.

Los nombres de estos pequeños fueron: Johannes Vermeer que se destacó en el arte y Anton van Leeuwenhoek a quien se le atribuye la invención del microscopio simple, el descubrimiento de los espermatozoides, los protozoarios, y es quien se opone a la teoría de la generación espontánea que predominaba en la época. Además de haber nacido en el mismo momento y en el mismo lugar, los dos se dedicaron al comercio, Vermeer comerciaba obras de arte al igual que su padre y Leeuwenhoek vendía telas. Sin duda se conocieron, hay registros de que a la muerte de Vermeer, con solo 43 años, es Leeuwenhoek quien queda a cargo de su obra.

Leeuwenhoek, dedicaba mucho tiempo a la microscopía, aprendió a soplar y pulir vidrio para fabricar lentes y compartía su trabajo. Hay más de 300 cartas, la mayoría enviadas a la Royal Society que lo demuestran.

Se supone que Leeuwenhoek y Vermeer se conocían, algunos investigadores creen que Leeuwenhoek es el modelo en dos obras pintadas por Vermeer: **EL GEÓGRAFO** y **EL ASTRÓNOMO**, y tal vez, fue quien se los encargó. Es muy probable que intercambiaran ideas y se enriquecieran mutuamente, Leeuwenhoek inventó el microscopio a partir de la necesidad de observar los hilos de sus telas, lo creó para un uso práctico, también pueden haber encontrado una aplicación de los lentes para mejorar los logros en la pintura. Esto no cuestiona el genio de Vermeer, al contrario, solo muestra cómo, en la época de Vermeer, al igual que ahora, los artistas experimentaban con nuevas tecnologías para lograr expresarse a través de su obra, los artistas de todos los tiempos se valieron de los progresos científicos y/o tecnológicos de su momento histórico, y esa época fue de gran innovación, Holanda era un polo cultural, y Vermeer otro genio que logró unir ciencia con arte.

Artistas más recientes también utilizan la óptica en aparatos que se valen de la refracción de la luz, Andy Warhol utilizaba un proyector opaco o proyector de láminas para copiar con lápiz la imagen proyectada sobre un lienzo adherido a la pared.

¿Acaso es menos meritorio aquel que para lograr su objetivo utiliza todos los medios a su alcance? ¿Es menos meritorio un artista por saber y utilizar conocimientos científicos? ¿O el valor está en lo que logra transmitir, la simbología, la composición...?



fig. 217 EL OFICIAL Y LA MUCHACHA RIENDO  
Vermeer

Son muchos los indicios a favor de la hipótesis de que Vermeer, para pintar, se valió de medios ópticos basados en la refracción de la luz (como las lentes), algunos son:

#### *Primer indicio*

- ➔ El primer indicio, lo observó un litógrafo norteamericano<sup>91</sup> y consiste en la diferencia de escala entre de las dos figuras en la obra EL OFICIAL Y LA MUCHACHA RIENDO. (Fig. 217).

En ese momento, no existía la cámara fotográfica y no se estaba acostumbrado a la diferencia de tamaño que se produce en las imágenes de objetos próximos al objetivo, ahora, con el uso de la cámara fotográfica, sabemos que un objeto en primer plano se ve agigantado, pero en ese momento, cualquier otro pintor hubiera pintado la chica y el soldado de tamaños similares.

---

<sup>91</sup> En 1891 Joseph Pennell, litógrafo y grabador norteamericano, fue el primero en sugerir que Vermeer podría haber empleado un dispositivo óptico como una ayuda para sus pinturas. Desde entonces una serie de historiadores del arte han mantenido esta tesis, como RH Wilenski, A. Hyatt Mayor, Lawrence Gowing, Charles Seymour Jr, Daniel A. Fink y Arthur Wheelock.

La gran diferencia de tamaño entre el soldado que se encuentra en primer plano y la muchacha, fue el primer indicio de que Vermeer trabajaba con una lente. Si comparamos el ancho del brazo del soldado con el largo de la cabeza de la muchacha nos damos cuenta de que tienen aproximadamente la misma dimensión, se encuentran desproporcionados, como si hubieran sido vistos a través de una lente colocada muy próxima al soldado.



*fig. 218 LA VIRGEN Y EL NIÑO CON SANTA ANA  
Leonardo Da Vinci*

Si comparamos esta obra con la de Leonardo Da Vinci “LA VIRGEN Y EL NIÑO CON SANTA ANA” o la de Rafael “LA TRANSFIGURACIÓN”, también del renacimiento pero anteriores a Vermeer, veremos que a pesar de representar varios planos en

profundidad, no existe tanta diferencia de tamaño entre los personajes como en EL OFICIAL Y LA MUCHACHA RIENDO de Vermeer.

En LA VIRGEN Y EL NIÑO CON SANTA ANA de Leonardo Da Vinci, si comparamos el ancho del brazo de la virgen con el de Santa Ana que está más atrás, separadas como mínimo el ancho de un cuerpo no encontramos prácticamente diferencia, tampoco en las dimensiones de sus cabezas.



*fig. 219 LA TRANSFIGURACIÓN*  
Rafael

En la última obra pintada por Rafael, LA TRANSFIGURACIÓN, vemos la representación de muchos planos, distantes en profundidad, que incluyen un personaje en primer plano y sin embargo la diferencia de tamaño de los personajes no son tan pronunciados como en la obra de Vermeer.



fig. 220 *SANTO TOMÁS DE VILLANUEVA*  
Murillo 1668

Si ahora comparamos la obra de Vermeer *EL OFICIAL Y LA MUCHACHA RIENDO*, con una pintada 10 años después por Murillo: *SANTO TOMÁS DE VILLANUEVA*, que también posee varios personajes en distintos planos entre los que se encuentran una mujer con un niño en primer plano, vemos que la diferencia de tamaño de los personajes que están adelante con relación al tamaño de los que están alejados no es demasiado significativo, en este sentido hay una gran diferencia entre la obra de Vermeer y Murillo. La obra de Vermeer se asemeja mucho más a una fotografía instantánea actual con un punto de vista próximo al soldado.

### *Segundo indicio*

- ➔ No se han encontrado dibujos realizados por Vermeer y en los cuadros no hay dibujo previo, pintaba directamente sobre el lienzo, sin líneas preparatorias ni de perspectiva, se ha visto esto como pista de que utilizaba la imagen proyectada a través de una cámara oscura y pintaba directamente sobre la imagen real.



fig. 221 LA LECHERA  
Vermeer

### *Tercer indicio*

- ➔ El tratamiento de los brillos con círculos, semejantes a círculos de confusión, en partes de las obras que se encuentran desenfocadas como la panera y el pan Fig.221.



fig. 222 Detalle de La Lechera de Vermeer donde se ve la zona que se amplía



*fig. 223 Detalle de la obra La Lechera de Vermeer donde se aprecia el tratamiento de los brillos*

En las fig. 222 y 223 amplié una parte de la obra para ver el tratamiento realizado por Vermeer en los brillos. Si el Lector compara estos brillos con los círculos de confusión en la figura 205 o 206 se dará cuenta de la semejanza.

En la época de Vermeer los lentes no tenían la calidad de los de hoy y era difícil enfocar los primeros planos y el fondo, cuando la imagen está desenfocada aparecen los círculos de confusión, estos círculos que no se producen cuando miramos a simple vista se ven en varios de sus cuadros.

En la figura 224 vemos un detalle de la obra La encajera, donde se aprecian estos círculos en las zonas desenfocadas.

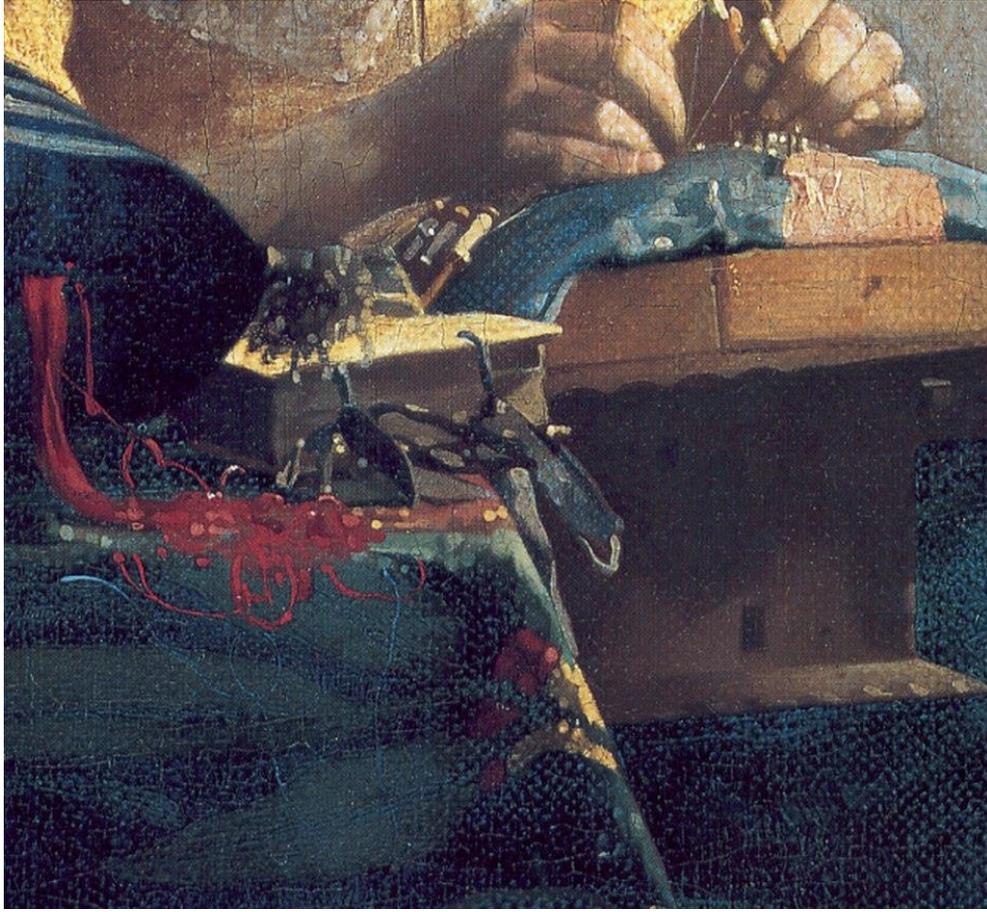


fig. 224 Detalle de *La enajera* de Vermeer

#### *Cuarto indicio*

- ➔ El tamaño de sus pinturas es por lo General muy pequeño, coincidente con el tamaño del visor de las cámaras oscuras que se utilizaban en esa época. El autor del libro *la cámara de Vermeer*<sup>92</sup>, calcula, basado en el tamaño de los objetos que aparecen, el tamaño de la habitación donde fueron pintadas seis de sus obras, la ubicación de la lente, el tamaño y ubicación de la proyección de la imagen en la pared del fondo del estudio del pintor. Seis obras es un porcentaje importante en la producción de Vermeer, el 17%, ya que se le atribuyen a solamente 34 obras.

---

<sup>92</sup> Philip Steadman

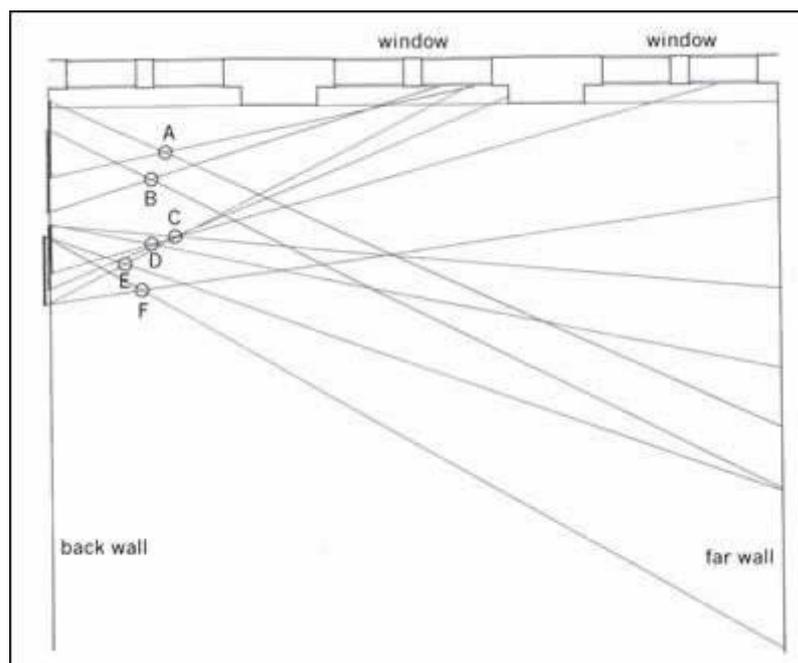


fig. 225 Plano del estudio de Vermeer por Philip Steadman [Fuente](#)<sup>93</sup>

En la figura 225 se representa el plano del estudio de Vermeer, los círculos pequeños marcados con letras son los puntos de vista de seis de las pinturas pintadas en esta habitación, las líneas diagonales muestran lo que se ve en cada cuadro y las líneas gruesas en la pared que aparece a la izquierda marcan el ancho de las imágenes proyectadas, cada uno de estos anchos coincide en con el de la obra correspondiente.

En la fig. 226 vemos el esquema realizado por Philip Steadman de un modelo posible de cámara oscura en el taller de Vermeer.

<sup>93</sup> <http://www.vermeerscamera.co.uk/reply.htm>

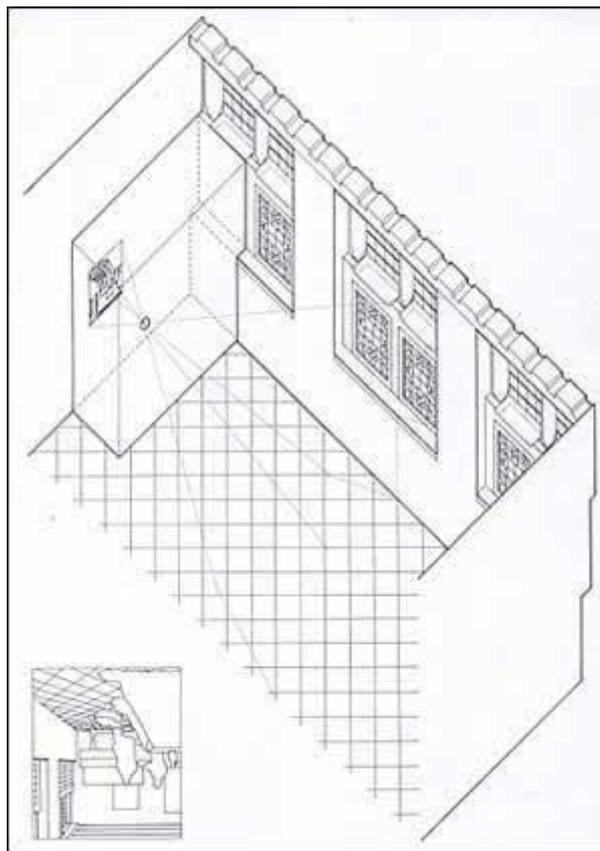


fig. 226 Ejemplo de cámara oscura en el estudio de Vermeer [Fuente](#)<sup>94</sup>

### Quinto indicio

- ➔ En sus cuadros se advierten elementos visuales propios de la óptica fotográfica.

### Sexto indicio

- ➔ Los detalles que aparece en la pintura de Vermeer no se pueden captar a simple vista.

Estos dos últimos indicios nos llevan a pensar que Vermeer utilizaba la cámara oscura, que fue introducida, justamente en Holanda por Cornelius Drebbel en 1622, 10 años antes del nacimiento de Vermeer, fue muy utilizada por los pintores y desde allí se extendió al resto de Europa.

Hay quien cree<sup>95</sup> que Vermeer empleó, una variación de la cámara oscura, que consiste en un sistema de lentes y espejos para proyectar imágenes, Tim Jenison está convencido

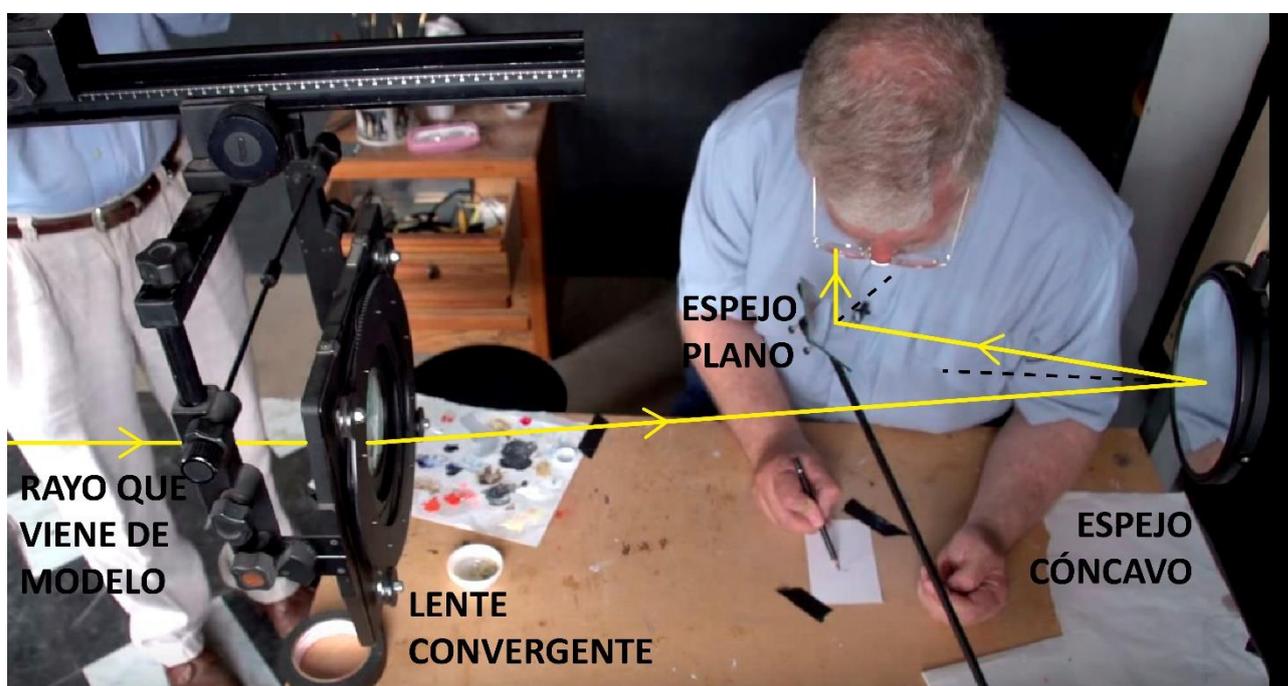
<sup>94</sup> <http://www.vermeerscamera.co.uk/reply2.htm>

<sup>95</sup> [Tim Jenison](#) realiza el experimento y se graba una [documental titulado "Tim's Vermeer"](#).

<https://www.youtube.com/watch?v=o3W1y9kkf94&feature=youtu.be>

de ello y tal fue su obsesión con esta idea, que para probarlo decidió copiar una de sus obras utilizando este método, montó una escenografía con los elementos que se encuentran en la obra *LA LECCIÓN DE PIANO*, y utilizando los instrumentos que supuestamente usó el artista, logró pintar una réplica de la obra, estaba seguro de que Vermeer se valía de una variación de la cámara oscura que consistía en un sistema de lentes y espejos para proyectar imágenes. Estaba tan seguro que montó un costosísimo experimento para probarlo.

El sistema óptico con el que trabajó Jenison y supuestamente Vermeer consiste en una lente convergente, un espejo cóncavo y uno plano distribuidos como se ve en las figuras 227 a 229.



*fig. 227 Foto del sistema de lente y espejos utilizado en el proyecto Tim Vremeer*

En la fotografía de la figura 227 el modelo se encuentra colocado a la izquierda, la luz pasa por lente, se refleja en el espejo cóncavo de la derecha e incide en el espejo plano a  $45^\circ$  en el centro. El observador, ve una imagen virtual del modelo que hace coincidir con el soporte colocado sobre la mesa, con leves movimientos de cabeza puede ver la imagen o la obra que está pintando.

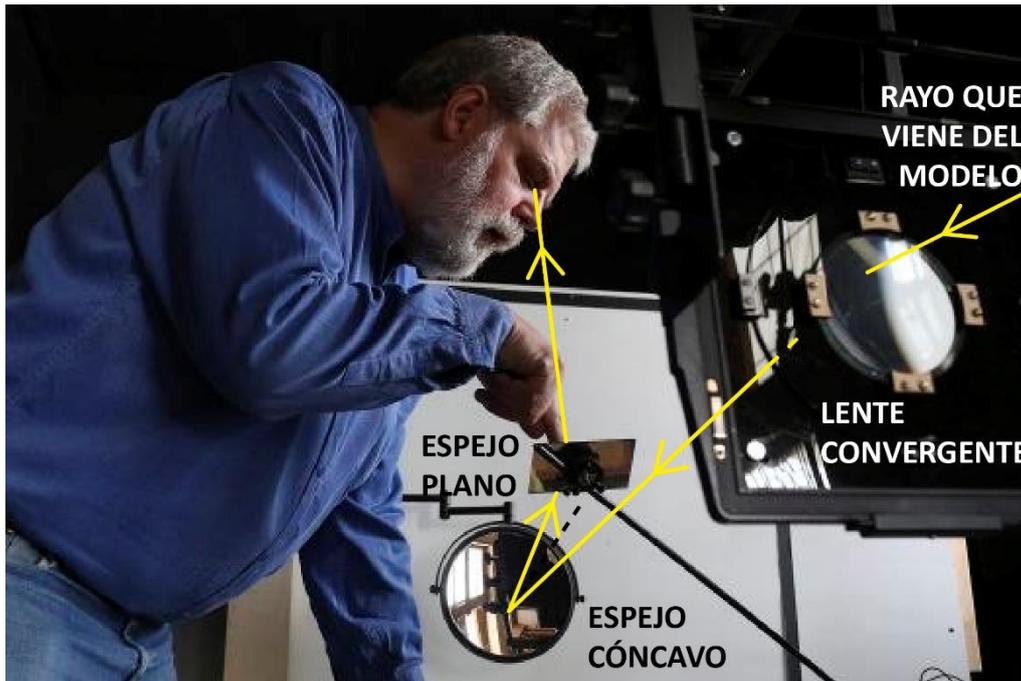


fig. 228 Foto del sistema de lente y espejos utilizado en el proyecto Tim'Vremeer

En la fotografía de la figura 228 vemos el sistema óptico desde otro punto de vista, aquí se aprecia la lente a la derecha. En la 229 el dispositivo está siendo utilizado para duplicar LA LECCIÓN DE MÚSICA de Vermeer.

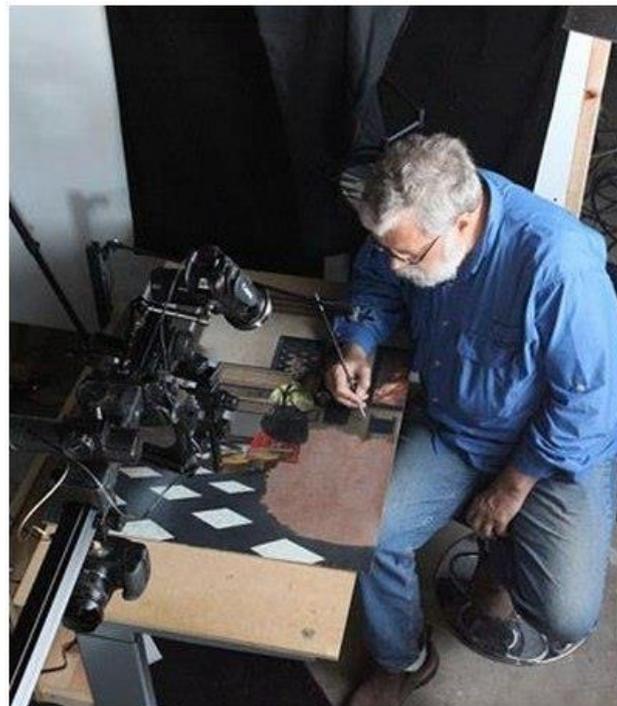


fig. 229 Foto de la duplicación de LA LECCIÓN DE MÚSICA proyecto Tim'Vreeme

Como ocurre habitualmente en la construcción del conocimiento, cada uno se apoya en los conocimientos anteriores y el esfuerzo de otros sirve como cimiento a los que siguen, el caso Vermeer no es una excepción y Philip Steadman, continúa fundamentando sus ideas, ahora incluyendo el experimento en el que se replicó LA LECCIÓN DE MÚSICA.<sup>96</sup>

### *Algunos ejemplos de refracción y dispersión en el arte en los siglos XIX, XX y XXI*

Dejemos correr nuevamente las hojas del almanaque y analicemos obras donde la refracción es utilizada de una manera diferente, no como herramienta para su ejecución sino como protagonista, siendo parte integrante y creando efectos en la obra.

Tomaré como ejemplo un artista del siglo XIX, otro del siglo XX, y algunas aplicaciones de la refracción en el arte contemporáneo, pero es necesario aclarar que son solo ejemplos, existen innumerables artistas que utilizaron y utilizan los efectos de la refracción en su obra, ya sea como herramienta, modelo, elemento compositivo, medio expresivo o formal. Veremos más adelante cómo influye la refracción en los materiales y técnicas de la pintura.

#### Turner

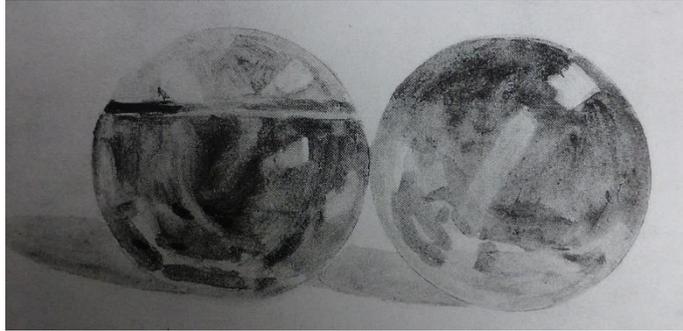
Nos servirá de ejemplo, como pintor interesado en los efectos de la luz, el artista inglés Turner<sup>97</sup>, porque consta su interés por la reflexión y refracción en estudios que realizó en acuarela, donde representa esferas de cristal a las que llenaba de agua y luego pintaba en soportes de grandes dimensiones.(Figura 230)

---

<sup>96</sup> Philip Steadman lo explica en una conferencia en Londres, en marzo de 2015. [Ir al video: https://www.youtube.com/watch?v=GFfmc4e7KgM](https://www.youtube.com/watch?v=GFfmc4e7KgM)

El video está en inglés, si lo deseas, en configuración puedes lograr los subtítulos en español.

<sup>97</sup> Joseph Mallord William Turner (1775-1851)

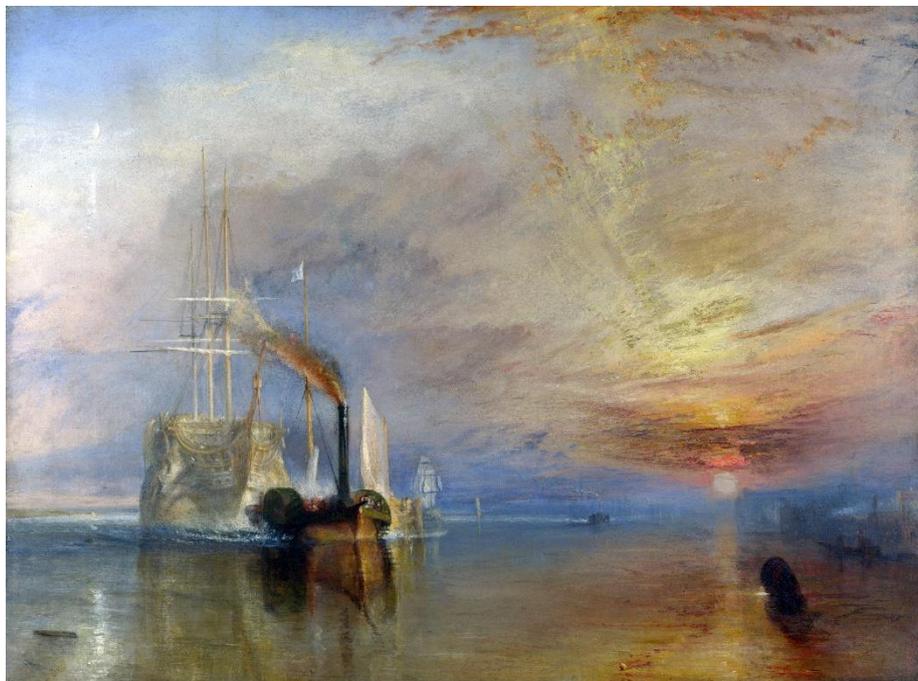


*fig. 230 Estudio de reflexión y refracción de Turner*

A Turner le fascinaba la forma en que la ciencia desvelaba los fenómenos naturales, la luz para Turner era una fuerza dinámica, y el estudio científico ampliaba su potencialidad.

Turner también fue llamado “el pintor de la luz”, debido a la importancia que le daba a los fenómenos luminosos y a que amplificaba sus efectos. Pintaba la luz en su interacción con la materia, atravesando las nubes de distinto espesor, reflejándose en ellas, difundiéndose en el vapor, reflejándose o refractándose en la nieve o en el mar...

Creaba paisajes de gran luminosidad con la misma facilidad con que nos introducía en tormentas furiosas, lo hacía con el manejo de la luz, sabiendo cómo ésta interactúa con la materia y fundamentalmente con el agua en sus distintos estados.



*fig. 231 JMW Turner EL ÚLTIMO VIAJE DEL TEMERARIO REMOLCADO A AMARRE PARA SU DESGUACE, 1839. Óleo sobre lienzo, 90,7 × 121,6 cm. National Gallera de Londres.*

En su obra *EL ÚLTIMO VIAJE DEL TEMERARIO REMOLCADO A AMARRE PARA SU DESGUACE* (figura 231), vemos como el artista potencia los efectos lumínicos, en esta representación, la luz del sol se refracta al atravesar las nubes, los efectos de las múltiples reflexiones, refracciones y dispersiones, crea el ambiente húmedo, la luz que llega a las partículas de hollín que emergen de la chimenea del barco se dispersa y toma una tonalidad rojiza.

Cuando la atmósfera contiene partículas grandes en relación a las moléculas que componen el aire, como las de hollín o ceniza volcánica, los atardeceres se ven más rojos y anaranjados, porque cuando la luz incide en la mezcla que las contiene, hace que los electrones de los átomos y las moléculas que las componen comiencen a vibrar, cuanto mayor es el tamaño de las partículas, menor es la frecuencia que las hace vibrar.

Las nubes electrónicas oscilan con la misma frecuencia que la radiación que las hace vibrar. Estas nubes electrónicas vibrantes son cargas que aceleran y emiten ondas electromagnéticas de la misma frecuencia de la vibración incidente, por eso las moléculas se convierten en pequeños emisores de luz.

Si el aire contiene hollín o cenizas volcánicas esos pequeños emisores vibran a las frecuencias inferiores del espectro visible (el rojo y las que se encuentran próximas). La luz de baja frecuencia, que es la de mayor longitud de onda, se dispersa creando los atardeceres “de fuego”

Con respecto al estudio de la dispersión de la luz en cenizas volcánica, es interesante la influencia en la ciencia de los atardeceres de Turner y de otros artistas que vivieron en los 400 años que van del siglo XIV al XIX y que les relataré a continuación.

Esta historia es reciente; comienza en el año 2007 cuando científicos y artista contemporáneos formaron un equipo<sup>98</sup> para estudiar el efecto de las erupciones volcánicas en el clima de la tierra a través del índice de polvo atmosférico, también conocido como IPV. Como en la mayor parte del período estudiado no existían mediciones de este índice, decidieron hacerlo utilizando la información que brindan los colores de los atardeceres en los cuadros de los pintores que vivieron durante esos cuatrocientos años, entre los ciento ochenta y un artistas cuyas obras se estudiaron se encuentran Turner, Degas y Klimt.

---

<sup>98</sup> Al frente del equipo se encontraba Christos S. Zerefos, investigador del observatorio nacional de Atenas.



*fig. 232 CASTILLO DE FLINT acuarela sobre papel  
JMW Turner, 1838*

Los científicos se dieron cuenta de que existía un vínculo entre el índice de polvo atmosférico y la relación entre rojo y verde<sup>99</sup> en los cuadros de los artistas, entonces, si medían la relación entre rojo y verde en las obras, podían estimar el índice de polvo atmosférico en esa época. Los resultados fueron asombrosos, los artistas mostraban en sus obras los colores de los cielos generados con la ceniza y polvo de las erupciones volcánicas que se sabe sucedieron, que si bien son hechos históricos, no se podía conocer la magnitud de índice de polvo atmosférico porque en ese momento no se medía.

En las obras de Turner, la proporción de rojo/verde, antes de la erupción del volcán Babuyan, fue de 76,7%, durante el erupción 79,2% y después de erupción 97,7%.

---

<sup>99</sup> R/G que se llama radio cromático y es una forma de medir la cantidad de pigmento rojo con relación al verde utilizado cuando se pintó la obra, al multiplicarlo por cien lo obtenemos en forma de porcentaje.



*fig. 233 BARCO A VAPOR EN LA BOCA DE UN PUERTO EN LA TORMENTA DE LA NIEVE  
JMW Turner, 1842.*

Además en sus cuadros, los objetos del fondo se ven desdibujados y casi se confunden con el fondo, es lo que se llama en pintura perspectiva atmosférica, este efecto óptico corresponde al aumento progresivo del volumen de aire que atraviesa la luz para llegar al observador desde los objetos cada vez más lejanos, la luz es dispersada en la línea de la visión por las moléculas que se encuentran en esta línea, como resultado, los objetos oscuros se ven cada vez más claros y desdibujados a medida que aumenta la distancia entre el objeto y el observador.



fig. 234 LLUVIA, VAPOR Y VELOCIDAD  
JMW Turner 1844

Turner lograba efectos atmosféricos de gran luminosidad, sus obras de la etapa final (Figuras 233 y 234) se centran en la luz y los colores del reflejo más que en los objetos, lo que lo hace precursor de impresionismo y del arte abstracto.

### Escher

Como ejemplo de artista que trabajó con la refracción como elemento compositivo y expresivo veremos a Escher, con el que ya trabajamos en el tema reflexión. Analizaremos dos de sus obras: COMPENETRACIÓN DE DOS MUNDOS (fig. 235) y GOTAS DE ROCÍO (fig. 238).

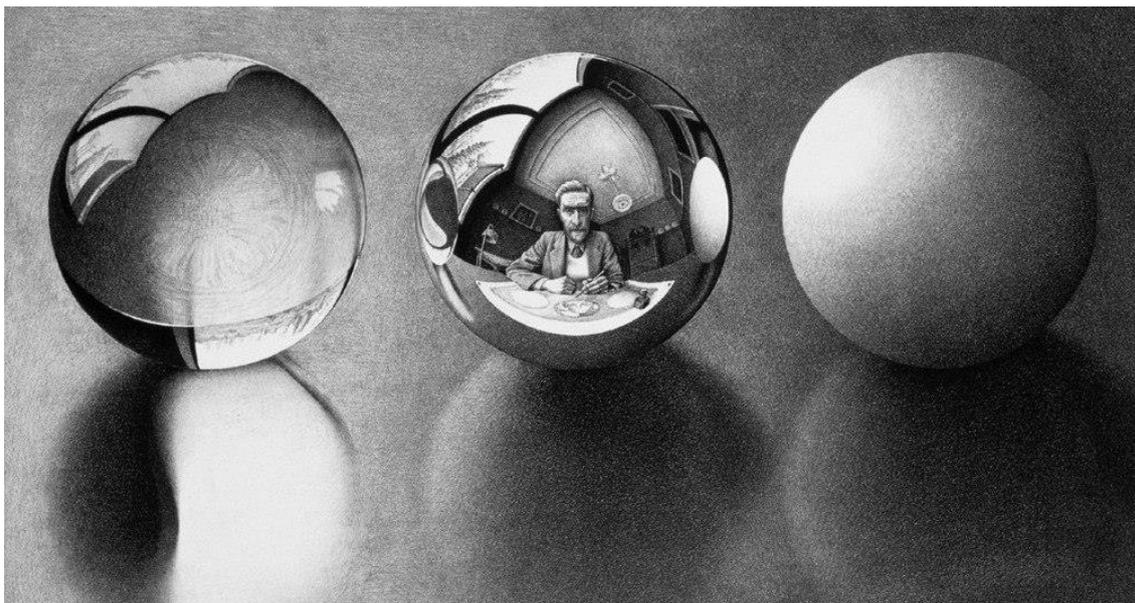


fig. 235 Grabado *COMPENETRACIÓN DE DOS MUNDOS*  
Escher

En el grabado *CONTEMPLACIÓN DE DOS MUNDOS*, Escher representa tres esferas, dos opacas, una de ellas muy pulida donde se produce la reflexión especular y una transparente, apoyadas en una superficie donde se reflejan levemente.

Es increíble como el artista logra hacernos sentir las propiedades de cada esfera representando la interacción entre luz y materia. En la esfera del centro, vemos reflejado al artista, su estudio, las otras dos esferas, y una ventana donde se llega a ver un paisaje con árboles, todo deformado por la superficie convexa.

A la izquierda, observamos la esfera que parece de cristal, Escher nos da la sensación de transparencia con el manejo de los efectos de la reflexión y refracción de la luz, nos imaginamos una esfera que actúa como lente y con su superficie muy pulida porque vemos en ella la imagen virtual de la ventana.

¿Porque decimos que actúa como lente?

Escher nos da al menos dos indicios de ello, que junto con la luz que la atraviesa e ilumina la mesa, nos hace sentir la transparencia.

Uno de los indicios, es la imagen del paisaje a través de la ventana, invertido en el eje vertical y horizontal, que vemos abajo, a la derecha, en la esfera de cristal.

Para observar mejor este efecto, observemos la fotografía de la figura 236, donde se encuentra una bolita de vidrio fotografiada desde otro punto de vista, con algunos objetos lejanos en el fondo, que aunque fuera de foco, podemos identificar fácilmente: un cuadro a la derecha y arriba, un jarrón oscuro al izquierda y más abajo que el cuadro.



*fig. 236 Fotografía de una bolita de vidrio*

En la imagen que se ve en la bolita, estos elementos están doblemente invertidos, el cuadro que está arriba y a la derecha en la realidad, aparece en la imagen abajo y a la izquierda, mientras que jarrón oscuro que en realidad se encuentra a la izquierda y abajo en relación al cuadro, en la imagen aparece a la derecha y arriba, próximo a la ventana que ilumina la escena.

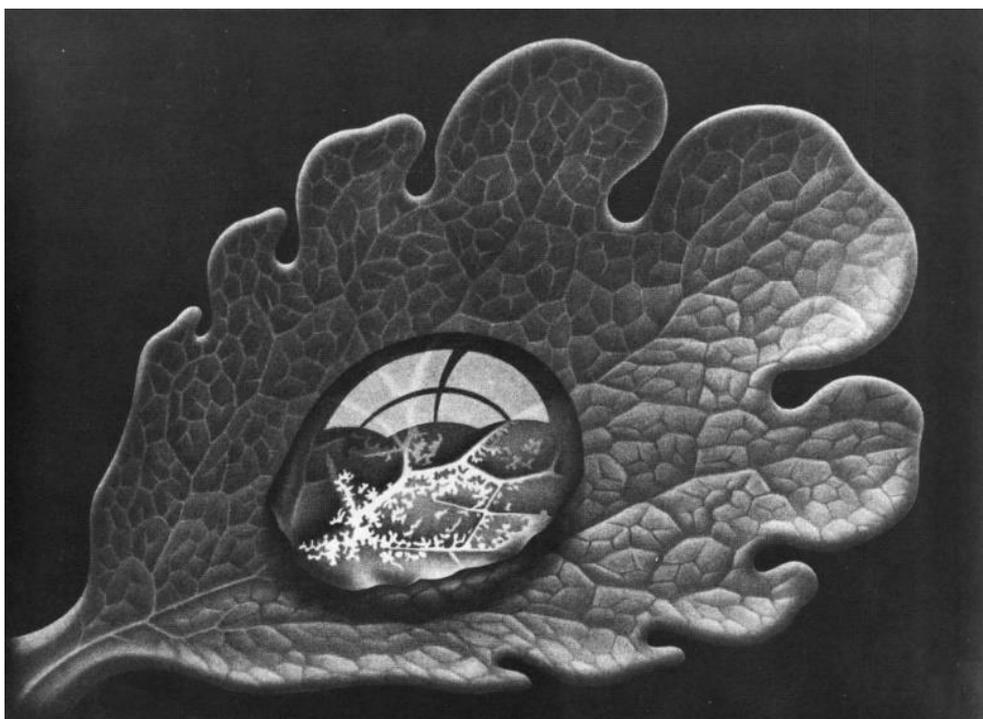
El mantel, abajo en la fotografía, aparece en la imagen en la parte superior, es lo que vemos cuando miramos objetos lejanos a través de una lente convergente, la esfera de vidrio actúa como lente biconvexa.

.



*fig. 237 Fotografía de una bolita de vidrio 2*

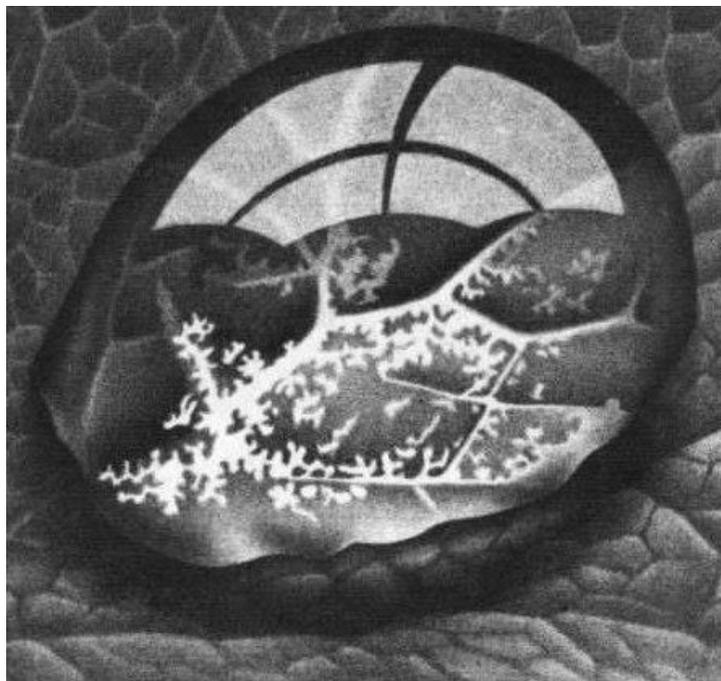
En la fotografía de la figura 237 nos aproximamos al punto de vista de Escher en su grabado, cambiamos el punto de vista para poder ver el mantel a través de la bolita de vidrio, los objetos muy próximos como el mantel se ven aumentados, la esfera transparente actúa como lupa y vemos la trama de la tela amplificada y deformada como lo representa sutilmente Escher en su grabado **COMPENETRACIÓN DE DOS MUNDOS**. Este es el segundo indicio de que estamos frente a una lente y contribuye con la sensación de transparencia.



*fig. 238 GOTAS DE ROCÍO*

*Escher*

La otra obra de Escher que consideraremos es GOTAS DE ROCÍO que vemos en la figura 238 y cuyo detalle se muestra en la fig. 239.



*fig. 239 Detalle de GOTAS DE ROCÍO  
Escher*

En este caso, es la gota de rocío la que actúa como lente, vemos la hoja ampliada a través de ella, gota y hoja están muy próximas<sup>100</sup>, la gota está sobre la hoja, en contacto con ella y vemos a su través la imagen virtual, mayor y derecha de la hoja, sus nervaduras claras y el reflejo de una ventana que nos hace percibir su superficie lisa, redondeada y sin perturbaciones.

En la sombra que proyecta la gota aparece una franja iluminada que corresponde a la luz que se refracta en la gota de rocío y converge, creando una línea más clara.

Con éstas y otras obras Escher, es otro de los artistas que junto a científicos entrelazan ciencia y arte.

---

<sup>100</sup> En una lente convergente, si colocamos un objeto entre el foco y la lente, obtenemos una imagen virtual, derecha y aumentada.

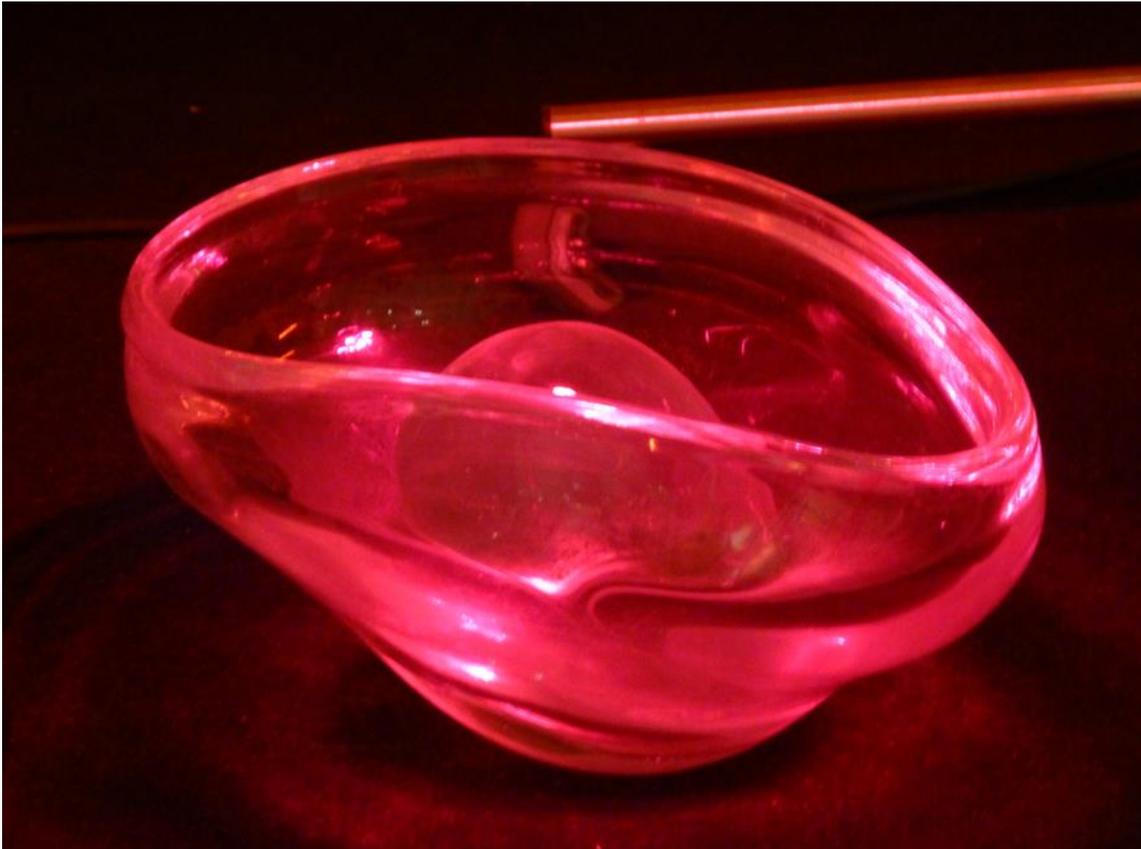
### Uso de refracción en obras del siglo XXI

Consideraremos ahora el uso del fenómeno refracción en el arte contemporáneo, seleccioné sólo cinco de la infinidad de obras que nos servirían como ejemplo.



*fig. 240 Detalle de la obra EVOLUCIÓN DE UN HÍBRIDO  
Koen Vanmechelen*

El primero que veremos, titulado **EVOLUCIÓN DE UN HÍBRIDO**, es una instalación que se encontraba expuesta en el museo de arte universal en la Habana, Cuba en marzo de 2015, realizada por el artista belga Koen Vanmechelen, para quien la diversidad biológica, cultural, y la interacción entre arte y ciencia constituyen el tema central de su obra. Su arte es un canto a la vida y con ella borra los límites entre naturaleza y cultura, entre arte y ciencia, entre lo humano y lo no humano. Colabora con científicos de diferentes disciplinas y crea el espacio para que los científicos y artistas internacionales reflexionen, debatan y colaboren respecto a los importantes desafíos globales.



*fig. 241 Detalle de la obra EVOLUCIÓN DE UN HÍBRIDO  
Koen Vanmechelen*

Las figuras 240 y 241 vemos detalles de la obra *EVOLUCIÓN DE UN HÍBRIDO*, en la que el artista utilizó como materiales tazones de vidrio, huevos de vidrio, acero inoxidable, lámparas, agua, poliamida y lámparas de neón.

Vanmechelen se vale de la refracción para crear efectos en el piso con la luz que se refracta a través de los “nidos” de vidrio y modifican la trayectoria de los rayos provenientes de las lámparas que el artista coloca estratégicamente sobre cada nido.

Vemos a través del nido objetos deformados (fig. 241), imágenes que se producen por el cambio de dirección de la luz al pasar por el vidrio y que pueden ser utilizadas en la expresividad de esta obra de arte conceptual.

La luz que se refleja y se refracta en los nidos y huevos nos los hace ver luminosos, como si la luz proviniera de ellos, los huevos iluminan el entorno con la simbología que esto conlleva.



*fig. 242, BOTELLA PERFECTA,  
Luca Pancrazzi 2007*

La segunda obra que veremos es **BOTELLA PERFECTA**, del artista italiano Luca Pancrazzi, que es uno de los principales artistas de Europa y utiliza los efectos de la refracción y las sombras para construir una botella inexistente.

La luz que proviene de una fuente a la derecha en la fotografía de la figura 242 se refracta en dos vasos con agua y converge en una línea iluminada que hace de brillo en la botella dibujada con la sombra de los mismos vasos.

Este artista tiene varias obras en las cuales utiliza los efectos de la refracción, entre ellos es muy conocido “**MASERATIRUNDUM**” que vemos en la fotografía de la figura 243 y que consiste en un automóvil cubierto de trozos de vidrio roto en los que se producen múltiples refracciones y reflexiones modificando totalmente el aspecto de la superficie del automóvil, más adelante, en el tema color analizaremos porqué el color del auto se aclara al cubrirlo con estos trozos de vidrio.



fig. 243 MASERATIRUNDUM  
Luca Pancrazzi

Pancrazzi dice que el vidrio, que se aplica en un proceso único que ha creado, revela un reino de profundidades y arquetipos de mundos ocultos escondidos.

La obra de arte MASERATIRUNDUM fue creada para representar a Italia en la segunda Bienal de Moscú de Arte Contemporáneo y como pieza central para el diseño y el arte italiano que demuestra el estilo, la elegancia y la vitalidad de Italia.



fig. 244 IGLESIA ARCO IRIS museo de arte contemporáneo Tokio  
Tokujin Yoshioka [FUENTE](#)

La cuarta y quinta obra que veremos como ejemplos de refracción en obras del siglo XXI son del artista japonés Tokujin Yoshioka y se expusieron en museo de arte contemporáneo de Tokio en enero del año 2014.



*fig. 245 IGLESIA ARCO IRIS museo de arte contemporáneo Tokio  
Tokujin Yoshioka [FUENTE<sup>101</sup>](#)*

La instalación IGLESIA ARCO IRIS tiene una altura de 12 metros y una torre compuesta por 500 prismas de cristal que descomponen la luz solar en los colores del arcoíris generando en el interior una luminosidad colorida. El artista se inspiró para esta obra en la CAPILLA ROSAIRE diseñada por Enrique Matisse que también ilumina el interior con los efectos de la luz que se refracta a través de vidrios, aunque en el caso de Matisse los vidrios son coloreados y en la instalación IGLESIA ARCO IRIS los colores se producen por la dispersión de la luz blanca al pasar a través de prismas.

---

<sup>101</sup> <http://www.designboom.com/design/tokujin-yoshioka-at-museum-of-contemporary-art-tokyo-10-16-2013/>

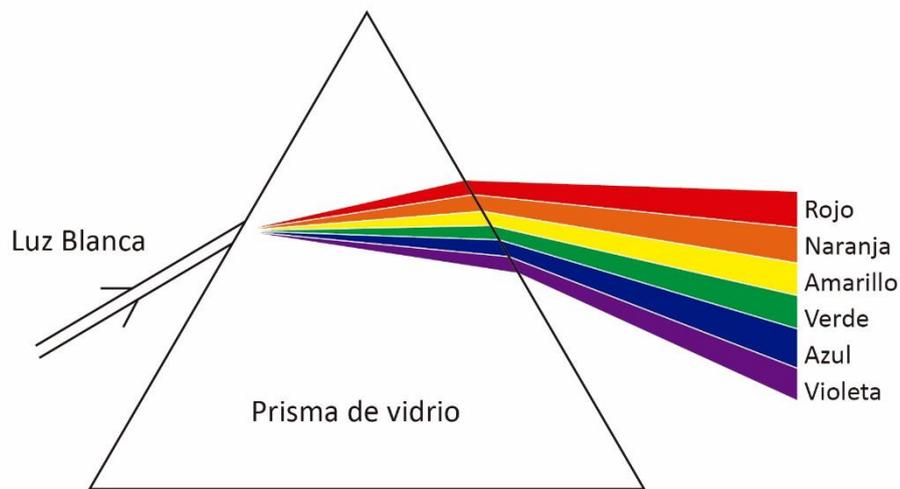


fig. 246 dispersión de la luz al pasar a través de un prisma

¿Por qué en esta obra se descompone la luz?

La luz blanca está formada por ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias que corresponden a colores diferentes, cuando la luz se propaga en el vacío, todas las ondas electromagnéticas lo hacen a la misma velocidad, que representamos con la letra  $c$  y su valor es  $c=3,0 \times 10^8 \text{m/s}$ , pero cuando entran en el cristal del prisma, cada frecuencia adquiere una velocidad levemente diferente que se traduce en distinta desviación para cada color, el rojo es el que menos se desvía y el violeta el que sufre mayor desviación, debido a la forma del prisma, este efecto se acentúa al atravesar la segunda interfase cristal-aire Fig. 246.



*fig. 247 RAYO DE LUZ*  
Tokujin Yoshioka [FUENTE](#)<sup>102</sup>

Otra obra de Tokujin Yoshioka, en la que hace uso de esta propiedad de los prismas es la escultura RAYO DE LUZ que vemos en las figuras 247 y 248.

---

<sup>102</sup> <http://www.designboom.com/design/tokujin-yoshioka-at-museum-of-contemporary-art-tokyo-10-16-2013/>

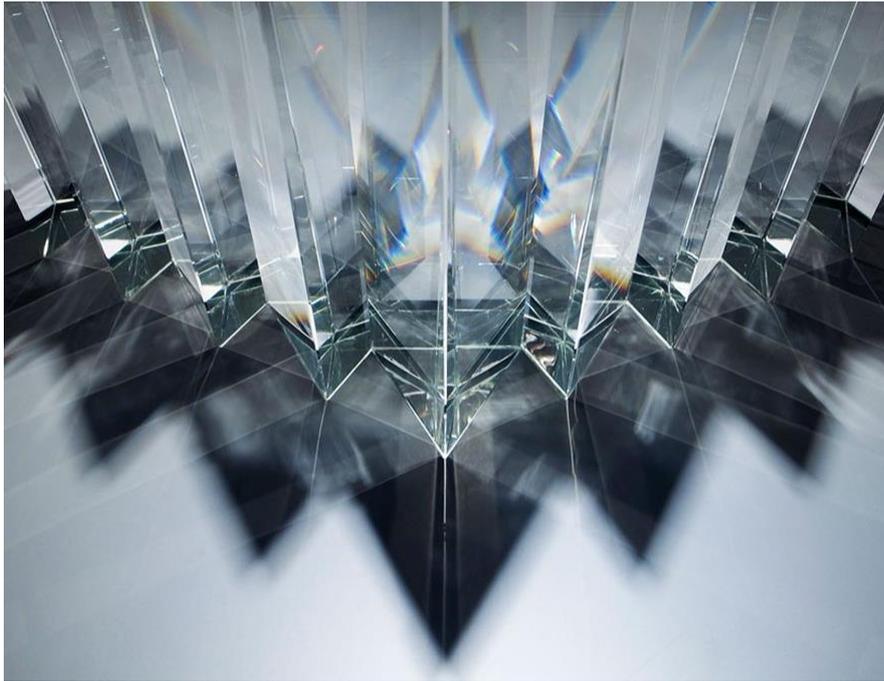


fig. 248 Detalle de RAYO DE LUZ, Tokujin Yoshioka [FUENTE](#)<sup>103</sup>

Yoshioka hace pasar la luz por un conjunto de nueve largos prismas, colocados verticalmente formando una estructura en forma de un ángulo, y recoge la luz dispersada en una pantalla que en este caso es la pared.

### REFLEXIÓN TOTAL INTERNA

Cuando la luz se refracta pasando de una sustancia de mayor índice de refracción a una de menor índice de refracción, y el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite o ángulo crítico, se produce la reflexión total interna.

El fenómeno se esquematiza en la figura 249 donde se representan dos medios con diferentes índices de refracción,  $n_1$  es el índice de refracción de la sustancia de la cual proviene la luz y  $n_2$  el índice de refracción de la otra sustancia. En este caso  $n_1 > n_2$ .

Se representan rayos de luz que inciden en la superficie de separación desde el medio uno, con ángulos de incidencia que van aumentando paulatinamente.

---

<sup>103</sup> <http://www.designboom.com/design/tokujin-yoshioka-at-museum-of-contemporary-art-tokyo-10-16-2013/>

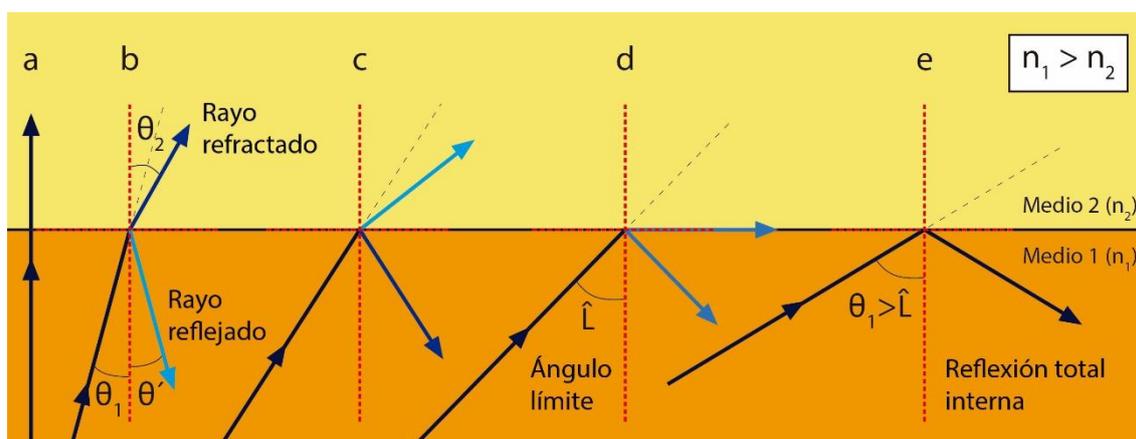


fig. 249 Reflexión total interna

En el caso **a**, la luz incide perpendicularmente a la superficie de separación de los medios, su dirección coincide con la normal a la superficie, por lo tanto el ángulo de incidencia es cero.

Según la ley de Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

Donde  $\theta_1$  es el ángulo de incidencia y  $\theta_2$  el ángulo de refracción.

Los índices de refracción ( $n$ ) no pueden valer cero porque son el cociente entre dos velocidades,  $c$  que es la velocidad de la luz en el vacío y  $v$  que es la velocidad de la luz en el medio. La velocidad de la luz es máxima en el vacío, por lo tanto  $c > v$  y  $n > 1$

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

Volviendo a la ley de Snell aplicada al caso **a**:

$\sin 0 = 0$ , por lo que para que se cumpla la igualdad de la ecuación 1,  $\sin \theta_2$  también deberá ser cero y el rayo no se desvía.

Para los casos **b** y **c** de la figura 249, parte de la luz que incide en la superficie de separación se refleja, regresando al medio 1, y otra parte se refracta pasando al medio 2, separándose cada vez más de la normal a medida que aumenta el ángulo de incidencia.

En el caso **d** el ángulo de refracción es de  $90^\circ$ , la dirección del rayo refractado coincide con la superficie de separación y parte de la luz se refleja. El ángulo de incidencia para el cual el ángulo de refracción es  $90^\circ$ , se llama ángulo límite ( $\hat{L}$ ) o ángulo crítico.

Para todo ángulo mayor al ángulo límite, la luz se refleja en la superficie como si fuera un espejo, deja de refractarse y se refleja totalmente como en el caso **e**, este fenómeno se llama reflexión total interna.

Cuando tratamos acerca del cuadro de Escher FIG. 175 Litografía, TRES MUNDOS, determinamos el ángulo límite en la superficie de separación agua–aire que resultó de  $49^\circ$ , esto quiere decir que si un rayo de luz va desde el agua al aire con un ángulo de incidencia mayor a  $49^\circ$ , no atraviesa la superficie, regresa al agua reflejándose en la interface como si ésta fuera un espejo.

<b>Índices de refracción aproximados de algunas sustancias</b>	
para una longitud de onda de 589 nm	
Agua	1,3
Vidrio crown	1,5
Vidrio flint denso	1,7
Vidrio Flint de lantano	1,8
Diamante	2,4

Tabla 1

El vidrio tiene un índice de refracción mayor que el agua, y varía de acuerdo al tipo de vidrio como podemos ver en la tabla 1, si determinamos el ángulo límite para la interfase vidrio-aire, como lo hicimos para agua-aire en la sección “M. Escher y la reflexión”, obtendríamos un ángulo límite que dependiendo del vidrio varía entre  $34^\circ$  y  $42^\circ$  aproximadamente.

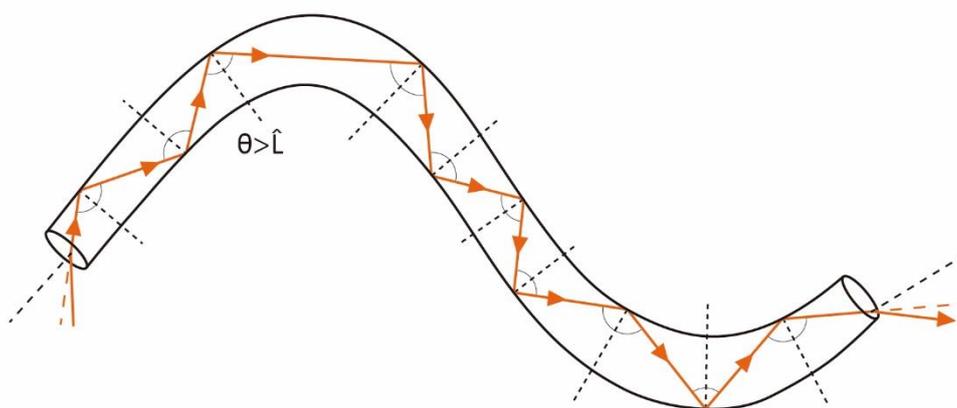
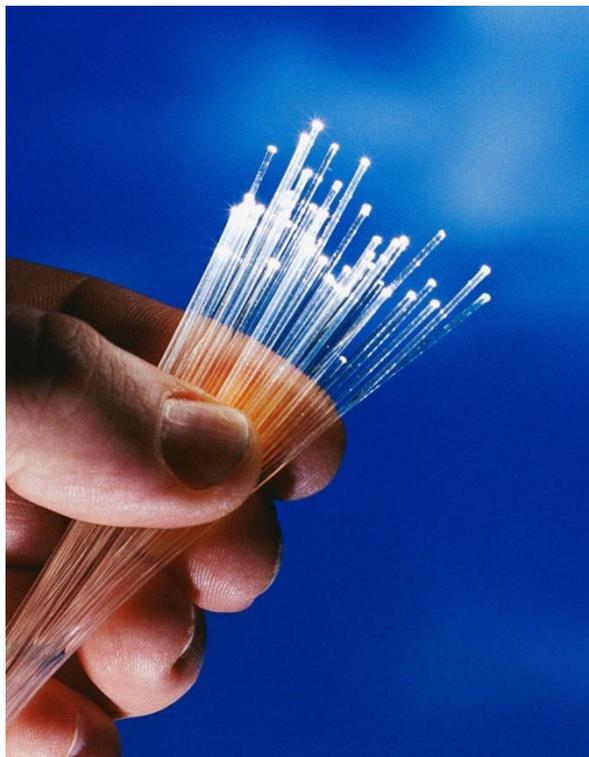


fig. 250 Esquema de fibra óptica

Esto quiere decir que si un rayo de luz penetra en una fibra el vidrio, sólo podrá salir si incide en la interfase vidrio-aire con un ángulo inferior a  $34^\circ$  (para el vidrio Flint de

lantano), si el ángulo de incidencia es superior a  $34^\circ$  se produce el fenómeno de reflexión total interna y el rayo de luz seguirá una trayectoria semejante a la de la figura 250, producto las múltiples reflexiones en la superficie de separación, esto es lo que sucede en la fibra óptica, en ella la luz es conducida al otro extremo por la fibra flexible y se puede iluminar o llevar información a lugares distantes y a veces de difícil acceso



*fig. 251 Fibras ópticas*

Este fenómeno es estudiado por científicos y extensamente utilizado en tecnología, aplicado en la fibra óptica que utilizan artistas y arquitectos en sus obras.

Uno de los artistas que utiliza habitualmente fibra óptica en sus instalaciones y esculturas es el inglés Bruce Munro. Vemos las fotografías de algunas de sus instalaciones en las figuras 252 a 254



fig. 252 EL CAMPO DE LA LUZ, Longwood Gardens, USA  
Bruce Munro 2012 [FUENTE](#)<sup>104</sup>



fig. 253 EL CAMPO DE LA LUZ Cheekwood Gardens, EE.UU.,  
Bruce Munro 2013 [FUENTE](#)<sup>105</sup>

Las dos instalaciones anteriores, tituladas EL CAMPO DE LA LUZ, realizadas en fibra óptica, vidrio, acrílico y luz, están inspiradas en el brillo del paisaje del desierto, y su renacer con la lluvia, Munro se inspiró en el Desierto Rojo de Australia, el proyecto fue pensado en 1992, lo ha llevado a diferentes países, creando monumentales instalaciones que figuran en el libro de Récord Guinness.

El artista comenta acerca de estas instalaciones:

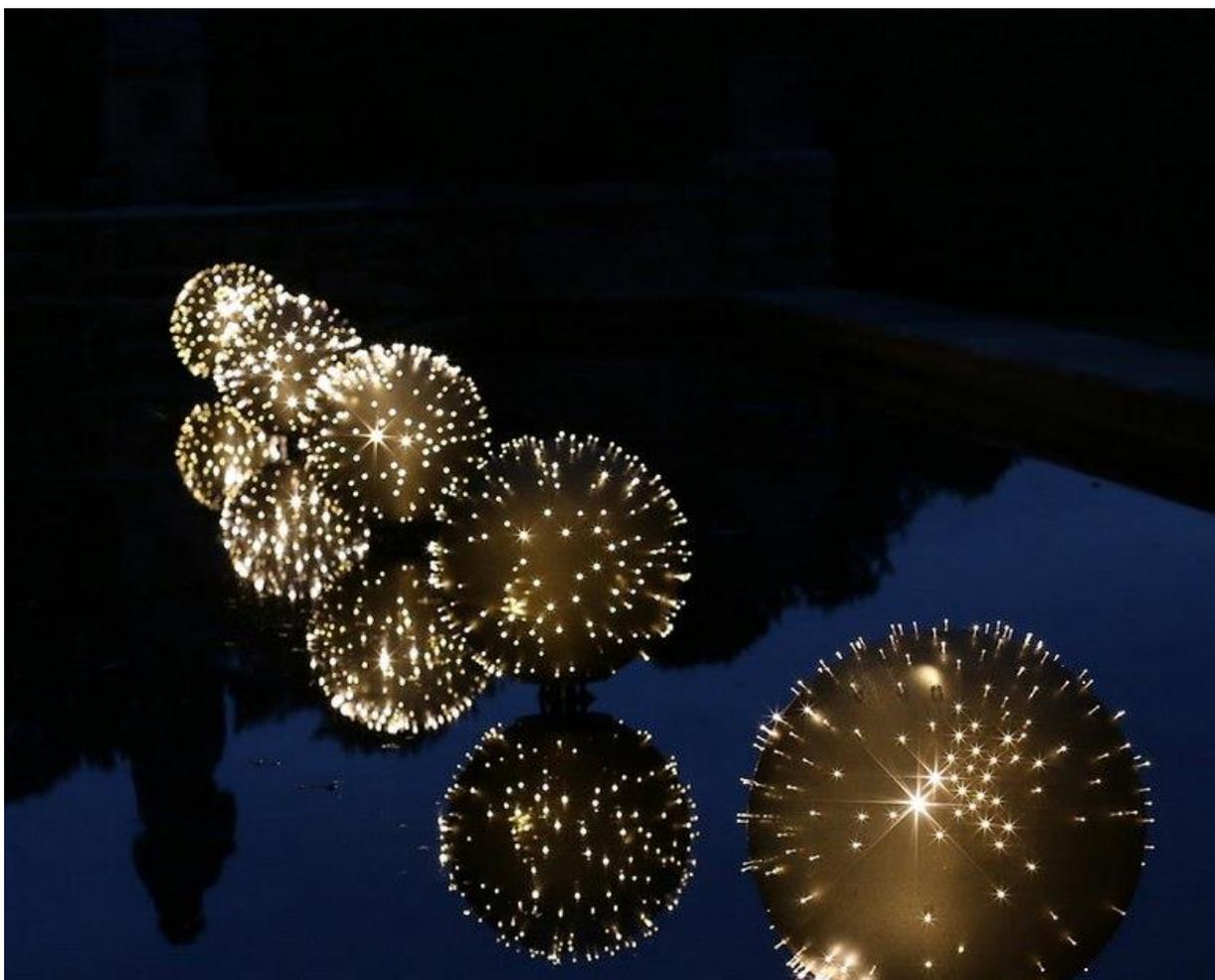
*"Quería crear un campo iluminado de tallos que, como la semilla latente en un desierto seco, habría irrumpido en la floración en la oscuridad con ritmos suaves de luz bajo un manto de estrellas ardiendo"*

Bruce Munro

---

<sup>104</sup> <http://www.brucemunro.co.uk/installations/field-of-light/>

<sup>105</sup> *ibídem*



*fig. 254 ERIZOS DE FAGIN, instalación  
Bruce Munro*

Munro utiliza los avances tecnológicos, experimenta con nuevos materiales y produce obras de gran belleza como ERIZOS DE FAGIN que vemos en la fig. 254, donde el fenómeno de reflexión total interna a través de la fibra óptica, junto al de reflexión especular en el espejo de agua donde está montada la escultura, juegan un papel muy importante.

Munro comenta acerca de esta obra:

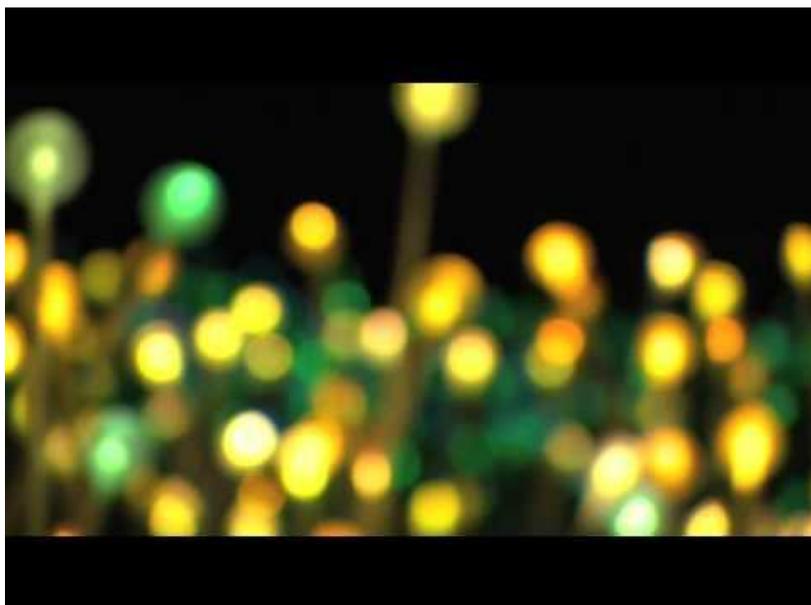
*"Como sucede a menudo cuando veo un espacio, tenía una idea muy clara de lo que quería crear. La colocación de las esferas iluminadas cercanas a la línea de flotación crea la ilusión de diez mundos liliputienses en la noche"*

*Bruce Munro*

En los siguientes videos vemos el montaje de uno de sus Campos de luz y otra instalación del mismo nombre.



*Video 20 Montaje de la instalación "Campo de luz" de Bruce Munro<sup>106</sup>*



*Video 21 Instalación Campo de luz de Bruce Munro.<sup>107</sup>*

El fenómeno de reflexión total interna, además de ser utilizado en múltiples usos tecnológicos, en medicina, comunicación y construcción, ha pasado a formar parte del

---

<sup>106</sup> El lector puede ver este video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=9FZ8Fols8w0>

<sup>107</sup> El lector puede ver este video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=hEpa4C44JTk>

arte, diseño de ropa y arquitectura. En Uruguay también se ha utilizado el fenómeno de reflexión total interna en la arquitectura.



*fig. 255 Foto de la piscina de estancia Vik en José Ignacio, Uruguay*

Un ejemplo que logra impactar al público es la piscina que se encuentra en la estancia Vik de José Ignacio, en el departamento de Maldonado. Durante las horas del día el espejo de agua de la piscina refleja el paisaje, pero a la noche, se encienden en el fondo de la piscina luces que simulan el cielo estrellado del hemisferio sur con sus constelaciones. Sería demasiado complicado para la construcción y el mantenimiento colocar lamparitas en la posición de cada estrella, eso se soluciona con fibras ópticas que conducen la luz desde fuera.



*Video 22 Fuente de la plaza Colón de Tacuarembó Video de Beatriz de Mattos<sup>108</sup>*

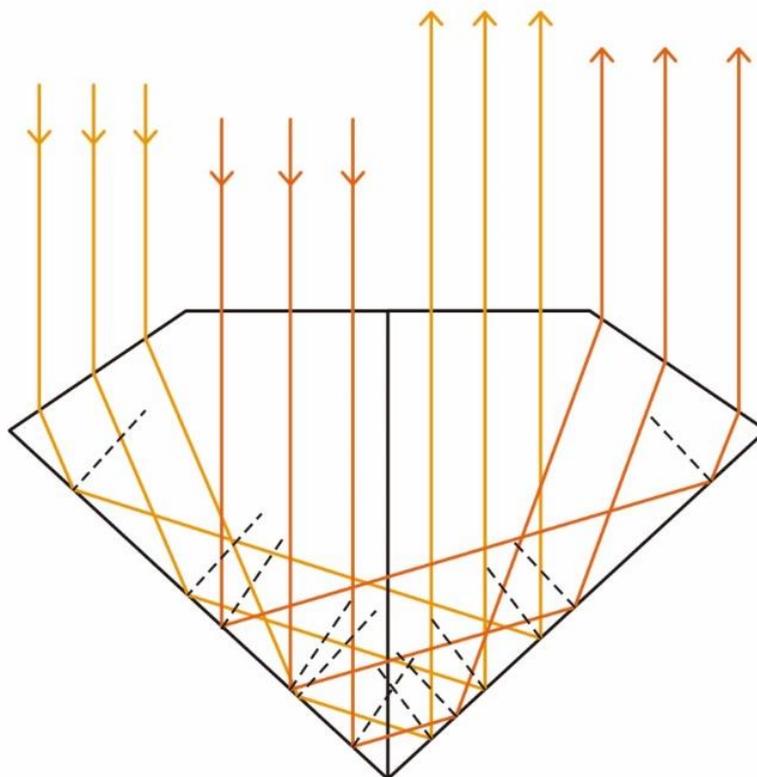
Una fibra de cualquier material transparente, con índice de refracción mayor que el medio en el cual se encuentra inmerso, puede funcionar como fibra óptica, la tanza transparente es un ejemplo, ni siquiera es necesario que sea un material sólido: en un chorro de agua se produce el fenómeno de reflexión total interna y funciona como una fibra óptica, lo vemos en el siguiente video de una fuente en la plaza Colón de Tacuarembó Uruguay.

Los materiales que tienen un alto índice de refracción, como el diamante, son más propicios para que en ellos se produzca el fenómeno de reflexión total interna. Cuando están inmersos en aire, el ángulo límite es pequeño, en el caso del diamante cuyo índice de refracción es 2,4 el ángulo límite para la interfase diamante-aire es aproximadamente 25°.

---

<sup>108</sup> El lector puede ver este video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=1knviyeXtac>



*fig. 256 Esquema de la trayectoria de los rayos de luz en el diamante tallado*

Al tener un ángulo límite tan bajo, se puede “guiar” a la luz mediante un correcto tallado, para que un alto porcentaje de la que entra al diamante se refleje en sus caras posteriores, parte se disperse, y salga por la cara superior (figura 256), creando los brillos característicos de las piedras preciosas talladas.



*fig. 257 Piedras en bruto*

El facetado de las piedras preciosas es lo que dirige la luz, aprovechando los efectos de la reflexión total interna y produce la transformación de las piedras en bruto de la figura 257 en las que vemos en la figura 258.



*fig. 258 piedras después del tallado*



## CREACIÓN DE AMBIENTE A TRAVÉS DE LA LUZ

Imaginemos que entramos a una sala, iluminada con unas pocas velas y la luz rojiza que emite la llama de los leños en la estufa encendida, la sensación es de calidez, la luz de las velas es perfecta para crear ambientes acogedores y cálidos.

Imagine ahora la misma sala, iluminada con varias lámparas que emiten luz azul y blanca.

Aunque un termómetro indique que la temperatura de la sala iluminada con las velas y la iluminada con luces azules es la misma, tendríamos sensaciones diferentes en cuanto a la calidez.

Así como podemos crear efectos en una habitación a través de la iluminación, los artistas nos proporcionan diferentes sensaciones de temperatura con la representación de la luz en sus obras.

En este apartado me referiré específicamente a la creación de ambiente en la pintura a través de la representación de la luz.

### *Creación de ambiente cálido, Francisco de Goya*

En la obra LA ADORACIÓN DEL NOMBRE DE DIOS de Francisco de Goya, también llamado LA GLORIA, vemos un ejemplo de la creación de ambiente a través de los efectos de la luz.



fig. 259 LA ADORACIÓN DEL NOMBRE DE DIOS fresco de Francisco de Goya

Esta pintura realizada al fresco en 1772, se encuentra en la bóveda de lo que se llama comúnmente Coreto, que forma parte de la Basílica de Nuestra Señora del Pilar en Zaragoza, España.

En esta pintura domina una luz cálida que ilumina las nubes, los ángeles, apenas insinuados del fondo nos proporcionan la idea de la nubosidad que difunde la luz cálida proveniente del triángulo que representa la divinidad.

¿Por qué las nubes difunden la luz?

Porque las pequeñas gotitas de agua de las nubes, al ser transparentes, dispersan la luz por dispersión elástica no resonante.

No resonante quiere decir que los electrones se encuentran en su estado de energía mínima o estado fundamental del átomo, si la energía que les llega no coincide con su energía de resonancia, el electrón no cambia a otro nivel energético. En cambio, cuando el electrón salta a otro nivel de mayor energía se dice que el átomo está en un estado excitado, los electrones que cambian de nivel energético son exclusivamente los electrones no apareados, los de valencia.

Cuando la frecuencia de la luz incidente coincide con alguna de las frecuencias de resonancia del átomo. El átomo se excita por un breve lapso de tiempo y luego regresa a su estado fundamental, al regresar a su estado fundamental, devuelve la misma energía absorbida ( $E=hf$ ), la puede devolver en forma de luz, o en materiales densos, es muy probable que se transforme en energía cinética de sus moléculas que percibimos como calor.

Cuando la frecuencia de la luz incidente no coincide con alguna de las frecuencias de resonancia del átomo, como en el caso de las gotitas que forman las nubes, los átomos no se excitan, pero el campo eléctrico variable de la onda electromagnética hace oscilar la nube electrónica de los átomos que permanecen en su estado fundamental, su nube electrónica vibra levemente a la frecuencia de la luz incidente.

El electrón, con carga negativa y vibrando, es una carga acelerada y emite a la misma frecuencia de su vibración, es decir, a la misma frecuencia de la luz incidente. Cada átomo que es iluminado desde una dirección se transforma en una fuente de ondas esféricas que emiten en todas direcciones. A éste fenómeno se le llama dispersión elástica no resonante o dispersión de estado fundamental, porque el átomo se encuentra en su estado fundamental o no excitado.

Esto sucede en las moléculas de agua que forman las nubes, son como pequeños emisores de luz que se interponen entre el fondo y el observador y nos hacen ver desdibujadas y con cierta luminosidad las imágenes del fondo, como lo representa Goya a través de los ángeles esfumados al fondo en la obra **ADORACIÓN DEL NOMBRE DE DIOS**.

En primer plano las figuras aparecen más nítidas, los detalles son más precisos y no se produce el efecto de la difusión de la luz porque no hay tantas gotitas que se interponen entre los personajes y el espectador.

En la parte inferior del cuadro los colores son más oscuros porque las nubes más densas se interponen entre la luz y el espectador, son las zonas más alejadas de la luz y en la metáfora del cuadro, más alejadas de Dios.

Con el manejo de la luz, Goya logra crear un ambiente cálido y representar la profundidad en una superficie bidimensional.

### *Creación de ambientes diurnos, Pierre Auguste Renoir*

Con la representación de los efectos de la luz, los artistas pueden crear ambientes diurnos, nocturnos, o un atardecer, en la figura 260 Renoir crea, con el manejo de la luz, un ambiente diurno, al mediodía, cuando el sol se encuentra en el cenit y en la 263 un atardecer.

En CASA Y FIGURA ENTRE LOS ÁRBOLES estamos frente a un paisaje urbano, el artista nos lo hace sentir como si fuera mediodía a través de los colores de los pigmentos utilizados, vemos el cielo azul, las paredes blancas, verdes los árboles y una rica gama de colores que solo podemos ver cuando se ilumina con luz blanca.



*fig. 260 CASA Y FIGURA ENTRE LOS ÁRBOLES  
Pierre Auguste RENOIR*

Cuando el sol está en el cenit, la luz del sol atraviesa una menor cantidad de aire en la atmósfera y pierde menos componente azul que cuando atraviesa una capa más gruesa.

Cuando un haz de luz avanza en una dirección a través del aire poco denso de las capas superiores de la atmósfera, está atravesando una mezcla de moléculas de sustancias

transparentes como nitrógeno y oxígeno, las moléculas de sustancias transparentes no tienen resonancia en el espectro visible, resuenan en el ultravioleta, es decir que la luz ultravioleta tiene la energía capaz de sacar al átomo de su estado fundamental.

Cuando la luz atraviesa esta mezcla, las nubes electrónicas de los átomos comienzan a vibrar levemente y la amplitud de la vibración es mayor para las frecuencias próximas al ultravioleta.<sup>109</sup>

En el espectro visible, las radiaciones más próximas al ultravioleta son el violeta y el azul, la luz solar tiene mucho más componente azul que violeta, el fotón azul incidente, transfiere su energía a las moléculas y éstas se transforman en dispersores que emiten en todas direcciones luz de la misma frecuencia que la que reciben. Parte del componente azul de la luz se dispersa en todas direcciones mientras que los otros colores continúan su camino, cuanto mayor es la capa de atmósfera atravesada, más azul se dispersa y el haz se empobrece en este color.

El esquema de la figura 261 muestra la luz que llega a la atmósfera, algunas moléculas que componen el aire y un observador al que le llega desde el cielo luz azul dispersada que lo hace ver el cielo azul.

---

<sup>109</sup> En 1871 John William Strutt, también conocido como Lord Rayleigh, llegó a la conclusión de que la intensidad de la luz dispersada es proporcional a  $1/\lambda^4$ , este fenómeno se da para partículas muy pequeñas cuyo diámetro es menor a una  $\lambda$  de la radiación incidente, de allí que la dispersión en partículas de diámetro menor a una  $\lambda$  se llama dispersión de Rayleigh.

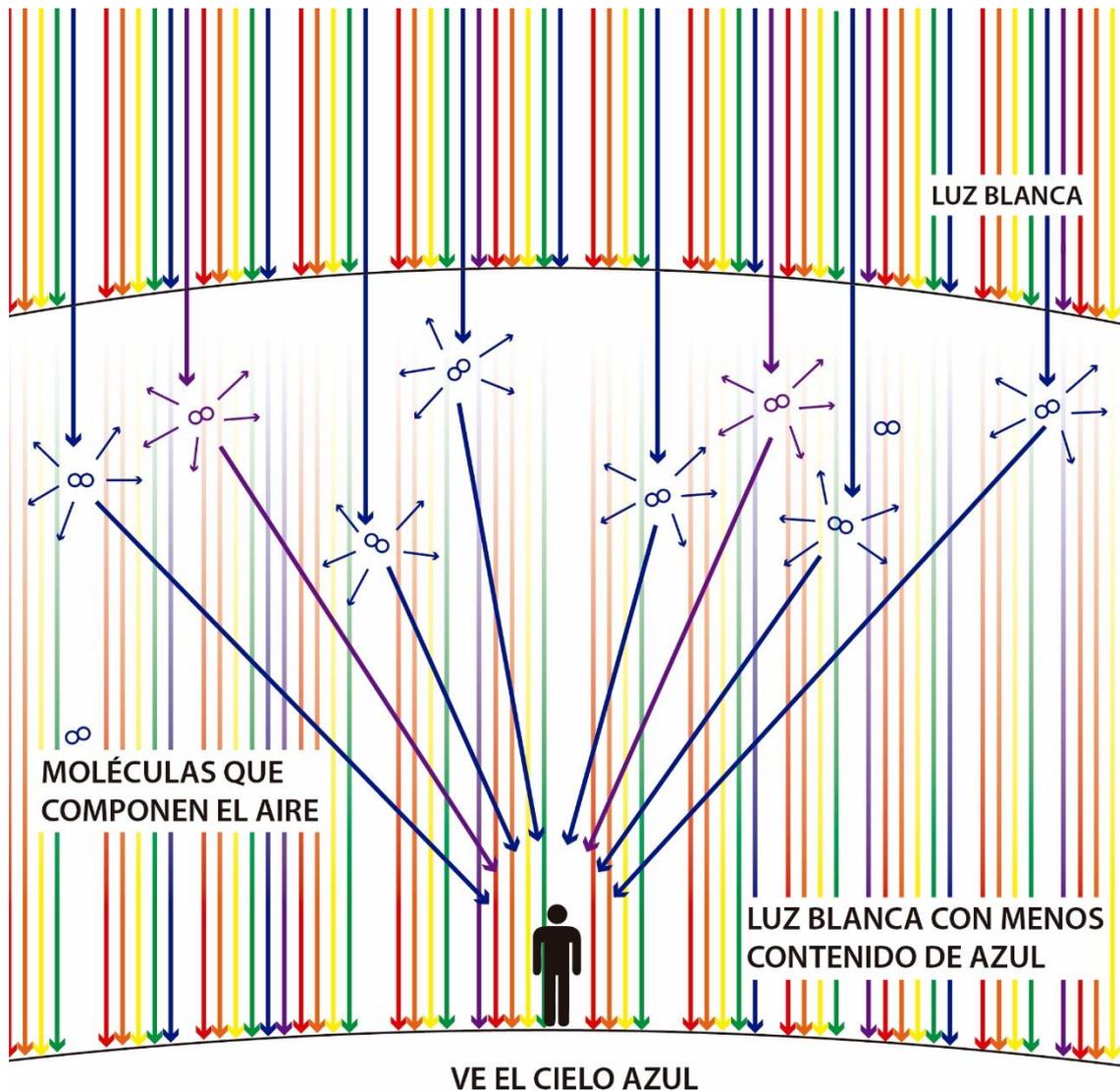


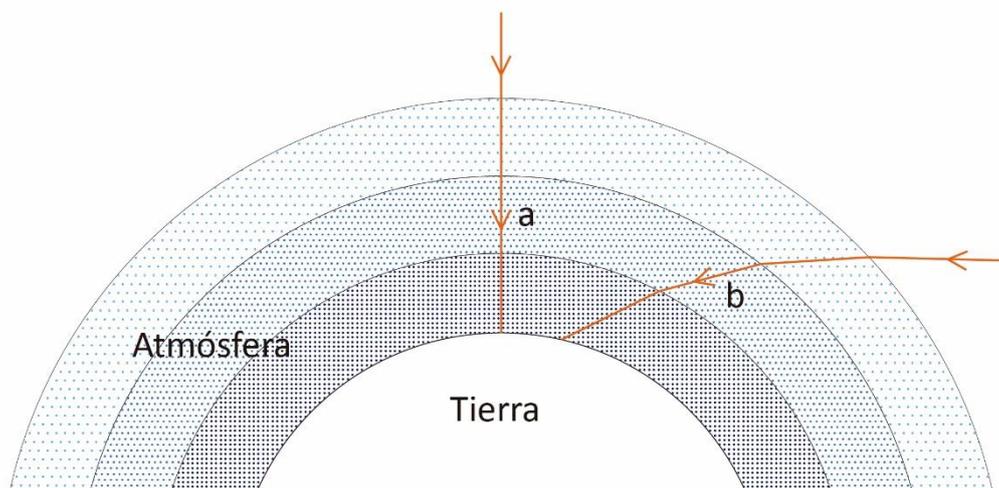
fig. 261 *Dispersión de Rayleigh*

La luz que nos llega al mediodía tiene componentes de todas las longitudes de onda del espectro visible, cuando esta luz blanca incide en una pared blanca, la pared no absorbe prácticamente ninguna radiación, las refleja en todas direcciones y desde la pared llega al ojo del observador que la percibe blanca por contener todas las radiaciones del espectro visible.

La luz que nos llega del sol cuando éste está en el zenit tiene mucho más componentes de altas frecuencias<sup>110</sup> que la que nos llega al atardecer o al amanecer, porque cuando el sol está alto en el cielo atraviesa una capa menor de atmósfera que en el atardecer. En la figura 262 el lector puede ver un esquema donde se muestra la diferencia de

<sup>110</sup> Las frecuencias más altas del espectro visible corresponden al violeta y azul, que son las de menor longitud de onda.

trayectorias, la trayectoria **a** representa la realizada por la luz cuando el sol está en el zenit y la **b** al atardecer. La trayectoria **b** además se curva porque la atmósfera es cada vez más densa a medida que nos aproximamos a la superficie de la tierra por lo que va variando su índice de refracción.



*fig. 262 Luz que atraviesa la atmósfera*

Cuando la luz atraviesa una gruesa capa de atmósfera, la mayoría del componente azul se dispersa en el camino y solo llegan a la superficie terrestre los componentes de mayores longitudes de onda: rojo y los próximos a éste.

Es por eso que cuando RENOIR usa pigmento blanco para pintar las casas de la obra *CASA Y FIGURA ENTRE LOS ÁRBOLES*, nos da la idea de que la luz que llega es blanca, cosa que sucede cuando el sol se encuentra alto en el cielo.

Pintar los árboles en verde, algunos con alto contenido de azul, también es un indicio de que la escena está iluminada con luz blanca, si comparamos el color de los árboles en las figuras 260 y 263 nos damos cuenta de la diferencia de color en el follaje, que nos indica que en el segundo caso la luz que ilumina la escena prácticamente no contiene azul.

En la obra *CASAS EN CAGNES* (figura 263), Renoir pinta las casas, supuestamente de paredes blancas, con colores cálidos. Todo se tiñe de estos colores porque la luz en su trayectoria va perdiendo azul y solo llegan a la superficie terrestre los componentes de mayor longitud de onda.



fig. 263 CASAS EN CAGNES  
Pierre Auguste Renoir

La luz que llega a las paredes prácticamente no contiene azul, por lo tanto las paredes no pueden reflejar este componente y se verán del color de la radiación que les llega.

Renoir logra crear ambientes correspondientes a diferentes horas del día sin mostrarnos directamente la altura del sol, solo a través de los efectos de su luz al atravesar la atmósfera.

#### *Otros ambientes creados a través del manejo de la luz*

Veamos otros ejemplos donde los pintores crean diferentes sensaciones a partir del manejo que hacen de la luz.

En la obra *EL JOVEN MENDIGO*, pintada al óleo sobre lienzo, entre 1645 y 1650 por Bartolomé Esteban Murillo, el artista nos muestra, a través de la representación adecuada de la luz, un ambiente interior. El claroscuro revela una habitación oscura, donde toda la luz proviene de la ventana a la izquierda del observador.



*fig. 264 EL JOVEN MENDIGO,  
Bartolomé Esteban Murillo*

En el cuadro predominan los colores pardos, con componentes cálidos. La escasez de azules junto a la ausencia de blancos concuerda con la dirección de los rayos de luz que entran por la ventana y nos indican que el sol no está en el zenit.

En la obra SEÑORITA MARIE-THERESE D COSIENDO, pintada por el artista impresionista francés Pierre Auguste Renoir, vemos un ambiente exterior y diurno, la luminosidad y los colores nos revelan la proximidad con las horas del mediodía.



*fig. 265 SEÑORITA MARIE-THERESE DURAND-RUEL COSIENDO  
Pierre Auguste Renoir*

Esta obra pintada en el año 1882, con óleo sobre lienzo, de 64,9cm x 54cm, representa a una adolescente de 14 años, hija de un marchante francés que fomentó, a través de sus galerías, la carrera de los pintores impresionistas.

Vemos azules, blancos y una extensa gama de colores intensos que denotan la presencia de todos los colores que componen la luz blanca cuando el sol está próximo al zenit.

También a través de los efectos de la luz, los artistas crean ambientes íntimos, o enfocan la atención del espectador sobre una zona del cuadro, como se hace en el teatro cuando se ilumina a uno de los actores para que el público focalice en él.



fig. 266 LA SAGRADA FAMILIA DEL PAJARITO Bartolomé Esteban Murillo

Ejemplos de esto son las obras del pintor español Bartolomé Esteban Murillo: LA SAGRADA FAMILIA DEL PAJARITO y LA ADORACIÓN DE LOS PASTORES que se muestran en las figuras 266 y 267 respectivamente.

LA SAGRADA FAMILIA DEL PAJARITO fue pintada en 1650, en óleo sobre lienzo, mide 144cm x 188cm y actualmente se encuentra en el Museo de arte del Prado de Madrid.

La obra representa una escena doméstica que es una alabanza a la vida familiar, sencilla, de trabajo, representada por: la Virgen que realiza un trabajo doméstico, su costurero y el banco carpintero de San José. Los padres atentos al niño y el gesto de protección de San José, transmiten ternura en una escena intimista típica de la pintura religiosa de Murillo.

Este ambiente de intimidad es reforzado por el manejo que Murillo hace de la luz a través del claroscuro que muestra un ambiente poco iluminado, donde la luz no llega a alumbrar las paredes y predominan los colores cálidos.

Es también a través del manejo de la luz que Murillo centra la atención en el protagonista de la escena, que en este caso es el niño Jesús, iluminado desde la izquierda y focalizando la atención del espectador.

Murillo también utiliza este recurso en LA ADORACIÓN DE LOS PASTORES, pintada en el año 1668 con óleo, sobre un lienzo que mide 282cm x 188cm y actualmente se encuentra en el Museo de Bellas Artes de Sevilla.

En esta obra Murillo focaliza la atención del espectador en la Virgen y el niño por lo menos a través de dos recursos pictóricos: la luz y la nitidez con que trabaja las figuras.



*fig. 267 LA ADORACIÓN DE LOS PASTORES Bartolomé Esteban Murillo*

Enfoca la atención del espectador sobre el tema al iluminar notoriamente más a la Virgen y el niño que a los otros personajes. El niño, al estar más iluminado dirige más luz hacia el espectador, contribuyendo a la metáfora de la representación. La luz que ilumina la escena proviene del personaje más importante: el niño Jesús.

Esta luz tan focalizada crea claroscuros que acentúan el ambiente intimista y el fondo se esfuma sin distraer la atención del tema principal, mientras que los rostros de la Virgen y el niño se ven muy nítidos, con las líneas del dibujo contrastadas.

Éstos son solo algunos ejemplos de obras pictóricas que utilizan el manejo de la luz para crear los ambientes y efectos deseados, no importa si son obras naturalistas o impresionistas, los pintores se valen, para expresarse, del conocimiento que adquieren en cuanto al comportamiento de la luz.



## MATERIALES Y TÉCNICAS DE LA PINTURA

Los materiales que usamos para pintar, el soporte, pigmento con aglutinante y a veces otras sustancias que conforma la pintura, son entidades físicas, por tanto, cumplen con las leyes de la física. El dominio que el pintor tenga de estas leyes juega a favor del artista y su obra.

### RELACIÓN DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN CON LA OPACIDAD DE LA PINTURA

Actualmente casi todos los pintores usan la pintura que ya viene preparada, esto no siempre fue así y todavía existen pintores que prefieren preparar su propia pintura.

Es fundamental para que la pintura sea cubriente<sup>111</sup>, además de las características ópticas del pigmento, la relación entre los índices de refracción del pigmento y el aglutinante, cuando son muy próximos, la pintura no cubre el soporte y podemos ver el fondo a través de ella.

A medida que los índices de refracción del pigmento y el aglutinante se van diferenciando la pintura se va volviendo más cubriente. Con un mismo pigmento se puede obtener una pintura cubriente y otra no cubriente dependiendo del índice de refracción del aglutinante con el que lo mezclo.

SUSTANCIA O PRODUCTO	ÍNDICE DE REFRACCIÓN
aire	1.0
agua	1,32
óleo seco	1,7 – 1,8
resinas	1,51 – 1,53
Creta (pigmento blanco)	1,5
Óxido de titanio (pigmento blanco)	2,8
Aceite de linaza	1,5

Tabla 2

<sup>111</sup> Cubriente quiere decir opaca, que cuando se seca no deja ver el fondo sobre el que se ha aplicado.

Veamos un ejemplo:

La creta o blanco de cal es un pigmento que vemos blanco cuando está al aire, compuesto básicamente por carbonato de calcio, que se conoce y fue utilizado desde la prehistoria.

¿La pintura fabricada a partir de la mezcla de creta y agua será cubriente?

Comparemos sus índices de refracción, que vemos en la tabla 2:

Índice de refracción del agua 1,3

Índice de refracción de la creta 1,5

La diferencia entre estos índices de refracción es muy una pequeña: 0,2. Esto indica que la pintura no será cubriente mientras está mojada, pero cuando se seca, las partículas de creta quedan rodeadas de aire.

Cuando el agua se evapora, la diferencia de los índices de refracción varía.

Índice de refracción del aire 1,0

Índice de refracción de la creta 1,5

Ahora la diferencia es 0,5 y la pintura se vuelve más cubriente que cuando estaba mojada, es lo que sucede cuando pintamos una pared con cal y agua. Sucede algo parecido cuando se escribe con tiza sobre una superficie mojada, al secarse el aire rodea las partículas de pigmento y la escritura se hace mucho más cubriente que cuando las partículas de pigmento estaban rodeadas por agua.

Si mezclamos creta con resina:

Índice de refracción de la creta 1,5

Índice de refracción de la resina 1,5

La diferencia entre los índices de refracción es cero y la pintura será totalmente transparente, lo mismo sucede si mezclamos la creta con aceite de linaza para fabricar pintura al óleo, mezclando el pigmento blanco con el aceite la mezcla resulta transparente. Veremos el porqué de este fenómeno más adelante, en el tema color.

## SOPORTE Y BARNIZ

El soporte es la superficie en la cual se pinta, puede ser papel, cartón, tela, madera, piel, la pared en el caso de un fresco, o cualquier otra superficie no convencional.

Cuando se pinta al óleo, por lo general el soporte está compuesto por un armazón y la superficie del cuadro con el fondo o imprimación.

Para lograr los resultados deseados por el artista es necesario que el soporte y su preparación se adecúen a los efectos que se pretende obtener, de esta forma, la preparación del soporte es parte fundamental del procedimiento creativo y el conocimiento del comportamiento físico de los materiales se transforma en esencial.

Cuando un pintor selecciona como soporte para su obra un material no convencional, generalmente aprovecha sus características físicas y no lo recubre totalmente con imprimación, utiliza como recurso expresivo la rugosidad del material que produce efectos lumínicos diferentes según su textura al ser iluminado.

En cuanto a la imprimación, que es la pintura o sustancia que colocamos sobre el soporte, puede cumplir múltiples funciones, entre ellas: mejorar la adherencia de la pintura, facilitar su aplicación, lograr los efectos expresivos deseados, proteger la tela, impermeabilizarla, o lograr una superficie más lisa cuando es necesario. En todos los casos, conocer las características físicas de los materiales utilizados facilita el trabajo del pintor y la conservación de la obra.

Existen obras en las que la imprimación se realizó con preparados que contienen aceite, el aceite, al envejecer oscurece, queda de color amarillo y luego se torna pardo.

Cuando el aceite se torna amarillo absorbe fundamentalmente la radiación azul y violeta, provocando la variación de color en la obra que va perdiendo los azules y las tonalidades frías. La obra se torna oscura porque la imprimación del fondo comienza a absorber selectivamente parte de la luz, cuanto más oscura se vuelve la imprimación más radiación absorbe (en cuanto a cantidad y frecuencias), y más oscuro se verá el cuadro, sobre todo si fue pintado con la técnica de veladuras.

La absorción selectiva se produce cuando la energía del fotón incidente ( $E=hf$ ) coincide con alguno de los estados excitados<sup>112</sup> del átomo. El átomo, al absorber el fotón se excita, y en sustancias densas como sólidos y líquidos, formados por muchísimos átomos próximos, es muy probable que la energía devuelta por el átomo cuando regresa a su estado fundamental se transforme, a través de choques, en energía cinética de los átomos y el cuerpo aumente su temperatura en un  $\Delta T$ .

Esta variación de temperatura es indetectable cuando se trata de un solo átomo, pero sumando la energía reemitida por una enorme cantidad de átomos la variación de temperatura se hace apreciable, lo podemos comprobar cuando colocamos dos cuerpos del mismo material durante el mismo tiempo al sol con la única diferencia de que uno de ellos es blanco y el otro negro, luego de pasado cierto tiempo, al tocarlos nos daremos cuenta de que, el de color negro, está a mayor temperatura que el blanco, esto es porque el negro absorbe selectivamente la mayoría de las radiaciones, mientras que el blanco los refleja.

Por esta razón cuanto más oscura se vuelve la imprimación, más oscuro se verá el cuadro. El aceite de linaza que se usaba para la imprimación y también en la preparación de pinturas al óleo, aumenta su índice de refracción a medida que envejece, y la pintura, después de muchos años, comienza a tornarse transparente a medida que el índice de refracción del aceite se va aproximando al del pigmento. En los cuadros que fueron

---

<sup>112</sup> Se dice que un átomo está excitado cuando no está en su estado fundamental debido a que alguno de sus electrones de valencia saltó a un nivel superior de energía.

pintados con exceso de aceite la linaza, las figuras comienzan a desvanecerse, y muchas veces aparecen “fantasmas” debajo, vestigios de otras obras que el artista desechó y aprovechó el mismo soporte sin quitar la pintura del fondo.

Los barnices, al igual que el aceite de linaza se oxidan modificando el color original del cuadro, es por ello que muchos procesos de restauración consisten fundamentalmente en retirar la capa de barniz oxidado que no permiten ver la coloración de la obra, un ejemplo es la restauración realizada en el Museo Thyssen-Bornemisza de la obra **HÉRCULES EN LA CORTE DE ONFALIA**, pintada en óleo sobre tabla por Hans Cranach en 1535. Por ser una obra tan antigua, su barniz ha sufrido una importante oxidación a lo largo de los años que impedía apreciar los colores originales, las variaciones de tonalidades y la calidad original de la pintura. El proceso de restauración consistió fundamentalmente en retirar el barniz amarillento a causa de su oxidación.

La diferencia de colores en la obra, antes y después de la restauración es notable (figuras 268 y 269) como lo acredita el informe de restauración en la página del museo Thyssen-Bornemisza en los siguientes términos.

*“Con la eliminación de la capa de barniz hemos podido recuperar los colores originales que pintó Cranach y descubrir con fascinación que, por ejemplo, el verde del fondo es en realidad un precioso turquesa o que las carnaciones de las mujeres son de un delicado rosado que parece porcelana. Reaparecen, también, todos los matices que quedaron ocultos tras el barniz oxidado, así como una mayor sensación de profundidad.”<sup>113</sup>*

---

<sup>113</sup> Museo Thyssen-Bornemisza, restauración y estudio técnico de la obra **HÉRCULES EN LA CORTE DE ONFALIA**, [acceder a publicación interactiva](#)

<http://pdigital.museothyssen.org/index.html?revista=87224685&pagina=-6929>



fig. 268 HÉRCULES EN LA CORTE DE ONFALIA antes de la restauración  
Hans Cranach



fig. 269 HÉRCULES EN LA CORTE DE ONFALIA después de restaurado  
Hans Cranach

## VELADURAS

Si bien todas las técnicas de pintura tienen relación con física, trataremos el tema veladuras en la pintura al óleo por la importancia que tiene y ha tenido en el arte, por los efectos ópticos que se producen en las veladuras, porque están relacionadas con la refracción de la luz y con el tema filtros.

Podemos acceder a estudios, realizados y compartidos por museos, acerca de obras pintadas por los grandes maestros de la pintura que utilizaban esta técnica.

Tiziano, el siglo XIV aplicó magistralmente la técnica de veladura que fue ampliamente utilizada en el renacimiento (siglos XV y XVI) y en el siglo XVII por muchos pintores, entre ellos Rembrandt y Velázquez, quien añadía color y luminosidad a las telas a través de veladuras.



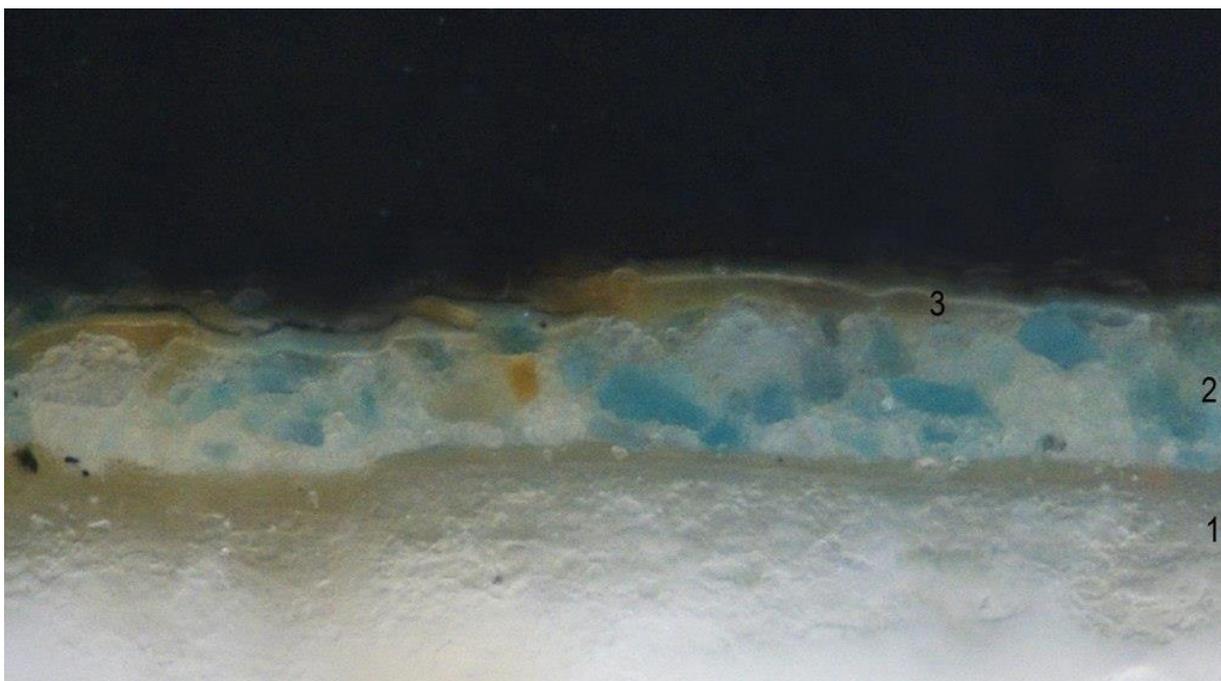
*fig. 270 Baco y Ariadna  
Tiziano (1519-1523)*

La técnica de veladura consiste en cubrir la pintura ya seca con una capa transparente que contiene un poco de pigmento, o con una laca, que es transparente y coloreada. De esta forma se modifica el color de la zona y aumenta su luminosidad sin perder lo trabajado en el fondo.

Si pintamos a partir del mismo punto de pintura opaca al óleo dos zonas de un cuadro, en un caso lo aplicamos directamente y en el otro a través de veladura, el resultado será sorprendentemente diferente. El color aplicado con la técnica de veladura nos parece

mucho más luminoso y deja ver el fondo, nunca podríamos haber obtenido ese resultado aplicando el color opaco directamente.

Debo aclarar que estos efectos se ven mirando directamente la obra, lamentablemente no se los puedo mostrar en este trabajo porque dichos efectos no se perciben en fotografías o impresiones del cuadro. Es un efecto óptico que se produce por la veladura, la fotografía o impresión del cuadro no tiene la capa transparente donde se refracta la luz, no lo vemos igual y la explicación está en la física.



*fig. 271 Imagen de sección transversal del fondo en la obra HÉRCULES EN LA CORTEDE ONFALIA de Hans Cranach [FUENTE](#)<sup>114</sup>*

¿Por qué el color aplicado con la técnica de veladura es mucho más luminoso?

Para responder a esta pregunta comparemos la conformación de las capas de pintura en dos zonas del cuadro HÉRCULES EN LA CORTEDE ONFALIA.

Las figuras 271 y 272 son imágenes de cortes transversales microscópicos donde se pueden apreciar las capas de pintura y el barniz<sup>115</sup> protector que recubre la obra. La muestra roja (Fig. 272) contiene veladura y la azul no.

El corte mostrado en la figura 271 fue extraída de la zona azul verdosa del fondo a la izquierda, está barnizada con resina dammar y es la capa 3 amarillenta sobre la capa 2,

<sup>114</sup> <http://pdigital.museothyssen.org/index.html?revista=87224685&pagina=9793>

<sup>115</sup> En este caso es barniz dammar: barniz elaborado a partir de resina dammar que es una resina natural, proveniente de los árboles.

que es la pintura azul verdosa donde se ven claramente los granos de azurita molida con los que se fabricaba la pintura al óleo azul, y los de tierra amarilla que el artista mezcló con blanco de plomo para lograr el color del fondo.

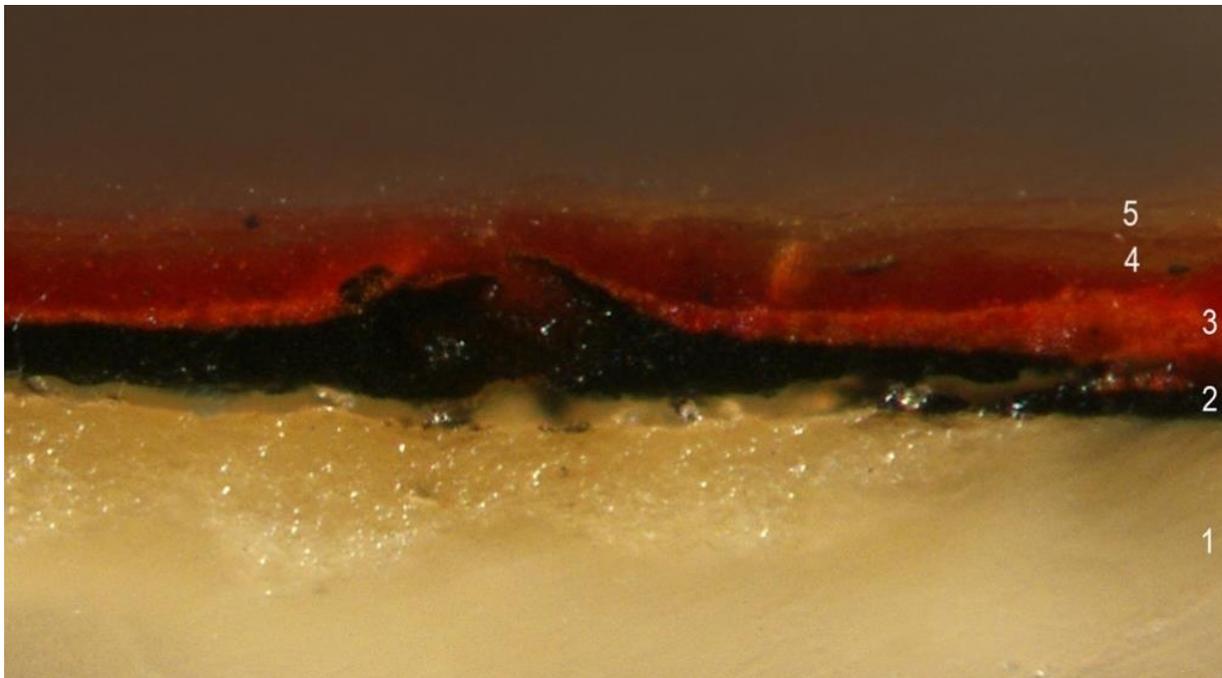


fig. 272 Imagen de sección transversal del vestido rojo en la obra *HÉRCULES EN LA CORTEDE ONFALIA* de Hans Cranach [FUENTE](#) [Ampliar imagen](#)<sup>116</sup>

El corte mostrado en la fig. 272 corresponde al vestido rojo del personaje femenino que queda a nuestra izquierda cuando miramos el cuadro, tiene gruesas capas de veladuras en la que se ha empleado básicamente laca<sup>117</sup> roja (capa 4) sobre una capa de rojo bermellón mezclado con blanco de plomo (capa 3), todo cubierto con barniz dammar (capa 5).

En la fig. 273 esquematizamos las capas superiores del vestido rojo que contienen veladuras, suprimimos la capa de barniz con el fin de simplificar y entender el modelo que utilizaremos para comprender por qué vemos las zonas con veladuras más luminosas.

<sup>116</sup> Ampliar imagen en:

[http://pdigital.museothyssen.org/imgs/211\\_revista/211\\_Adj1\\_22709\\_20140119003730.jpg](http://pdigital.museothyssen.org/imgs/211_revista/211_Adj1_22709_20140119003730.jpg)

<sup>117</sup> Laca es una pintura transparente que se usa para veladuras, también se puede utilizar médium mezclado con pintura cubriente.

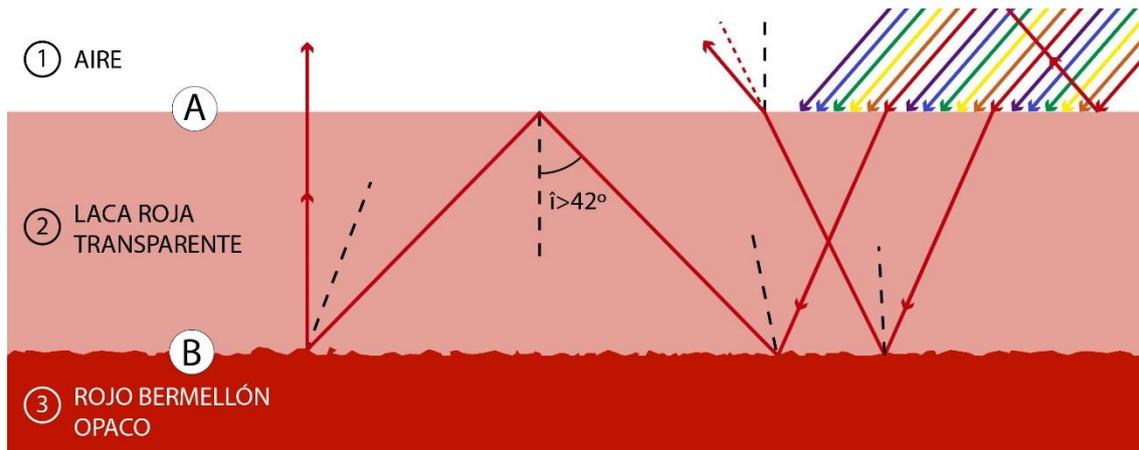


fig. 273 Esquema de veladura roja

La luz blanca incide en la superficie lisa de separación aire-laca (A), parte se refleja y otra parte se refracta penetrando en la laca, los átomos de la laca roja tienen absorción disipativa selectiva para las frecuencias que corresponden al azul y sus frecuencias próximas, esto quiere decir que sus átomos resuenan con la luz azul, verde y amarilla, que absorbe la laca, mientras que el rojo continúa su camino hasta llegar a la capa 3 que solo refleja rojo, esa superficie es rugosa, tiene los surcos de las cerdas del pincel y refleja difusamente, la luz roja al final emerge nuevamente y el ojo percibe la superficie como más luminosa.

El índice de refracción de las lacas<sup>118</sup> es aproximadamente de 1.5 y el del aire 1.0, cuando la luz llega a la superficie de separación (A) desde la veladura se puede producir el fenómeno de reflexión total interna. Determinemos el ángulo límite para la superficie de separación laca-aire (A en la fig. 273):

$$\sin \hat{L} = \frac{1.0}{1.5}$$

$$\hat{L} = \sin^{-1} \frac{1.0}{1.5} = 42^\circ$$

Cuando el ángulo de incidencia es  $\geq 42^\circ$  se produce la reflexión total interna. Esto quiere decir que la luz entra a la veladura desde el aire con cualquier ángulo pero solo sale nuevamente al aire cuando incide en la superficie de separación laca-aire (A) con un ángulo de incidencia es menor a  $42^\circ$ .

Estas múltiples reflexiones, en la superficie de la veladura y en el fondo, junto a la refracción y reflexión total interna, generan un efecto óptico que da la impresión de luminosidad. Para que esto suceda, la obra debe de estar muy iluminada, una obra que

<sup>118</sup> Índice de refracción de la laca de rubia (roja) es 1,55 y de las resinas 1,52±0,01

fue trabajada con la técnica de veladura necesita, para apreciar su esplendor, mucha más luz que otra pintada con colores opacos.

En el ejemplo anterior se utilizó la técnica de veladura para intensificar y dar luz al vestido rojo, pero también se puede cambiar el color a través de las veladuras, veamos un ejemplo con el que además podemos entender el cambio de color en el fondo que observamos en el cuadro **HÉRCULES EN LA CORTEDE ONFALIA**.

En la figura 271 la capa tres es barniz dammar que ha quedado amarillo con el tiempo produciendo el mismo efecto que una veladura amarilla sobre la capa de pintura azul del fondo, esta capa de barniz se quitó en la restauración y el fondo pasó a ser nuevamente azul.

Analicemos porqué se produce el cambio de color del fondo a partir del esquema (fig. 274) que representa un corte del fondo azul con una veladura amarilla.

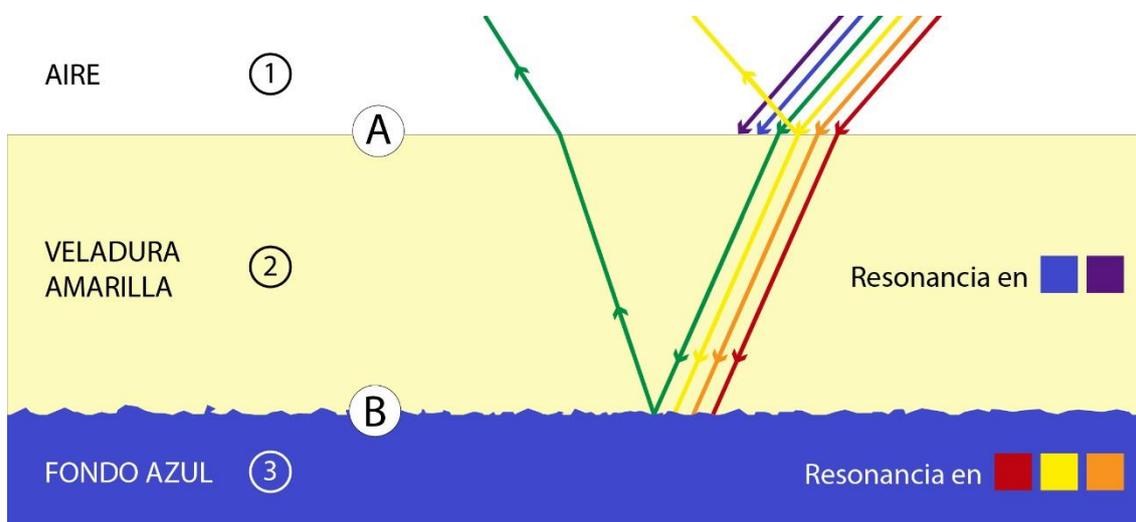


fig. 274 veladura amarilla sobre fondo azul

Cuando el cuadro es iluminado con luz blanca, parte de la luz se refleja en la superficie de separación A y otra se refracta atravesando la veladura amarilla (2). Los átomos del pigmento y laca amarilla resuenan, y por lo tanto absorben, la radiación azul y violeta. Pasa luz roja, anaranjada, amarilla y verde que llega al fondo azul.

Los átomos del pigmento azul resuenan con las frecuencias del rojo, anaranjado y amarillo, absorbe esta radiación de la luz incidente y solo refleja el verde que atraviesa nuevamente la veladura y emerge hacia el aire. Al ojo del observador llega desde el fondo solamente luz verde.

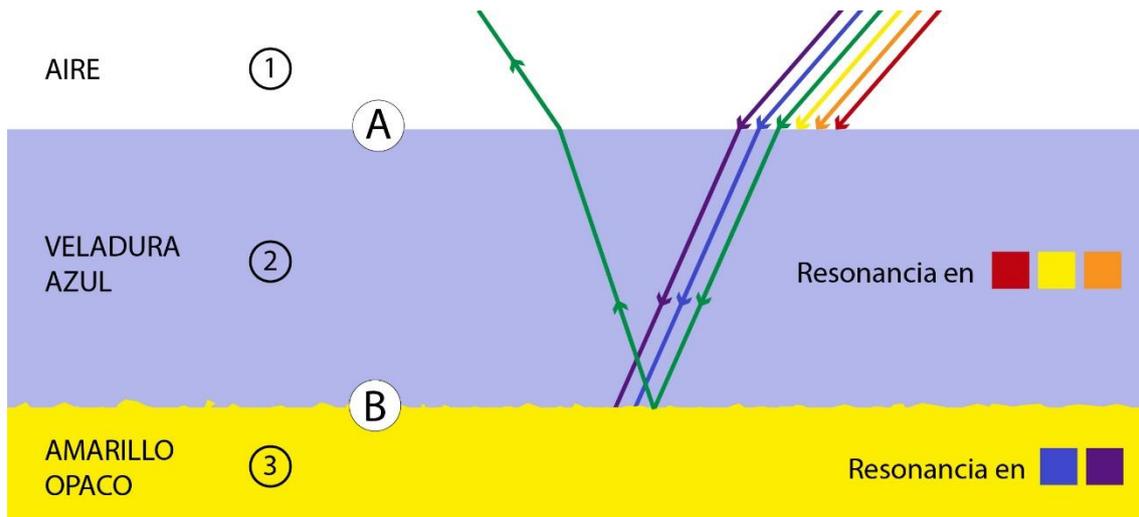


fig. 275 Fondo amarillo y veladura azul

También se puede lograr verde a partir de un fondo amarillo con una veladura azul (fig. 275), es lo mismo que colocar un filtro azul sobre una superficie amarilla.

La luz blanca al atravesar la veladura azul pierde el rojo amarillo y anaranjado, sólo pasan el azul, violeta y verde que llegan al fondo amarillo.

El fondo amarillo absorbe luz azul y violeta, sólo permanece el verde que se refleja, atraviesa nuevamente la veladura y emerge de la superficie del cuadro.

Con el objetivo de simplificar los esquemas, en los últimos dos ejemplos se omitieron rayos que se reflejan en la superficie A y los que producen el fenómeno de reflexión total interna, pero al igual que en la veladura roja sobre fondo rojo (fig. 273), se produce este fenómeno y las veladuras de colores diferentes al fondo también lucen con especial luminosidad.



## COLOR

El tema color es muy extenso y excede las posibilidades de este trabajo por lo que nos referiremos solamente a lo que considero fundamental para el curso de segundo de bachillerato artístico:

- ➔ Características de color.
- ➔ Mezcla de pigmento (sustractiva)
- ➔ Mezcla de luz (aditiva).

Muchas veces hemos dicho “una manzana roja” o “ese lápiz verde”, como si el color rojo o verde fuera una propiedad del objeto, sin embargo, si iluminamos esa manzana con luz azul ¿Seguimos teniendo la sensación de rojo?

Si su respuesta fue no, está en lo correcto, la sensación de color depende de la luz con que se ilumina, no es una propiedad del objeto, en realidad el color es un fenómeno que ocurre en nuestra mente cuando el órgano receptor (el ojo) es estimulado por ondas electromagnéticas.

Cuando una onda electromagnética incide sobre cualquier material, la componente del campo eléctrico de la onda interactúa con las cargas eléctricas del material, esto está sucediendo en este momento con la luz que entra a través de las pupilas en el ojo de quien está leyendo esta página.

El ojo es un transductor muy eficiente, transforma energía de una pequeña porción del espectro electromagnético en energía eléctrica que se trasmite a través del nervio óptico al cerebro.

El espectro electromagnético es continuo porque contiene todas las longitudes de onda, no existe un límite entre unas ondas y otras, solo se diferencian entre ellas por su frecuencia y longitud de onda ( $\lambda$ ).

La variación de frecuencia tiene aparejado un cambio en la longitud de onda puesto que todas se propagan con la misma magnitud de velocidad en el vacío ( $c=3.0 \times 10^8 \text{m/s}$ ), por lo que el producto  $\lambda \cdot f$  es constante:

$$v = \lambda \cdot f$$

Para las ondas electromagnéticas en el vacío

$$\lambda \cdot f = 3.0 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

Como el producto  $\lambda \cdot f$  es constante, al variar la frecuencia también se modifica la longitud de onda,  $f$  y  $\lambda$  son inversamente proporcionales.

No existe otra diferencia más que frecuencia y longitud de onda entre ondas de radio, rayos x, microondas o luz visible, pero nuestros ojos sólo son sensibles a una pequeñísima porción de ese espectro cuya representación vemos en la figura 276 y que puedes [AMPLIAR](#)<sup>119</sup>.

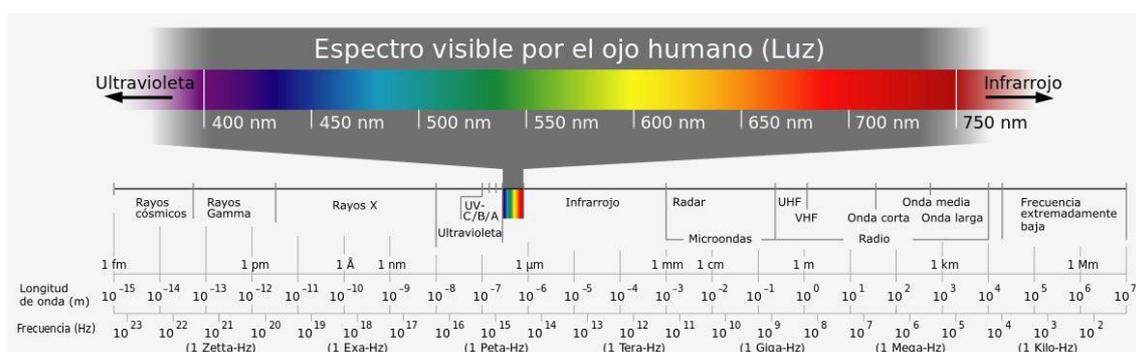


fig. 276 Espectro electromagnético [FUENTE](#)<sup>120</sup>  
[AMPLIAR](#)<sup>121</sup>

Lo que vemos en la figura 276 es una parte del espectro electromagnético puesto que el espectro electromagnético abarca el conjunto de energía radiante que va desde longitudes de onda cero hasta el infinito, de hecho se han medido ondas electromagnéticas con longitudes de onda inmensas, de  $3 \times 10^{10} \text{m}$  (30 millones de kilómetros) que equivale a más de dos mil veces el diámetro de la tierra.

Cuando ondas de esa ínfima porción del espectro electromagnético, que es la luz visible, incide sobre los conos de nuestra retina, tenemos la sensación de color.

Podemos tener la misma sensación de color cuando inciden ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda, por ejemplo: veremos amarillo si nos llegan ondas electromagnéticas de  $\lambda = 600 \text{nm}$  (amarillo), pero también veremos amarillo si nos llegan ondas electromagnéticas de  $\lambda = 530 \text{nm}$  (verde) junto a  $700 \text{nm}$  (rojo).

<sup>119</sup> En la ampliación está cambiada la ubicación de los UV A y C: el UVA es el más próximo al violeta como se muestra en la fig. 276

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Electromagnetic\\_spectrum-es.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Electromagnetic_spectrum-es.svg)

<sup>120</sup> «Electromagnetic spectrum-es». Publicado bajo la licencia CC BY-SA 3.0 vía Wikimedia Commons - [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic\\_spectrum-es.svg#/media/File:Electromagnetic\\_spectrum-es.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg#/media/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg).

<sup>121</sup> Cuidado: en la ampliación, los rayos ultravioletas UV- A/B/C aparecen en el orden inverso, los UVA son contiguos al violeta como se ve en la fig. 276.

Hay diversas explicaciones para este fenómeno, que corresponden a teorías diferentes de la percepción del color, ellas son:

Teoría tricromática.

Teoría de los procesos oponentes.

Teoría retinex.

Trabajaremos fundamentalmente de acuerdo a la teoría tricromática de Thomas Young, según la cual el ojo humano tiene receptores para tres colores primarios (rojo, verde y azul), esta teoría fue desarrollada más adelante por Hermann von Helmholtz, por lo que también es llamada teoría Young-Helmholtz, y por James Clerk Maxwell, quien demostró que cualquier sensación de color puede ser producida a partir de los tres colores primarios.

Thomas Young, el mismo que aportó a las teorías acerca de la naturaleza de la luz con su célebre experimento de la doble rendija que mostraba la naturaleza ondulatoria de la luz, y J. Clerk Maxwell, científico que unificó gran parte de la física en sus elegantes y geniales ecuaciones, aportaron a los conocimientos que utilizan los artistas, tanto influyeron estos científicos en el mundo del arte que a partir de su teoría se origina una nueva corriente artística, el puntillismo, con Georges Pierre Seurat como representante. Los puntillistas lograban la percepción de cientos de colores yuxtaponiendo colores por lo general puros, es decir, a través de la mezcla óptica de pocos colores que dejaron de mezclarse en las paletas de los pintores para hacerlo en el ojo del espectador.

En un intento de entender y dominar la naturaleza, el hombre ha analizado y tratado de entender entre otras cosas, el fenómeno del color, creando modelos que lo explican, intentan medirlo y reproducirlo despojándose de lo subjetivo.

Poder reproducir una sensación subjetiva como el color no ha sido fácil y como en otros temas, los modelos se han ido superando y modificando apoyados en los conocimientos anteriores. Existen varios sistemas que muestran una relación cromática organizada, como el triángulo de Goethe<sup>122</sup>, el árbol de Munsell, el doble cono de Ostwaid entre otros.

Los colores se influyen y modifican unos a otros, interactúan continuamente en nuestra percepción como podemos comprobarlo en el video 23, a un mismo color lo percibimos diferente según su entorno y los colores que lo acompañan, para poder clasificarlo y reproducirlo elegimos uno de los sistemas que lo analizan definiendo sus características.

---

<sup>122</sup> Johann Wolfgang Goethe, el poeta alemán que escribió "FAUSTO", "POESÍA Y VERDAD" y que sostenía: "El oído es mudo, la boca es sorda, pero el ojo percibe y habla. En él se refleja desde el exterior, el mundo y, desde el interior, el hombre.", estudió el color e hizo grandes aportes a la teoría del color.



Video 23 Percepción del color<sup>123</sup>

## CARACTERÍSTICAS DEL COLOR

Las características del color son las propiedades que lo hacen único, le hacen variar su aspecto y definen su apariencia final, hay varios modelos que se han ido perfeccionando con el tiempo y aportes de muchos, las características que trataremos están basadas en uno de los modelos de color más aceptados, el realizado por Albert Munsell en 1905, ellas son:

**MATIZ**

**INTENSIDAD O SATURACIÓN**

**VALOR**

---

<sup>123</sup> El lector puede ver este video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=OMPIEocZrL8>

## MATIZ

Matiz, es el atributo por el cual damos el nombre al color, el que diferencia verde de verde azulado, rojo, anaranjado...Está relacionado con las longitudes de onda de la luz percibida (Tabla 3) pero como ya vimos se puede tener la misma sensación a través de combinaciones de estas radiaciones.

En el ojo los detectores de matiz son los conos que se encuentran concentrados en el centro de la retina, en una zona llamada fovea.

<b>RELACIÓN DE LONGITUDES DE ONDA CON EL MATIZ PERCIBIDO</b>	
<b><math>\lambda</math> ( nm)<sup>124</sup></b>	<b>Nombre del matiz</b>
<b>780 a 622</b>	<b>Rojo</b>
<b>622 a 597</b>	<b>anaranjado</b>
<b>597 a 577</b>	<b>amarillo</b>
<b>577 a 492</b>	<b>verde</b>
<b>492 a 455</b>	<b>azul</b>
<b>455 a 390</b>	<b>violeta</b>

*Tabla 3 RELACIÓN DE LONGITUDES DE ONDA CON EL MATIZ PERCIBIDO  
Los valores son aproximados y dependen de cada persona*

Los colores de la tira siguiente se diferencian en su matiz.



*fig. 277 Diferencia de matices*

Estos matices son claramente diferentes, pero también lo son: verde amarillento y verde azulado que corresponden a dos matices de verde.

<sup>124</sup> nm= nanómetro

1 nm =1x10<sup>-9</sup>m que es una millonésima de milímetro

El círculo cromático de la figura 278 nos proporciona un ejemplo donde cada zona numerada, que es una mezcla con el primario contiguo, corresponde a un matiz.

Como se puede apreciar existen muchos matices diferentes de verde, lo mismo que violeta o cualquier otro color.

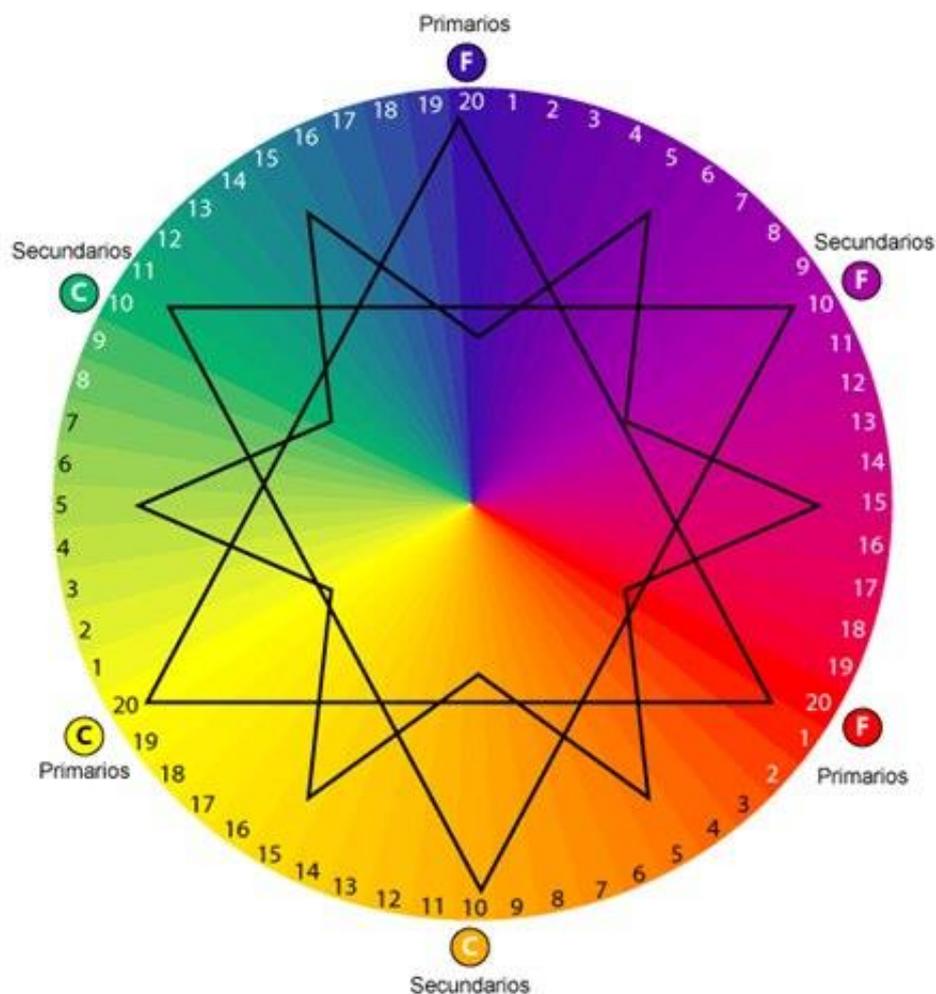


fig. 278 Círculo cromático

Cuando el lector mira el círculo cromático de la figura o las alas de una mariposa, los encargados de percibir los distintos matices son los conos de sus ojos, células fotosensibles, con el extremo en forma de cono, que se encuentran en la retina.

Como dijimos anteriormente los conos se encuentran en mayor proporción en el centro que en la periferia de la retina, por esta razón apreciamos mejor un color cuando miramos de frente, porque de esta manera la luz llega a la fovea. Cuando la luz incide en la periferia de la retina es más difícil distinguir el color porque allí el porcentaje de conos es pequeño y aumentan los bastones que son mucho más sensibles, pero no distinguen color.

El ser humano tiene tres tipos de conos: L, M y S<sup>125</sup> según sean sensibles a longitudes de onda larga, media o corta respectivamente, cada uno de ellos detecta fundamentalmente determinada longitud de onda, aunque los conos sensibles al rojo también pueden captar longitudes de onda que corresponden al verde como se puede ver en la fig. 279 donde se muestra la sensibilidad relativa de los conos para diferentes longitudes de onda.

La curva azul corresponde a la sensibilidad de los conos que captan luz azul (S), la verde a los que son sensibles a la luz verde (M) y la roja a los L. Se puede observar que las curvas se superponen en algunas zonas, indicando que existen ciertas longitudes de onda que son captadas por más de un tipo de cono. La relación entre lo percibido por cada tipo de cono nos da la sensación de diferentes matices, por ejemplo:

Cuando incide luz de  $\lambda=600\text{nm}$  son activados los conos L y M a la vez en determinada proporción y percibimos anaranjado.

Tenemos sensación de algunos colores que en realidad no están asociados a una longitud de onda sino que es una combinación de ellas como es el caso del magenta, no existe una longitud de onda que corresponda al magenta, tenemos esa sensación cuando son activados los conos L y S a la vez.

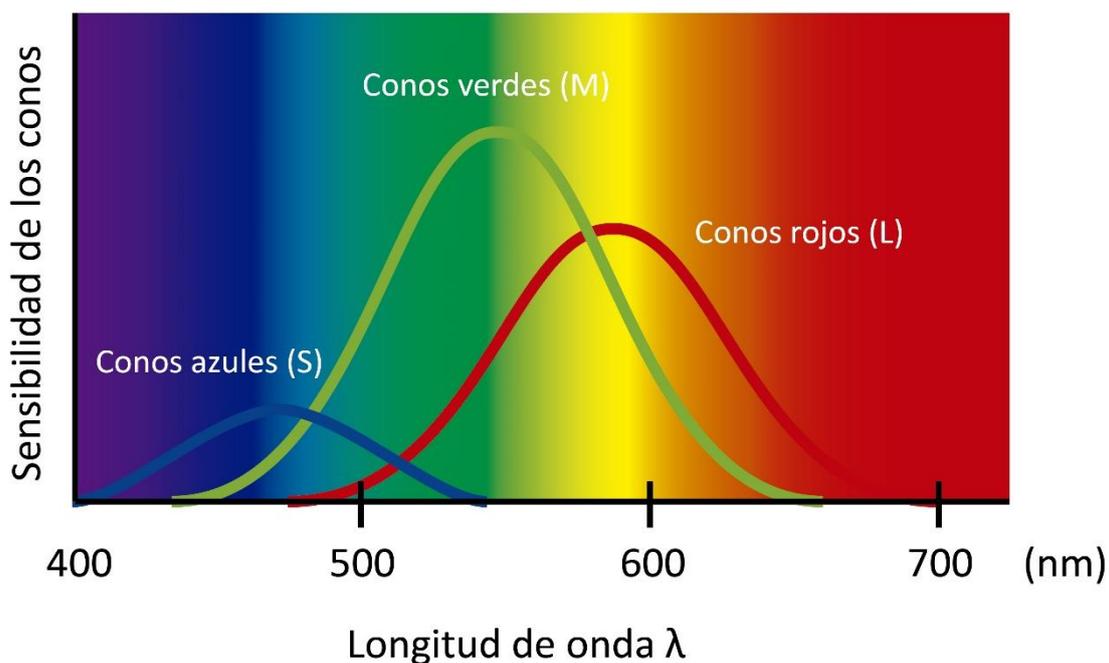


fig. 279 Sensibilidad relativa de conos sensibles al rojo, verde y azul

Podemos clasificar los matices en cálidos y fríos, los cálidos son los que asociamos con el sol y el fuego, corresponden al amarillo, naranja y rojo, en el espectro se encuentran

<sup>125</sup> Se llaman L, M, o S por la misma razón que los talles de ropa en inglés (largo, medio o pequeño respectivamente), sólo que en este caso largo, medio o pequeño son las longitudes de onda percibidas por cada cono.

juntos (a la derecha en el esquema anterior). Los matices fríos son verdes, azules y violetas que asociamos con el agua y están a la izquierda en la fig. 279.

### INTENSIDAD O SATURACIÓN

La propiedad que conocemos como saturación se refiere al grado de pureza del color, un color saturado no contiene en su composición ningún tipo de acromáticos, los acromáticos son el blanco, negro y sus mezclas.

Generalmente asociamos un color saturado con un color “vivo” o “fuerte”, los colores del espectro son un ejemplo de colores saturados.

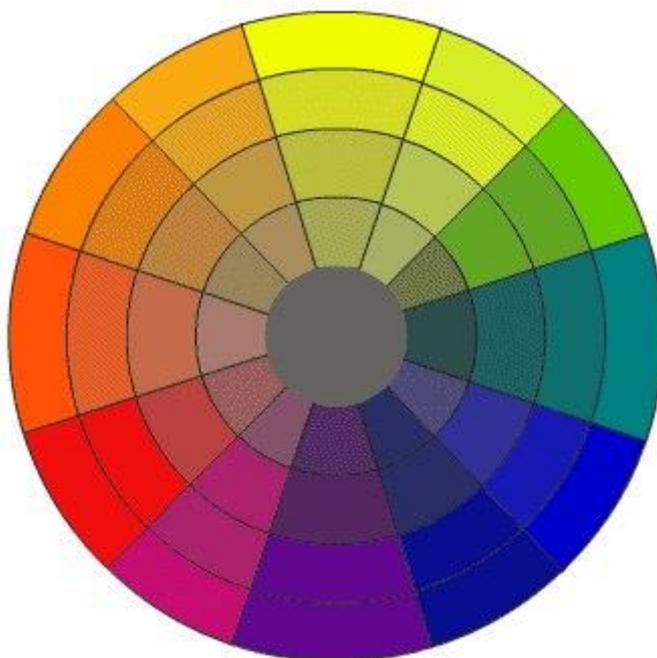


fig. 280 Mezcla de colores saturados con gris

A medida que mezclamos un color saturado con blanco, negro o gris va perdiendo saturación, también podemos disminuir la saturación de un matiz mezclándolo con su complementario o colores que mezclados den como resultado su complementario, un ejemplo se muestra en la figura 280 donde los colores de la periferia son saturados y van disminuyendo su saturación a medida que se mezclan con gris hasta llegar a gris neutro en el centro del círculo.



fig. 281 Variación de saturación

En el centro de la cinta de colores de la figura 281 se muestra el rojo saturado, agregando cada vez más blanco hacia la izquierda dan como resultado colores cada vez menos saturados, lo mismo se hizo hacia la derecha pero esta vez agregando negro, también se obtuvieron colores cada vez menos saturados.

Los colores con mínima saturación son gris neutro, blanco y negro, los saturados son utilizados por algunos pintores como Van Gogh (fig. 282 y 283), también por movimientos pictóricos como el fauvismo (fig. 284)



fig. 282 EL ESCOLAR Vicente Van Gogh



fig. 283 DOS GIRASOLES Vicente Van Gogh

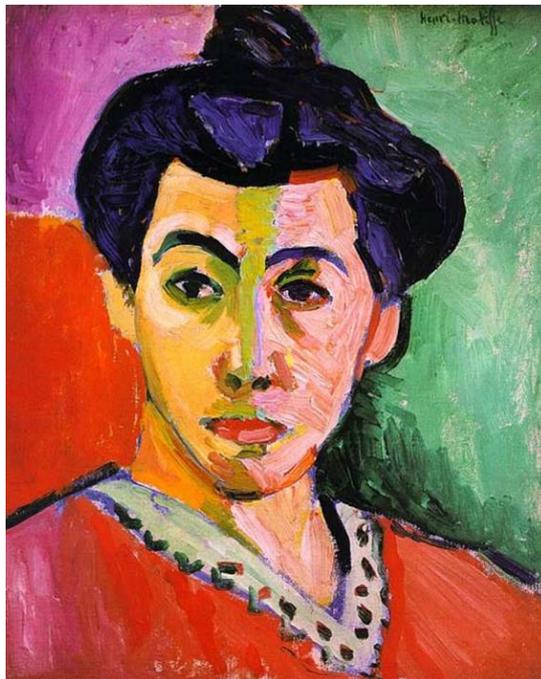


fig. 284 Madame Matisse (fauvismo)  
HENRI MATISSE

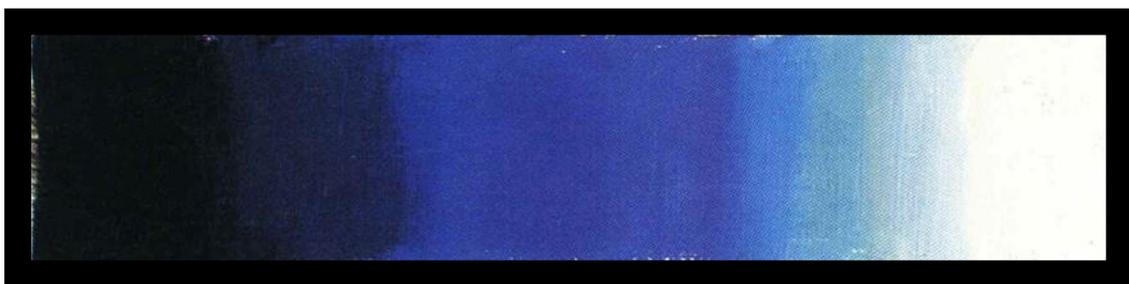
## VALOR

El valor está relacionado con el grado de claridad u oscuridad de un color, los colores claros tienen un valor alto y los oscuros bajo, podemos cambiar el valor de un color mezclándolo con blanco o negro.



*fig. 285 variación de valor*

Vemos un ejemplo de variación de valor en la cinta acromática representada en la figura 285 donde los valores que suben de izquierda a derecha, pero también podemos construir una gradación de valor en una cinta coloreada como en el caso de la figura 286 donde los valores también suben de izquierda a derecha.



*fig. 286 Valores crecientes*

Partiendo de un color, al mezclarlo con blanco subimos el valor y al mezclarlo con negro lo bajamos, la cinta roja que vimos en la figura 281 al tratar el tema saturación va bajando su valor de izquierda a derecha, lo que nos indica que a partir del mismo pigmento puedo obtener múltiples valores dependiendo de la proporción de la mezcla con blanco o negro.

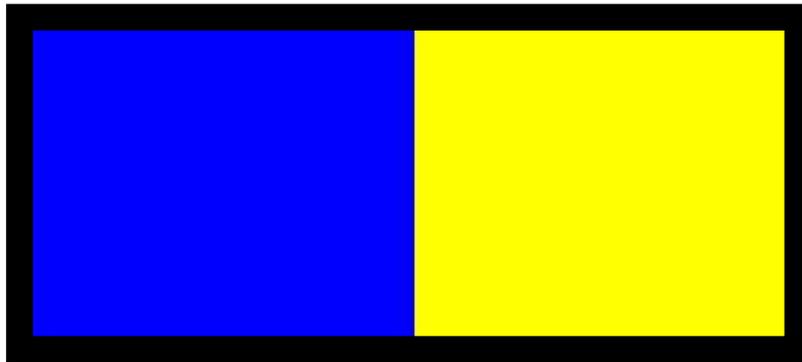
En el caso anterior con un solo pomo de pintura más blanco y negro pude obtener muchos valores, pero ¿se pueden obtener matices del mismo valor partiendo de pomos de pintura rojo, verde, azul etc.?

La respuesta es sí, podemos llegar al mismo valor a partir de diferentes matices como en el ejemplo de la figura 287 donde todos los colores tienen diferente matiz pero aproximadamente el mismo valor.



*fig. 287 Diferencia de matiz, igual valor.*

Los colores luminosos como el amarillo o naranja tienen valor más alto que el azul o el violeta aunque todos sean saturados (fig.288), al azul deberemos agregarle blanco para que llegue al valor del amarillo saturado.



*fig. 288 Azul y amarillo saturados*

Cuando se pinta en blanco y negro o se dibuja sombreando un modelo que en la realidad es de color, lo que estamos haciendo es dar valor a las diferentes zonas, un método muy utilizado es entrecerrar los ojos para diferenciar los valores. Analicemos por qué al entrecerrar los ojos no percibimos el matiz y diferenciamos mejor los valores.

Al entornar los ojos disminuye la cantidad de luz que penetra en el ojo y los conos no cuentan con luz suficiente para activarse, las células que perciben la claridad, llamadas bastones, son mucho más sensibles que los conos.

Con poca luz actúan solamente los bastones que distinguen luminosidad pero no color, los conos necesitan mucha luz para ser activados mientras que los bastones son capaces de detectar unos pocos fotones<sup>126</sup>, por eso, en una habitación oscura no distinguimos el

<sup>126</sup> En ciertas circunstancias hay personas que pueden detectar un solo fotón que llegue a su retina.

color de los objetos que nos rodean aunque podamos verlos. Es la misma razón por la que vemos las estrellas blancas aunque ellas emiten radiación de frecuencias que corresponden a colores del espectro visible, al estar tan lejos nos llega de las estrellas muy poca luz<sup>127</sup>, tan poca que los conos son incapaces de detectarla, sin embargo los bastones sí detectan esta pequeñísima cantidad de luz; pero no distinguen el color.

Esta capacidad de los bastones de detectar luz cuando ésta es mínima se refleja en el dicho popular *“De noche todos los gatos son pardos”* porque en la oscuridad es imposible activar los conos que perciben el color.

Los bastones se encuentran mayoritariamente en la periferia de la retina y los conos en el centro, por eso no distinguimos el color de los objetos cuando la luz proveniente de ellos llega a la periferia de la retina, para distinguir bien el color de un objeto debemos enfocarlos mirándolos de frente. No distinguimos el color de los objetos cuando los vemos con la visión periférica (con el “rabillo del ojo”) porque en ese caso la luz no llega a la fovea.



fig. 289 LA COSECHA EN LA CRAU, CON MONTMAÏOUR EN SEGUNDO PLANO  
Vincent Van Gogh

---

"La gente puede responder a un único fotón", explica Brian Wandell, profesor de ingeniería eléctrica y psicología de la Universidad de Stanford, en EE.UU.

<sup>127</sup> Recuerde que según la ley de la inversa del cuadrado de la distancia; la Intensidad (I) es inversamente proporcional a  $d^2$  como vimos cuando tratamos el tema [Cámara oscura](#)



*fig. 290 PAJARES EN GIVERNY 1*  
*Claude Monet*

Cuando en un cuadro se usaron valores altos o muy saturados decimos que el pintor utilizó paleta alta, y cuando el valor es bajo decimos que la paleta es baja, veamos algunos ejemplos:

Las figuras 284, 289 y 290 muestran obras donde la paleta es alta y las 291 y 292 fueron pintadas en paleta baja, como se observa, un mismo pintor como van Gogh, pintó obras con valores altos y bajos dependiendo de lo que quería transmitir.



*fig. 291 DE COMPRA CON RED Y EL BUEY BLANCO*  
*Vincent van Gogh*



*fig. 292 LA ROMERÍA DE SAN ISIDRO 1820-1823*  
*Francisco de Goya*

## MEZCLAS DE COLOR

¿Qué color obtenemos al mezclar verde con rojo? ¿Existe una sola respuesta para esta pregunta?

No, no existe una sola respuesta, independientemente de la proporción, si mezclamos verde y rojo de pigmentos llegamos a un color bien diferente a cuando mezclamos verde y rojo de luz.

Al mezclar rojo y verde de pigmento obtenemos un color más oscuro que cada uno de los pigmentos originales, pasa lo contrario cuando mezclamos rojo y verde de luz, en este caso obtenemos amarillo, más claro que cada uno de los colores que mezclamos, este comportamiento tan diferente se debe a que los pigmentos absorben parte de la radiación y solo emiten una porción de la que reciben, quitan o sustraen radiación, por lo que la mezcla de pigmentos se llama sustractiva.

En cambio al mezclar colores de luz, vamos agregando, adicionando luz, cada vez obtenemos colores más claros y la mezcla se llama aditiva.

## MEZCLA SUSTRACTIVA

Cuando hablamos de mezcla sustractiva nos referimos a mezclar pigmentos, si mezclamos colores para pintar un cuadro al óleo, acuarela, acrílico o una pared, estamos

realizando una mezcla sustractiva, por ejemplo si mezclamos amarillo y azul obtenemos verde. ¿Por qué?

Porque cada pigmento absorbe radiación de determinadas frecuencias y la mezcla es percibida con el color que reflejan en común.

El siguiente cuadro indica los colores que absorbe y refleja cada pigmento de la mezcla amarillo- azul.

Pigmento	Absorbe	refleja
Amarillo	violeta y azul	rojo, amarillo y verde
Azul	amarillo, rojo y naranja	violeta, verde y azul

En la tercera columna que indica los colores reflejados por cada pigmento solo coincide el verde, los demás colores son absorbidos por uno u otro pigmento, por eso vemos la mezcla verde que es la radiación que llega al ojo como lo esquematizamos en la figura 293.

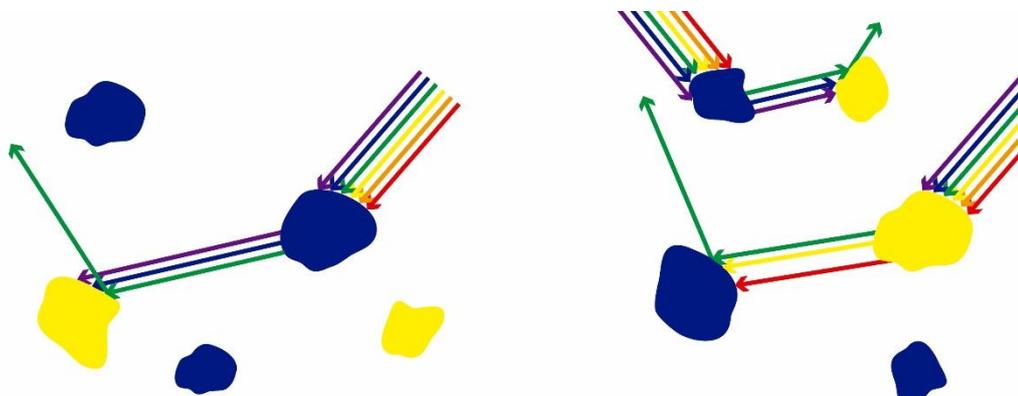


fig. 293 Mezcla de pigmentos Amarillo y azul.

Vemos verde porque es el color que no absorbe ninguno de los pigmentos que componen la mezcla, en realidad vemos del color con el que no resuenan los átomos de ninguno de los pigmentos componentes.

Pero no todos los colores se pueden obtener como en el caso anterior por mezcla de pigmentos, los que no podemos obtener a partir de otros se llaman primarios y en el caso de la mezcla sustractiva son el cian, magenta y amarillo.

Cuando mezclamos estos primarios obtenemos los secundarios rojo, verde y azul como se muestra en la figura 294 donde las zonas superpuestas de los círculos corresponden al color de la mezcla. Según las proporciones mezcladas se logra toda la gama de colores

que vemos en impresiones a color. En el material impreso también se usa negro, entre otras razones por motivos de costo.

La figura 294 muestra círculos pintados con los colores primarios de pigmento y las zonas donde se solapan están pintadas con el color de la mezcla:

Amarillo + Cian = Verde

Cian + Magenta = Azul

Magenta + Amarillo = Rojo

Cian + magenta + amarillo = Negro

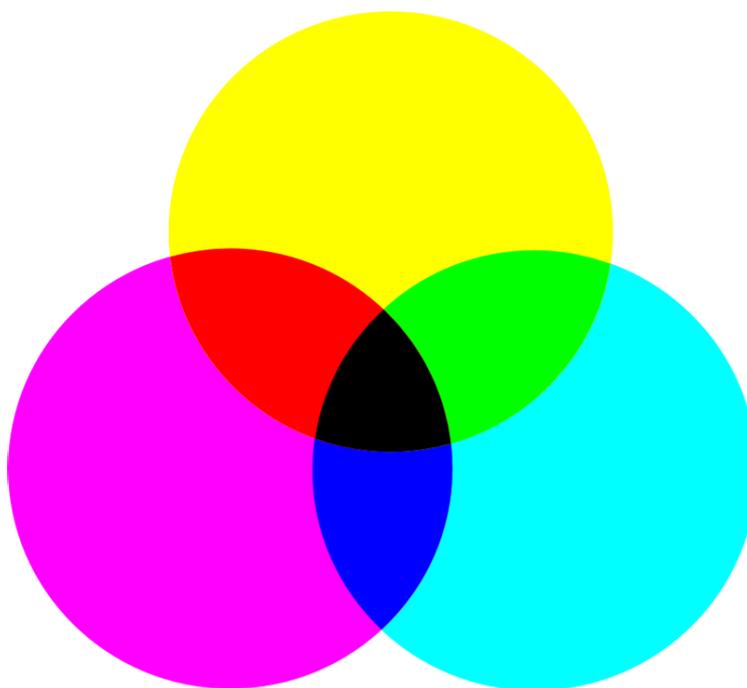


fig. 294 Mezcla de pigmentos

Si mezclamos los tres colores primarios de pigmento en las cantidades correctas obtenemos negro porque el pigmento cian absorbe rojo, el magenta absorbe verde y el amarillo absorbe azul (observe que estas parejas de colores están diametralmente opuestos en la fig. 294). Cada pigmento absorbe determinadas radiaciones del espectro visible y la mezcla de todos absorbe los tres (rojo, verde y azul). La ausencia de luz es percibida como negro.

El esquema de la figura 295 representa la visión de los colores desde el punto de vista de la teoría tricromática de Young-Helmholtz donde a los efectos de la visión, la luz blanca activa los tres tipos de conos (ROJO, VERDE y AZUL), por ello simplificamos la luz blanca como si estuviera compuesta por estos tres colores.

En el esquema llega luz blanca a pastillas de acuarela de diferentes colores. Cuando la luz llega al blanco, éste no absorbe ningún color y devuelve los tres colores, de tal modo que un observador lo percibe como blanco.

Cuando la luz blanca llega al negro, éste absorbe todas las radiaciones de tal modo que no llega ninguna de regreso al observador que la percibe como negra.

Cuando la luz blanca llega al amarillo, éste absorbe la radiación que percibimos como azul y devuelve al medio la roja y verde, el observador percibe la pastilla amarilla.

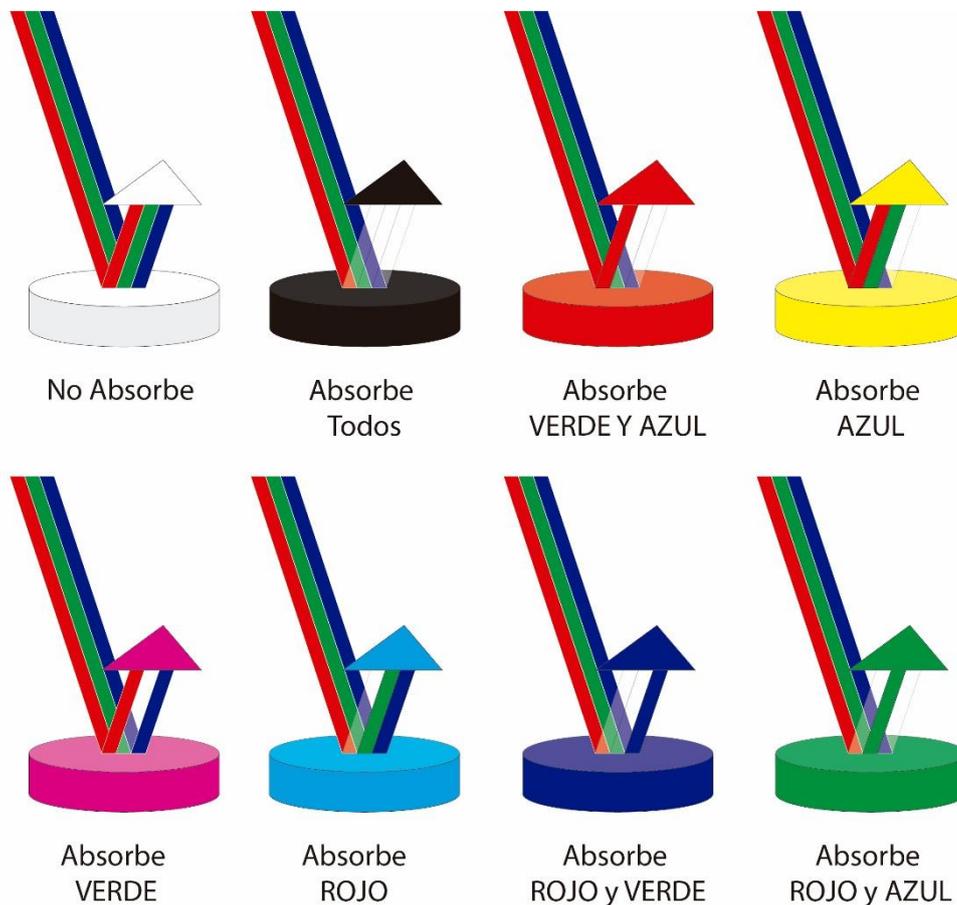
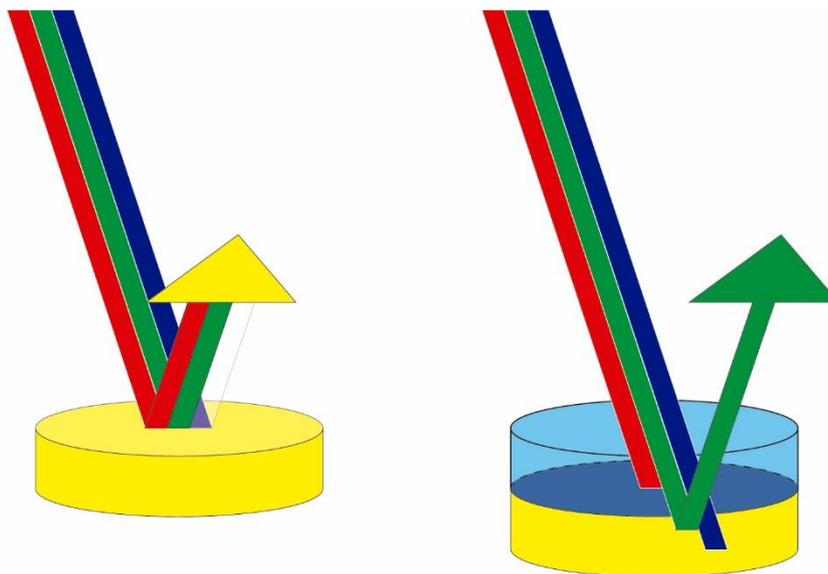


fig. 295 Percepción de los colores según teoría tricromática

En el esquema de la figura 296 podemos observar desde el punto de vista de la misma teoría porqué si cubrimos un fondo amarillo con una veladura cian vemos la zona verde: el pigmento del fondo amarillo absorbe luz azul y refleja rojo y verde, el cian absorbe luz roja dejando pasar verde y azul, por lo tanto cuando la superficie del cuadro es

iluminada con luz blanca (rojo, verde, azul), el rojo es absorbido por la veladura cian y pasan verde y azul. Al llegar al fondo amarillo el azul es absorbido y solo se refleja el verde que atraviesa nuevamente la veladura emergiendo al exterior.



*fig. 296 Teoría tricromática.  
Veladura cian sobre fondo amarillo*

Así como la ausencia de luz es percibida como negro, cuando llegan al ojo todos los colores del arcoíris juntos, o en la teoría tricromática rojo, verde y azul, percibimos el color blanco. Por lo tanto los materiales blancos no absorben ningún color.

### *El color Blanco*

Si los materiales y pigmentos blancos no absorben ningún color es porque sus átomos no resuenan con las radiaciones del espectro visible como ya vimos en el apartado [“Creación de ambiente cálido, Francisco de Goya”](#). Los átomos de las sustancias transparentes tampoco resuenan con las frecuencias del espectro visible, este comportamiento idéntico del blanco y transparente a nivel micro ¿por qué tiene como resultado percepciones diferentes a nivel macro?

Para explicarlo comparemos las percepciones de color que tenemos de algunas sustancias, trataré de guiar al lector con algunas preguntas.

¿De qué color es el agua que sale del grifo?

¿De qué color son las nubes al mediodía? ¿Y la nieve?

¿El agua del grifo, lo que constituye las nubes y la nieve son la misma sustancia?

¿De qué color es la copa de cristal de la figura 297?

¿De qué color percibimos el cristal molido (fig. 298)?



fig. 297 Copa de cristal



fig. 298 Cristal molido [FUENTE](#)

Si sus respuestas fueron que el agua del grifo es transparente y en las nubes, al igual que en la nieve, la percibimos como blanca, lo mismo que pasa en el cristal, el lector ya se habrá dado cuenta de que en realidad lo blanco es transparente que podemos percibir como blanco dependiendo del tamaño de las partículas que lo componen. Lo mismo pasa con el azúcar y la sal, cada pequeño cristal es transparente, pero en el conjunto lo vemos blanco. Las pompas de jabón son transparentes pero la espuma de la esponja cuando nos duchamos, que está formada por muchísimas y pequeñas pompas, es blanca.

Trataremos de explicar el porqué de esta metamorfosis en la percepción de la misma sustancia a diferentes escalas.

Todas las cosas blancas que nombramos tienen algo en común: están formados por pequeñas partes de sustancia transparente, trozos que a nivel macro son pequeños pero sus tamaños superan ampliamente la longitud de onda de la luz. Cada trozo es muy grande para que se produzca la dispersión de Rayleigh (que vimos en el apartado [Creación de ambientes diurnos, Pierre Auguste Renoir](#)) y la luz se refleja y refracta en cada una de sus superficies hasta que regresa al medio del cual provino sin absorber prácticamente ninguna radiación<sup>128</sup> (fig. 299), por eso cuando tenemos fibras, cristales o cualquier partícula transparente inmersa en un medio de diferente índice de refracción lo vemos como blanco, y si su espesor es suficiente será opaco, porque la mayoría de la luz incidente no atraviesa el medio. Pero en cuerpos delgados hay parte de la luz que sí lo atraviesa y percibimos la sustancia como traslúcida, es el caso del papel muy fino que transparenta lo que hay detrás.

---

<sup>128</sup> Ninguna sustancia, refleja el 100% de la luz que le llega, aún los materiales que percibimos como muy blancos absorben una ínfima parte de la radiación incidente que es prácticamente despreciable. Una superficie que vemos como muy blanca refleja el 98% de la luz incidente.

En la figura 299 se representan solo dos rayos incidentes, dibujados con línea más gruesa, que se van dividiendo en cada una de las reflexiones y refracciones hasta emerger en múltiples direcciones.

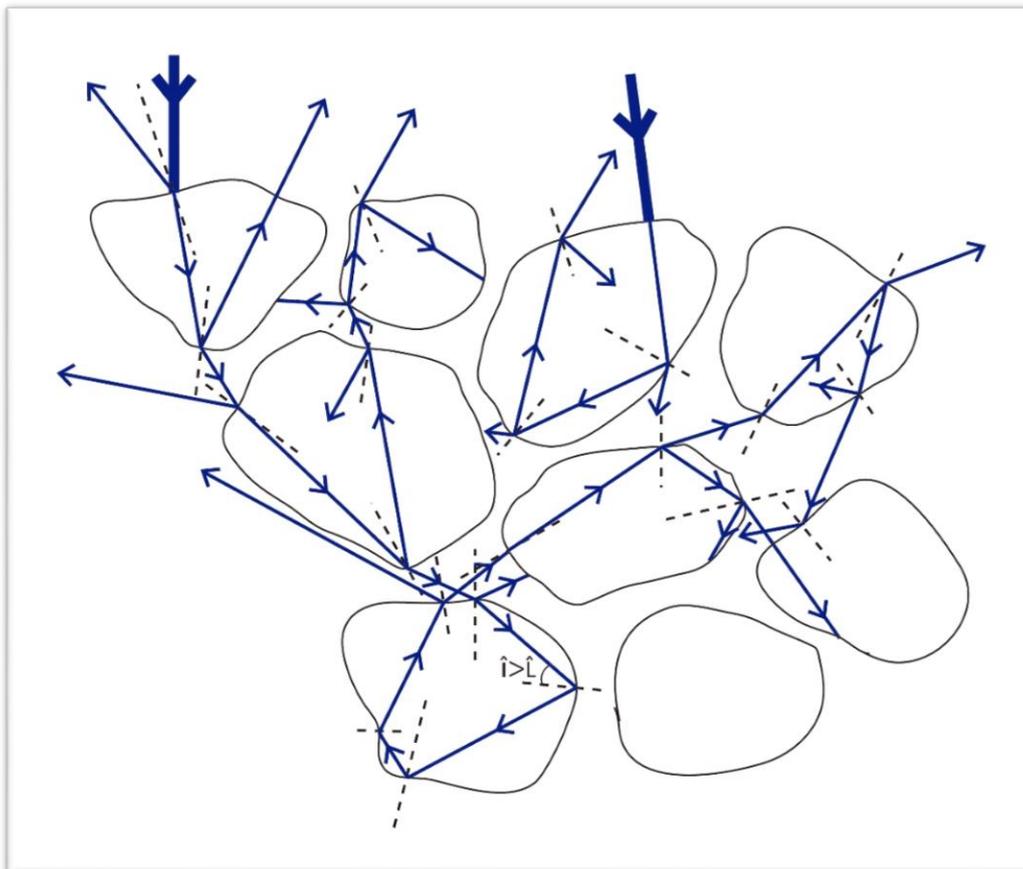


fig. 299 Sustancia blanca formada por partículas transparentes

Como ya vimos cuando trabajamos *“Creación de ambientes diurnos, Pierre Auguste Renoir”*<sup>129</sup>, la opacidad de una pintura depende de la diferencia entre los índices de refracción de los componentes de la mezcla, cuanto más diferencia exista entre sus índices de refracción más opaca será la pintura. Esto no sucede solamente en las pinturas, el lector sabrá por experiencia que si viste ropa blanca, fina y comienza a llover, cuando se moja la ropa transparente, es bastante incómodo cuando pasa con una malla de baño en una playa muy concurrida, conozco a quien le sucedió y no se sintió muy bien.

El mismo efecto se produce cuando se mancha un papel con aceite, el aceite llena el espacio que ocupaba el aire entre las fibras de papel y éste aumenta su transparencia,

<sup>129</sup> Presionar Ctrl + clic sobre letra celeste para seguir vínculo

esto se sabe hace más de 600 años, Cennino Cennini enseñaba en el Capítulo XXIV de EL LIBRO DEL ARTE<sup>130</sup> a lograr la transparencia en un pergamino de piel de cabrito con estas palabras:

*“PRIMER MODO A APRENDER A HACER EN UNA HOJA TRANSPARENTE CLARA*

*Este pergamino transparente, si no el encuentras hecho, debes hacerlo de este modo. Toma un pergamino de cabrito, dando a un pergamintero y hazlo raspar hasta que tenga poco cuerpo, y en forma al que se mantenga pareja la raspadura. Será transparente de por sí. Si lo quieres más transparente, tomar aceite de linaza bien claro y unta el pergamintero con ese aceite, empleando un algodón. Deja secar por espacio de varios días y estará perfectamente bien.”*

*Cennino Cennini*

Las fibras de la piel del cabrito se encuentran inmersas en aire y conservan algo de la grasa del animal, lo que las hace semitransparentes, pero cuando son embebidas en aceite, que tiene el índice de refracción parecido al de las fibras, aumenta la transparencia al igual que el papel cuando lo embebemos en aceite.

¿Por qué a medida que igualamos los índices de refracción de las sustancias de la mezcla ésta se vuelve transparente?

Para responderlo analicemos lo que sucede con la luz cuando llega a la superficie de un papel u otras partículas transparentes en diferentes circunstancias.

- a)** Cuando el papel está inmerso en un medio con índice de refracción muy diferente al de sus fibras, por ejemplo en aire.
- b)** Cuando el papel está inmerso en un medio con índice de refracción próximo al de sus fibras.
- c)** Cuando coinciden los índices de refracción de las partículas transparentes y del medio en el que están inmersas.

---

<sup>130</sup> By Cennino Cennini [El libro del arte Cennino Cennini pag 38 y 39](#)

<https://books.google.com.uy/books?id=F98G6St99roC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

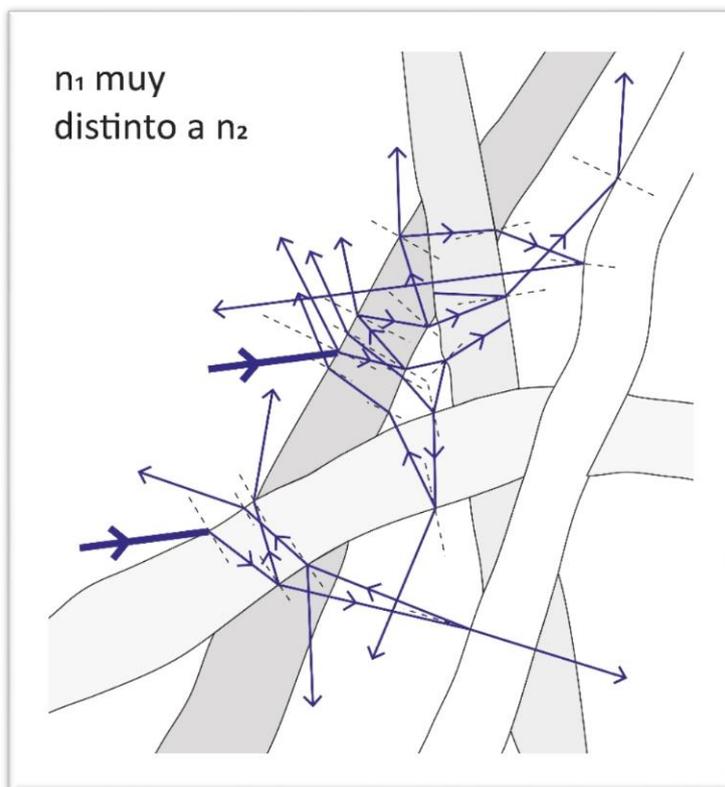


fig. 300 Mezcla opaca. Fibras transparentes  $n_1$  muy distinto a  $n_2$

- a) Cuando el papel está inmerso en un medio con índice de refracción muy diferente al de sus fibras.

Cuando el papel se encuentra en el aire, sus fibras transparentes de celulosa están rodeadas por aire. El índice de refracción de la fibra de celulosa es aproximadamente 1,5 mientras que el del aire es 1,0, difieren en 0,5. Esta diferencia hace que la luz cambie considerablemente de dirección al pasar del aire a cada fibra y viceversa, en cada superficie de separación la luz se refleja, se refracta y al final, después de las múltiples reflexiones y refracciones regresa al medio del cual provino, no atraviesa el papel, por eso lo vemos como opaco y difunde todas las longitudes de onda de la luz incidente por lo que lo percibimos como blanco fig. 300. En este esquema representamos con línea más gruesa solo dos rayos que inciden en el papel y luego emergen en todas direcciones.

Los dos rayos incidentes se dividen en múltiples rayos que terminan por regresar al medio del cual provienen, es de destacar que cuanto mayor es la diferencia entre los índices de refracción de la fibra y el medio, menor es el ángulo límite, por lo que las fibras transparentes también se comportan como fibras ópticas.

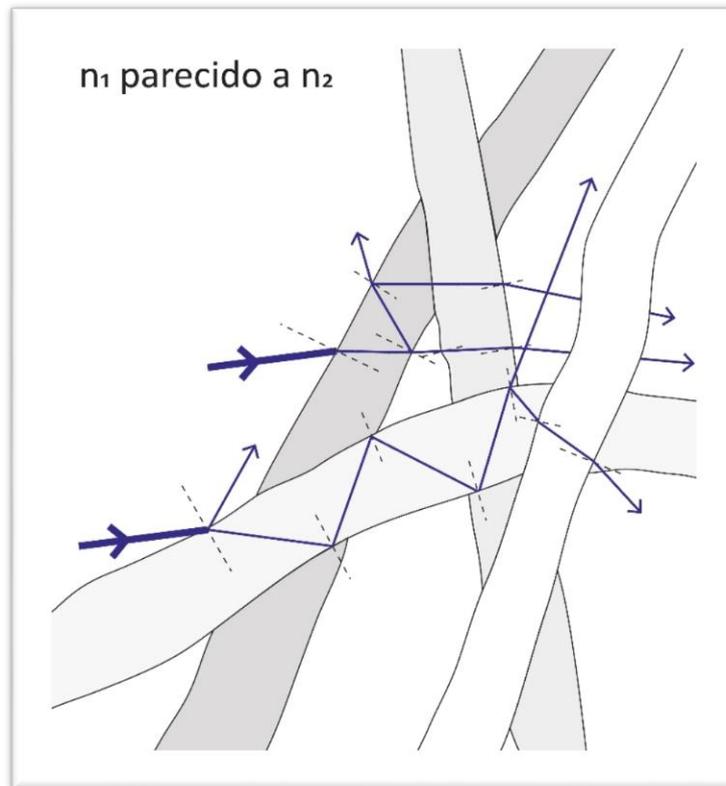


fig. 301 Fibras transparentes  $n_1$  próximo a  $n_2$

- b)** Cuando el papel está inmerso en un medio con índice de refracción próximo al de sus fibras.

A medida que el índice de refracción de la sustancia en la que están inmersas las fibras de celulosa se aproximan a 1,5 la luz se desvía cada vez menos al pasar del medio a las fibras y de las fibras al medio, pasa más luz a través del papel transformándose en traslúcido (fig. 301). Por eso el papel parafinado o papel manteca que se utiliza habitualmente en la cocina es más transparente que el papel común del mismo espesor y se puede utilizar para calcar. La fig. 302 muestra como podemos ver a través de papel, el salero escondido detrás de un trozo de papel manteca.



*fig. 302 Transparencia del papel manteca*

El índice de refracción de las fibras de celulosa es aproximadamente 1,5 y el del agua 1,3, la diferencia es 0,2. Esta diferencia es mucho menor que la del caso anterior (caso a) por lo que podemos predecir que si mojamos un papel fino, éste debería aumentar su transparencia.

Probemos si esta predicción es cierta a través de un breve experimento en el que comparemos la transparencia de un papel fino y seco con el mismo papel mojado. El siguiente video muestra lo que pasa al mojar con un pulverizador una servilleta de papel que fue colocada sobre la página de una revista.

Cuando la servilleta está seca no vemos lo que está detrás, pero cuando se moja podemos ver completa la imagen de las márgenes del río Elba.



Video 24 cambio en el índice de refracción del medio.<sup>131</sup>

c) Cuando coinciden los índices de refracción de las partículas con el del medio

En el caso de mezclar fibras o partículas transparentes, que en el aire se perciben como blancas, con un medio cuyo índice de refracción coincide con el de dichas partículas, la luz no se desvía al atravesar la mezcla (fig. 303) y el resultado será una mezcla transparente como consideramos en el apartado “[Relación del índice de refracción con la opacidad de la pintura](#)”:

Un ejemplo de esto es cuando mezclamos creta con resina:

Índice de refracción de la creta 1,5

Índice de refracción de la resina 1,5

La diferencia entre los índices de refracción es cero y la pintura será totalmente transparente.

---

<sup>131</sup> El lector puede ver este video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=vBQyoqUHF64>

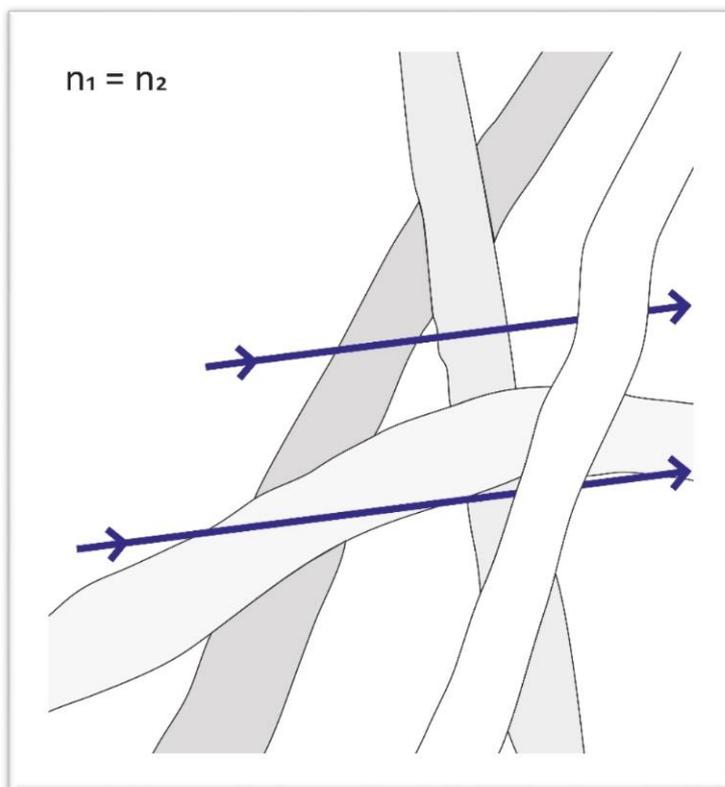


fig. 303 Mezcla transparente,  $n_1 = n_2$

En el siguiente video podemos observar el mismo efecto que se produce en la pintura transparente. Mezclamos agua con perlas de poliacrilato de sodio o hidrogel molidas, los índices de refracción del poliacrilato y agua coinciden y la mezcla resulta transparente (Video 25 y 26)



Video 25 Transformación de blanco en transparente<sup>132</sup>



Video 26 Bolotas invisibles-Índice de refracción [FUENTE](#)<sup>133</sup>

---

<sup>132</sup> El lector puede ver este video en:

[https://www.youtube.com/watch?v=zm2v9iJPP\\_0](https://www.youtube.com/watch?v=zm2v9iJPP_0)

<sup>133</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=x49UpRRMYqk>

¿Podremos generalizar que todo lo blanco es transparente?

Sí, el cabello cano, las telas blancas lo mismo que la nieve o los pelos de la piel del oso polar son fibras o partículas transparentes inmersos en un medio que tiene muy diferente índice de refracción.

A propósito de la piel del oso polar es un buen ejemplo de aplicación por parte de la naturaleza de lo que hemos visto de reflexión total interna, de color blanco y negro.

La piel del oso polar es negra<sup>134</sup> porque vive en lugares muy fríos, el color negro absorbe la radiación de todas las frecuencias y esta energía al final se transforma en energía cinética de las moléculas que a nivel macro se traduce en un aumento de temperatura. Gran parte de la radiación de todas las frecuencias, es conducida directamente hacia la piel por el pelo que es transparente y está inmerso en aire.

Pelo y aire tienen índices de refracción muy distintos, el ángulo límite entre la sustancia que forma el pelo y el aire es pequeño y cada pelo actúa como si fuera una fibra óptica.

Los pelos transparentes, con alto índice de refracción en relación al aire son huecos y además están rodeados por aire, por eso percibimos la piel del oso blanca (Fig. 304 y 305).



*fig. 304 Piel de oso polar*

---

<sup>134</sup> Si abrimos el pelo del oso polar veremos que la piel es negra, las partes donde el pelo es más corto, como próximo al hocico, dejan ver la piel negra.



fig. 305 Ampliación de un pelo de oso polar [FUENTE](#)

La piel del oso sustrae todas las radiaciones del espectro visible y la vemos negra, el pelo que cubre la piel no sustrae ninguna de las radiaciones y la percibimos blanca.

Al igual que la naturaleza, los pintores aplican continuamente los conocimientos de mezcla sustractiva de colores, cuando mezclan colores en su paleta o utilizan la técnica de veladuras y sustraen parte de la luz del mismo modo que si utilizaran filtros de colores.

## MEZCLA ADITIVA

Cuando mezclamos luz, cada vez que agregamos un color vamos aumentando la cantidad de radiación y obtenemos colores cada vez más claros.

Los colores primarios de luz, con los que se podemos obtener todos los colores que aparecen en la pantalla del televisor o los monitores son: rojo, verde y azul, se representan con (R, G, B) proveniente de rojo y verde y azul en inglés.

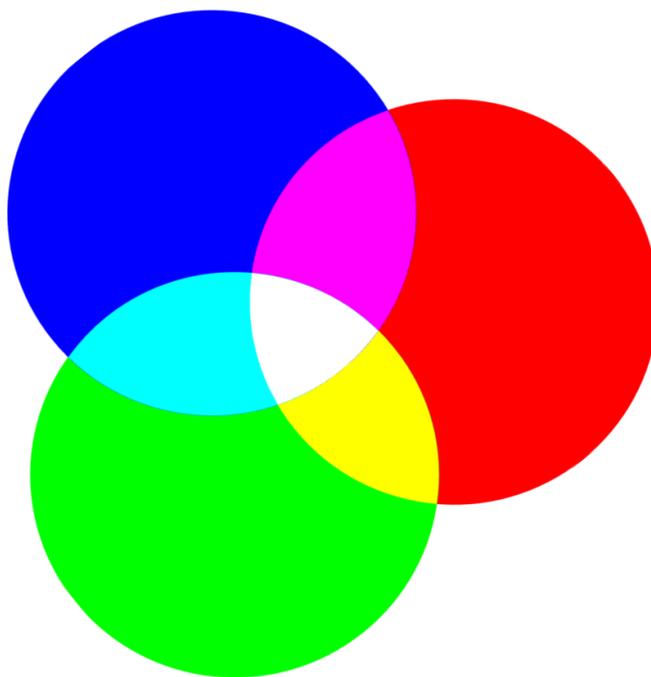
Cuando mezclamos:

Rojo + verde = amarillo

Verde + azul = cian

Azul + rojo = magenta

Rojo + verde + azul = Blanco



*fig. 306 Mezcla de luz (ADITIVA)*

En el esquema de la figura 306, los lugares donde los círculos de colores primarios de luz se superponen, están pintados con el color de su mezcla. El lector ya se habrá dado cuenta de que al mezclar los colores primarios de luz obtenemos los colores secundarios de luz (cian, magenta y amarillo) que son los primarios de pigmento y viceversa.

Cuando el lector asiste a un espectáculo donde utilizan focos de colores y los superponen en ciertas zonas, el lector está frente a la mezcla aditiva de colores con la que logran obtener muchos colores más que los que corresponden a las lámparas o filtros utilizados. Con focos rojo, azul y verde los iluminadores consiguen luz cian, magenta, amarilla, y una infinidad de matices que dependen entre otros factores, de las proporciones de cada una.



*fig. 307 Mezcla aditiva de color*

En la actualidad existen artistas que han sustituido pinceles por lámparas y pigmento por luz, en el año 2001 se inauguró en Alemania el Centro de Arte Internacional Luz Unna<sup>135</sup>, que es el primer museo en el mundo dedicado exclusivamente al arte de la Luz, pintar con luz es una técnica corriente desde hace mucho tiempo en arquitectura, espectáculos musicales, ballet y teatro, donde además se logran efectos con sombras de colores (fig. 309). Luego explicaremos con un experimento grabado en video cómo obtener estas sombras de colores.

En las figuras 307 y 308 vemos las fotografías de dos espectáculos donde los iluminadores logran “pintar con luz”. En la foto de la figura 307 se logra amarillo, magenta y rojo, pero esto no quiere decir que el iluminador utilizó lámparas o filtros amarillos o magenta, puede lograr esos colores a través de la mezcla aditiva de los colores primarios de luz: si en una zona iluminada con rojo enciendo un foco verde, la zona donde se mezcla la luz roja con verde se percibe como amarilla. La zona magenta se puede lograr iluminando con rojo y azul a la vez.

En el ejemplo de la fig. 307 el humo actúa como pantalla que dispersa la luz, sin él la luz llegaría al piso y no se vería la trayectoria los rayos.



*fig. 308 Ballet, pintando con luz*

En la figura 308 el iluminador logra pintar los vestidos blancos de las bailarinas y el humo con cian y magenta. No es necesario que el iluminador tenga luces o filtros de estos colores para lograrlo, si cuenta con los colores primarios de luz (rojo, verde y azul) puede lograr infinidad de colores a través de sus mezclas. A la zona que vemos cian llega luz azul y verde, mientras que a la que se ve magenta llega luz azul y roja.

---

<sup>135</sup> [Página del museo](http://www.lichtkunst-unna.de/en/start-page.html) Centro de Arte Internacional Luz Unna

<http://www.lichtkunst-unna.de/en/start-page.html>

Cuando mezclamos luz a través de focos de colores e interponemos ante el haz de luz un objeto opaco se produce un fenómeno muy vistoso que son las sombras de colores, estas sombras no tienen el color de los focos con que se obtienen, por ejemplo: las sombras magenta, amarilla y cian que vemos proyectadas en la pantalla del video 27 no corresponden a lámparas de esos colores lo mismo que las sombras de la fig. 309.



*fig. 309 Sombras de colores*

Analicemos las sombras de colores a través del esquema de la figura 310 que representa tres focos de los colores primarios de luz, de izquierda derecha rojo, verde y azul, una pantalla blanca (abajo en el esquema) donde se representan las sombras de colores (1, 2 y 3), y un cuerpo opaco (rectángulo negro en el esquema) interpuesto entre los focos y la pantalla.

El cuerpo opaco genera tres sombras en la pantalla, una por cada lámpara.

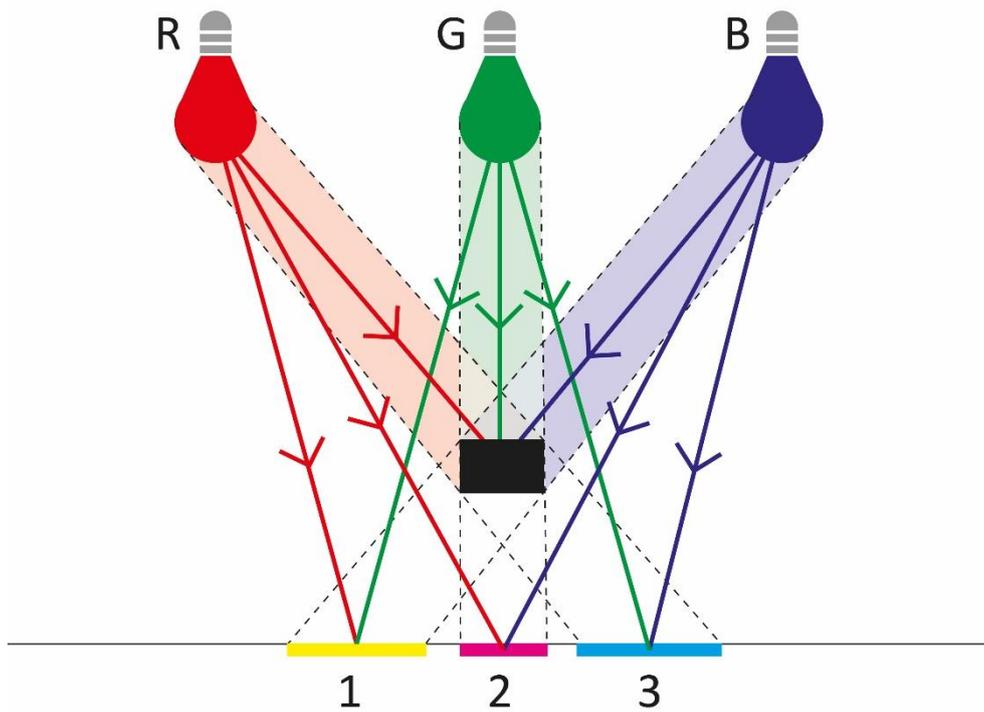


fig. 310 Esquema para la obtención de sombras de colores.

A la zona marcada con 1 llega luz roja y verde, mientras que la luz azul es detenida por el cuerpo opaco interpuesto entre la lámpara azul y la pantalla. La luz roja junto con la verde generan la sombra amarilla.

A la zona marcada con el numero 2 llega luz roja y azul, mientras que la luz verde es tapada por el cuerpo opaco y percibimos sombra magenta en la pantalla.

La zona 3 se verá cian puesto que solo llega luz verde y azul.

Las zonas que son iluminadas por las tres lámparas se verán blancas.



Video 27 SOMBRAS DE COLORES<sup>136</sup>

El video 27 muestra cómo se pueden lograr sombras de colores cian, magenta y amarillas a partir de luces roja, verde y azul.

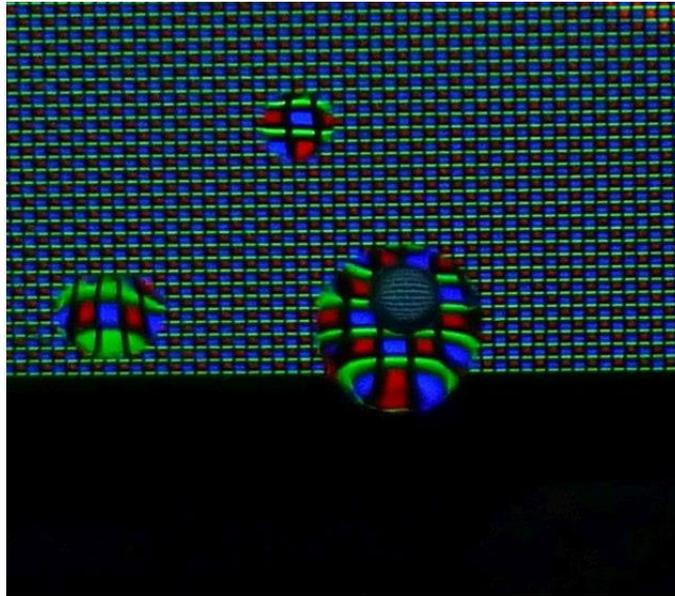


fig. 311 Pantalla de celular con agua pulverizada.

<sup>136</sup> El lector puede ver este video en:

<https://www.youtube.com/watch?v=r0IMiO8qtVQ>

La mezcla aditiva de luz se produce también en las pantallas de televisores, monitores y celulares, seguramente el lector habrá visto que cuando pequeñas gotitas caen sobre la pantalla de su celular se pueden ver las fuentes individuales, de colores primarios de luz, que crean toda la gama de matices que se pueden ver en ella. Las fotos de las figuras 311 y 312 corresponden a la pantalla de mi celular pulverizada con pequeñas gotitas, que de acuerdo a su forma<sup>137</sup>, hacen el papel de minúsculos lentes convergentes.

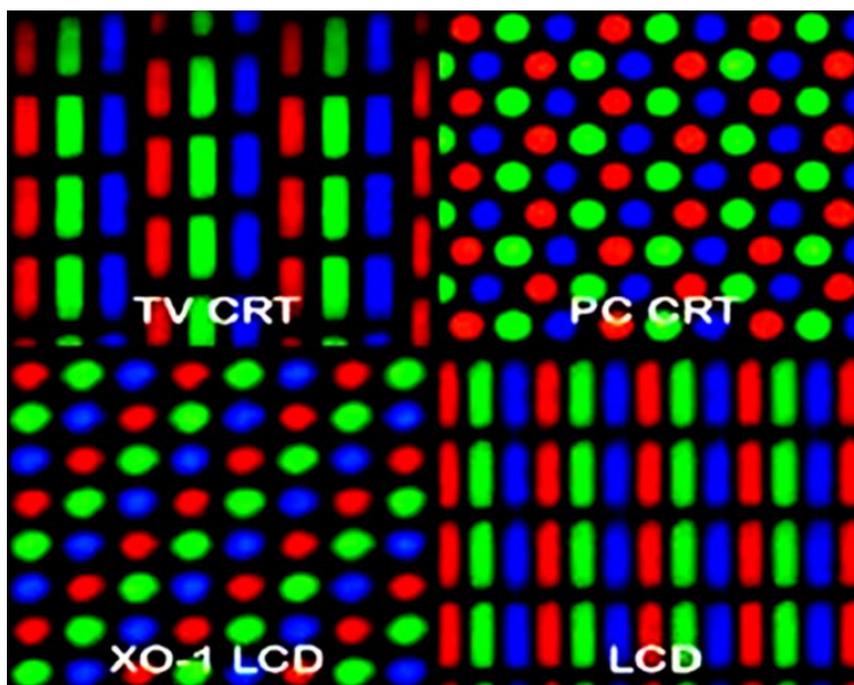


*fig. 312 Ampliación de pantalla de celular con tres gotas de agua que actúan como lentes*

Cada gotita funciona como una lupa a través de la cual se ven las fuentes individuales, la figura 312 es una ampliación donde se aprecia la estructura de la pantalla del celular. Esta estructura no es la única, en la fig. 313 se ven las de otras pantallas, todas coinciden en los colores primarios de luz (rojo, verde y azul) con los que se pueden lograr casi 17 millones de colores!!!

---

<sup>137</sup> Las gotitas son más finas en los bordes que en el centro y su índice de refracción es mayor que el del aire en el que están inmersas, por lo que al pasar por ellas, la luz converge y las gotitas actúan como pequeñas lupas.



*fig. 313 Estructura de diferentes pantallas*

En el campo del diseño gráfico, se han definido varios modelos para hacer referencia a los colores. Los dos modelos más conocidos son RGB y CMYK para mezcla aditiva y sustractiva respectivamente. El más utilizado para lograr los colores en las pantallas es el modelo o espacio RGB que trataremos a continuación.

### ESPACIO DE COLOR RGB

El espacio RGB (**R**ed, **G**reen, **B**lue), está basado en la síntesis aditiva y con él se puede lograr representar un matiz mediante la mezcla de los tres colores primarios de luz, existen dos posibilidades de notación para representar un color en RGB: la decimal y la hexadecimal. Trabajaremos con la notación decimal.

Para poder reproducir un color, despojarnos de lo subjetivo, de las diferentes percepciones de cada individuo, se hace necesario medir de alguna manera qué proporción de cada color primario se debe mezclar para obtener un determinado matiz, eso se puede lograr a través del espacio RGB donde se asigna un valor a cada uno de los colores primarios, de manera que el valor 0 significa su ausencia y a medida que ese valor aumenta se entiende que aporta más intensidad a la mezcla.

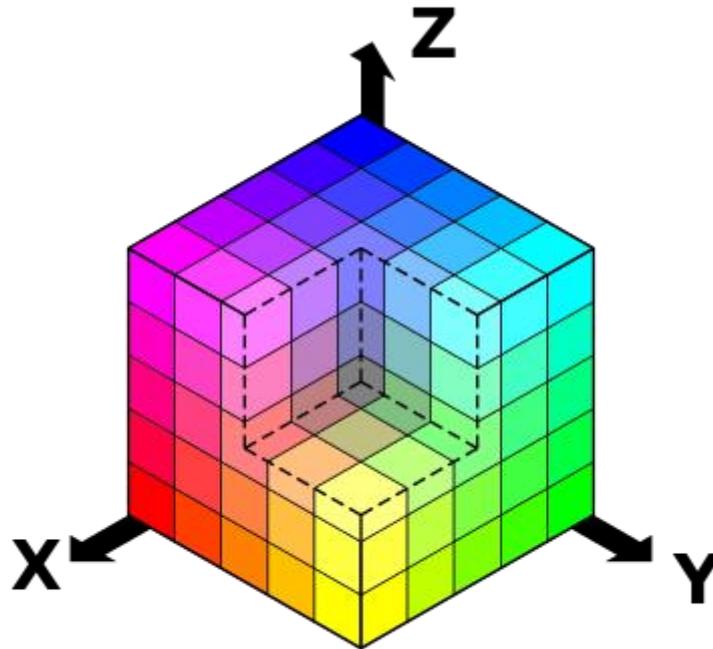


fig. 314 FUENTE<sup>138</sup>

A modo de ejemplo, el esquema de la fig. 314 muestra el corte de un espacio de color semejante al RGB en cuanto a su lógica, donde cada eje (X, Y, Z) se corresponde con (Rojo, Verde, Azul) respectivamente, se divide en cinco partes y se puede apreciar la formación de matices mezclando cada vez más luz de colores primarios. En este ejemplo, como cada uno de los tres ejes se divide en cinco partes, se forman  $5^3 = 125$  colores.

¿Cuántos colores se pueden obtener en el cubo RGB?

En informática se utiliza un sistema binario (ceros y unos) y la unidad de información es los bits. Para determinar el número de posibilidades (en este caso cada posibilidad corresponde a un color) debemos calcular  $2^n$ , donde para este caso n es el número de bits, por ejemplo:

Para dos bits existen  $2^2=4$  combinaciones posibles: (0,0) (0,1) (1,0) (1,1)

Para cuatro bits existen  $2^4=16$  posibilidades.

Una profundidad de color de 8 bits por canal, quiere decir, 8 bits de información por cada color primario.

Como tenemos dos posibilidades con las que configurar un tono, el cero y el uno, estamos hablando de  $2^8=256$  niveles por cada color primario incluyendo su ausencia que es el cero, por esa razón se usan 255 valores + (cero que es otro valor)=256 valores en cada eje.

<sup>138</sup> [https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo\\_de\\_colores#/media/File:RGBCube\\_b.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_de_colores#/media/File:RGBCube_b.svg)

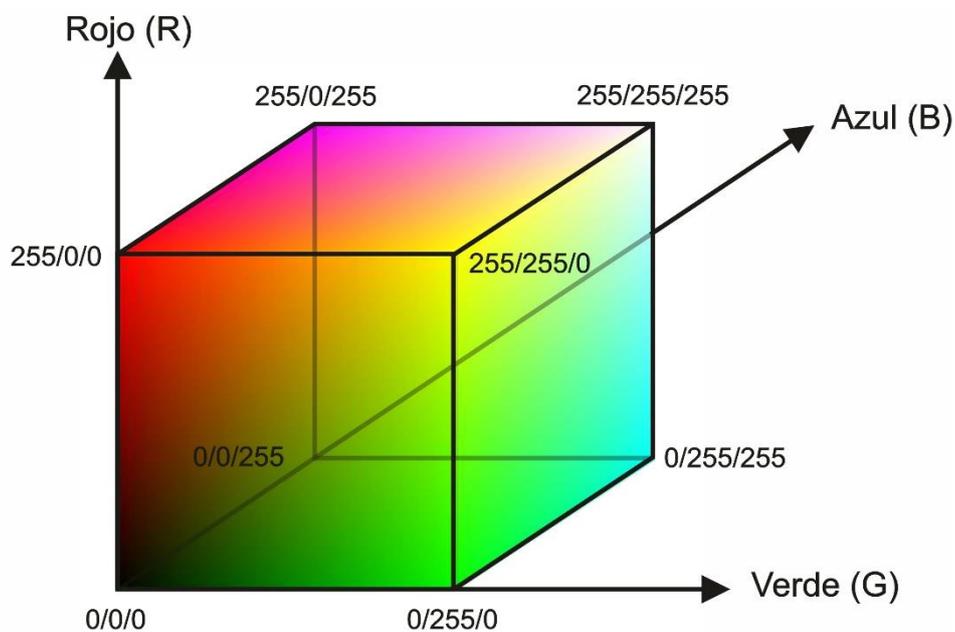


fig. 315 Cubo RGB

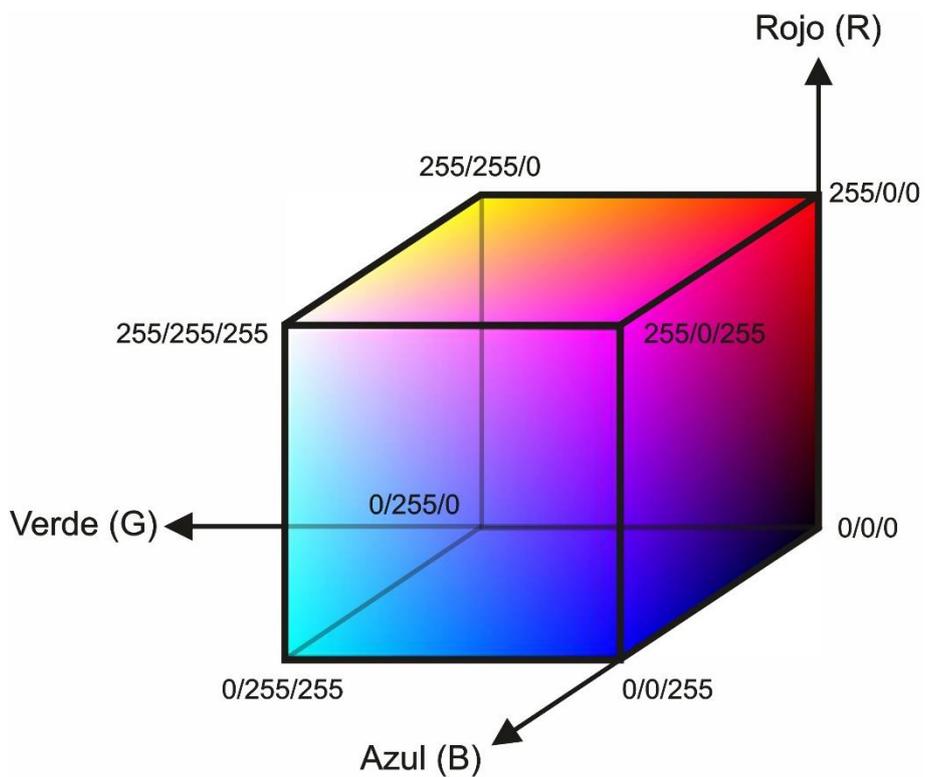


fig. 316 Cubo RGB

Como son tres colores que podemos mezclar en distintas cantidades es útil ubicarlos en tres coordenadas perpendiculares entre sí que van de cero a 255, formando un cubo que se conoce como cubo RGB y se muestra, mirado desde distintas posiciones, en las figuras 315 y 316.

En este cubo tenemos 256 niveles de color primario para cada eje, por lo tanto en el espacio del cubo habrá  $256^3=16.777.216$  posibles combinaciones de colores, aproximando:  $17 \times 10^6$  combinaciones. Cada combinación corresponde a un color, por eso se dice que el cubo RGB es el cubo de 17 millones de colores.

En este modelo cada color se define indicando sus tres componentes R (rojo), G (verde) y B (azul). Cada uno de los componentes puede tomar un valor entre cero y 255. De esta forma, el color rojo puro en RGB se crea mediante el máximo valor de la componente R (255) y valor de 0 para las componentes G y B, se representa como (255, 0, 0) donde cada letra (R, G, B) se sustituye por el valor correspondiente.

Los colores primarios en RGB se forman con uno de los componentes en su valor máximo (255) y los otros en cero.

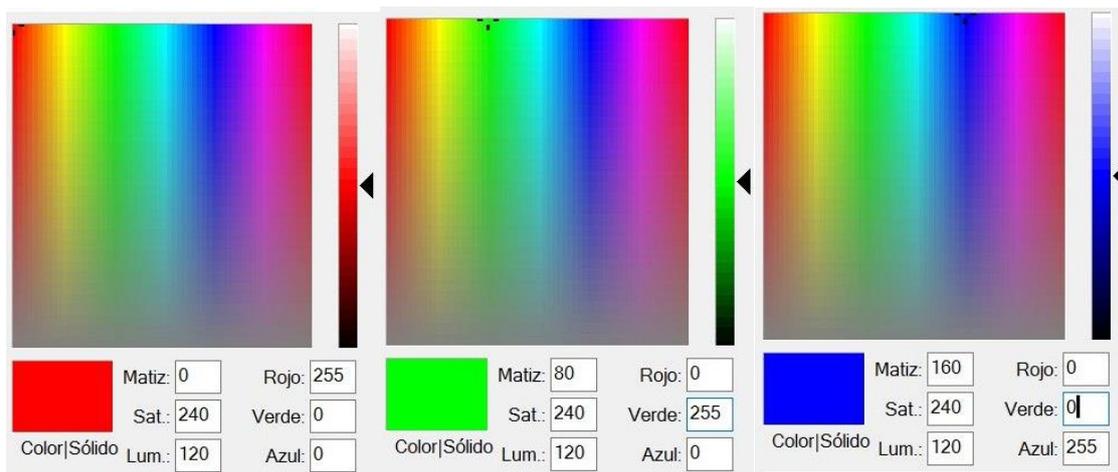


fig. 317 Rojo (255, 0, 0), verde (0, 255, 0), azul (0, 0, 255). Editor de color del Paint

En el editor de color del Paint (fig. 317), que utiliza el modelo RGB para lograr los colores, en la columna de abajo a la derecha podemos crear cada color indicando la cantidad de rojo, verde y azul.

Como dijimos la intensidad de cada una de las componentes se mide según una escala que va del 0 al 255 (256 valores). Por lo tanto, el rojo puro se obtiene con (255,0,0), el verde puro con (0,255,0) y el azul puro con (0,0,255), obtenemos así un color resultante monocromático. (fig. 317)

La combinación de dos colores a nivel 255 con un tercero en nivel 0 da lugar a tres colores secundarios puros (amarillo, cyan y magenta). De esta manera el amarillo es (255,255,0), el cyan (0,255,255) y el magenta (255,0,255). (Fig. 318)

Se llama color secundario o complementario aquel que tiene dos de sus componentes iguales a 255 y la tercera igual a 0.

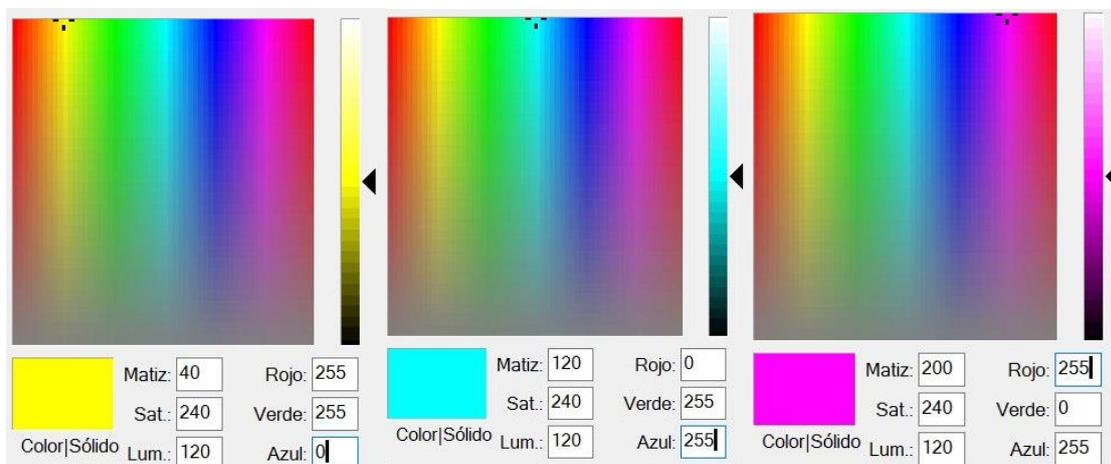


fig. 318 amarillo (255, 255, 0), cian (0, 255,255), magenta (255, 0, 255). Editor de color del Paint

La ausencia de color, que es la ausencia de luz, es percibida como negro, se obtiene cuando las tres componentes son 0, RGB (0,0,0) y se encuentra en el vértice del origen en el cubo RGB.

El color blanco se forma con los tres colores primarios a su máximo nivel: RGB (255,255,255) y se encuentra ubicado en el vértice opuesto.

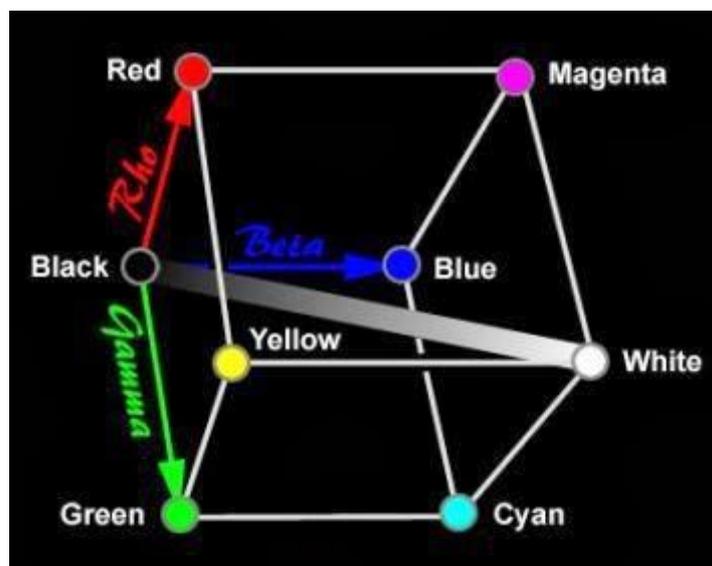


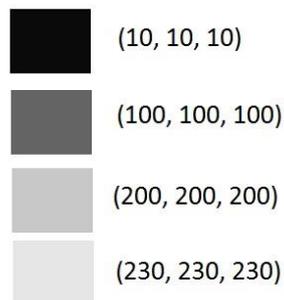
fig. 319 Escala de grises en la diagonal que une negro y blanco FUENTE<sup>139</sup>

<sup>139</sup> <http://photo.net/learn/optics/edscott/vis00020>

En la representación en forma de cubo cada color es una pequeña zona y la escala de grises estaría situada en la diagonal que une blanco y negro. (Fig. 319)

Los colores que se encuentran en esta diagonal se llaman acromáticos y tienen la misma proporción de los tres componentes primarios. Los valores bajos corresponden a grises oscuros, y a medida que van aumentando encontramos grises cada vez más claros como se aprecia en los siguientes ejemplos:

(10,10, 10) es gris muy oscuro, casi negro, y (230, 230, 230) se encuentra en el otro extremo de la diagonal de grises neutros.



La sintaxis que se utiliza para nombrar los colores en el espacio RGB es RGB () y entre paréntesis se indican las tres componentes RGB, en ese mismo orden separadas por comas. Por ejemplo RGB (60, 90, 200) representa el color que se obtiene mezclando las componentes R=60, G=90, B=200, que se corresponde con el color azul no saturado que se muestra en la fig. 320.

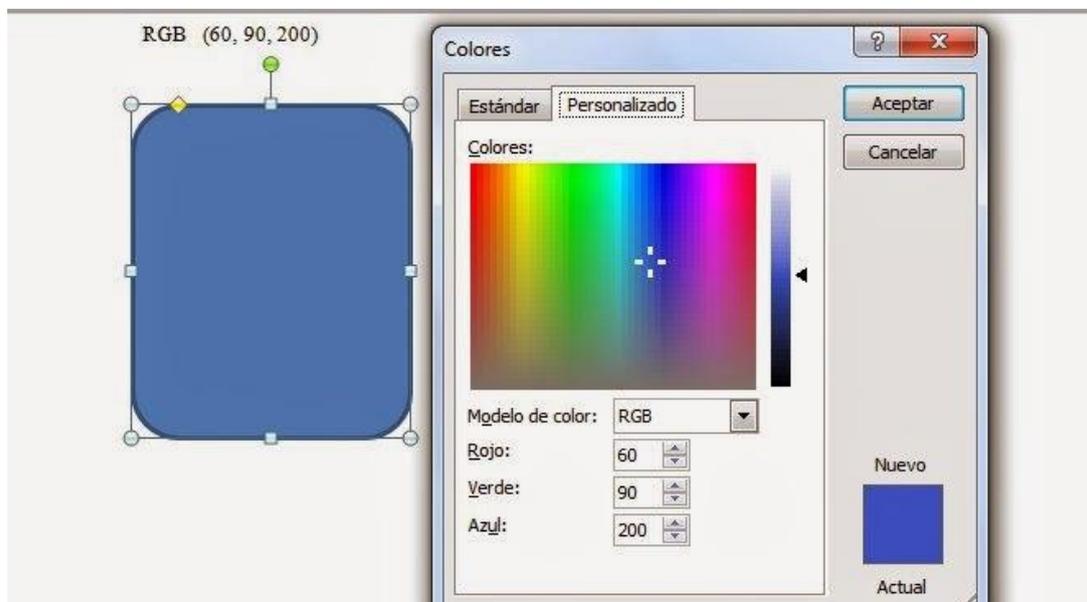


fig. 320 color RGB (60, 90, 200)

Se puede considerar un color no saturado como la suma de gris más otro color. En el ejemplo anterior obtuvimos un color no saturado porque contiene gris, gris más otro

color puro<sup>140</sup> que en este caso corresponde al azul formado por 30 de verde y 140 de azul:

$$\begin{array}{ccc}
 \text{[Grayscale Box]} & + & \text{[Dark Blue Box]} & = & \text{[Medium Blue Box]} \\
 (60, 60, 60) & + & (0, 30, 140) & = & (60, 90, 200)
 \end{array}$$

Otro azul es RGB (102, 140, 166). Analicemos cómo podemos ubicar este color dentro del espacio RGB, con este fin determinemos la posición en cada uno de los ejes:

$102/255 = 0,40$  del eje de rojo,

$140/255 = 0,55$  del eje verde

$166/255$  de 0,65 del eje azul.

En el espacio de color RGB podemos visualizar la ubicación del color en el cubo utilizando los tres vectores que lo describen (Fig. 321). Este color está muy próximo al eje de los neutros por lo que es muy poco saturado.

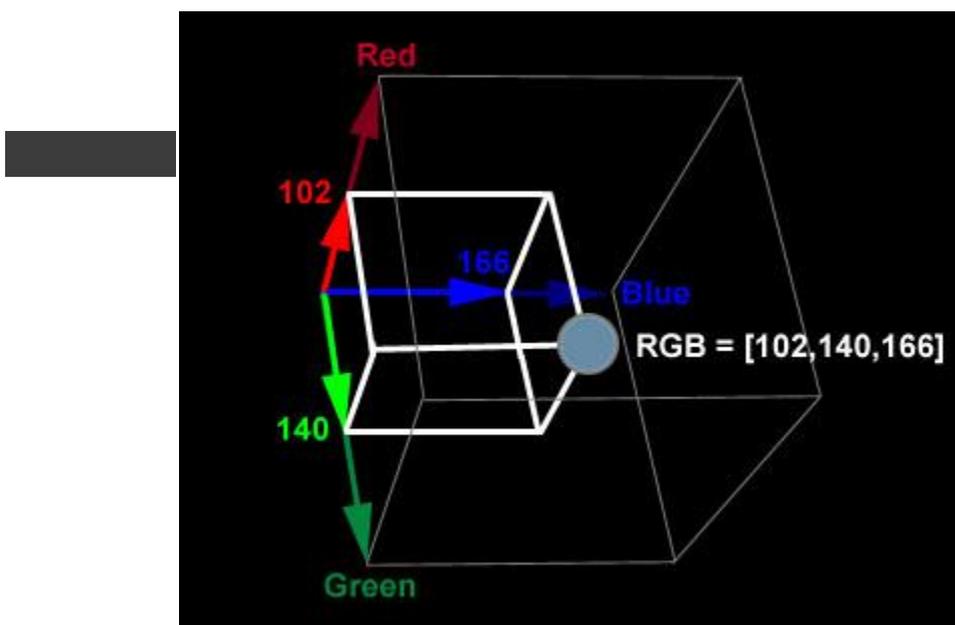


fig. 321 RGB (102, 140, 166) FUENTE <sup>141</sup>

<sup>140</sup> Llamaremos color puro a aquel que tiene una de sus componentes iguales a 0, por lo que se ubica en una de las tres caras de cubo formadas por los ejes R,G y B .

<sup>141</sup> <http://photo.net/learn/optics/edscott/vis00020>

Podemos descomponer este azul en gris neutro más otro color puro de la siguiente manera:

Elegimos el componente que tenga el menor valor, en este ejemplo es rojo (120), se lo restamos a todos los valores, para obtener gris neutro (120,120, 120) más el color restante que en este caso es RGB (0, 20, 46) que proviene de:

Rojo:  $120-120=0$

Verde:  $140-120= 20$

Azul:  $166-120= 46$

El otro color componente es RGB (0, 20, 46) que corresponde a azul oscuro, azul porque contiene mucho más azul que verde y oscuro porque los valores son bajos, tiene poca cantidad de luz.



(120, 120, 120) + (0, 20, 46) = (120,140, 166)

Recordemos que estamos mezclando colores de luz por lo que la mezcla resulta más clara que los componentes.

Para obtener amarillo intenso deberé mezclar los dos colores que sumados dan como resultado amarillo (rojo y verde), a medida que le agregamos azul el color va perdiendo saturación, porque al tener los tres componentes distintos de cero la mezcla contiene gris, y va aclarándose a medida que agregamos luz.

Ejemplos:

RGB (255, 255, 0)	
RGB (255, 255, 100)	
RGB (255, 255, 150)	
RGB (255, 255, 200)	
RGB (255, 255, 240)	

Los colores que presentan máxima saturación son los que tienen al menos un componente 0 y el o los otros 255. Teniendo en cuenta estos valores, ¿En qué lugar del cubo se ubican los colores de máxima saturación?

Los colores puros o saturados son aquellos en los que al menos uno de sus componentes es cero, por lo tanto se encuentran en una de las tres caras del cubo formadas por los ejes: Rojo-Verde, Verde-Azul y Rojo-Azul.

Ejemplos de colores puros:

(0, 30, 255) 

(0, 240, 50) 

(240, 0, 230) 

(200, 220, 0) 

(50, 80, 0) 

(255, 0, 0) 

## ESTUDIO DE OBRAS A TRAVÉS DE MÉTODOS FÍSICOS

En la actualidad el mundo del arte se vale de técnicas basadas en el conocimiento científico que brindan un sinnúmero de posibilidades que van desde datar obras, establecer su autenticidad, observar las capas que se encuentran debajo de la pintura, ver los bosquejos o las líneas que trazaba el artista antes de pintar, detectar si el soporte se encuentra en buenas condiciones o ha sido atacado por insectos, y una larga lista que no enumeramos.

La física aporta la posibilidad de aplicar múltiples técnicas de análisis al estudio de las obras de arte, a través de procedimientos científicos podemos introducirnos en el taller del pintor, acompañarlo mientras trabaja y husmear mientras prepara sus pinturas, ver que pigmentos y aglutinantes utiliza y el orden en que los aplica. Algunas de las técnicas que nos permiten este viaje en el tiempo son:

- ➔ Técnicas que utilizan rayos X, luz ultravioleta e infrarrojos.
- ➔ Espectrometría fluorescente por reflexión de rayos X (TXRF).
- ➔ Espectrometría de absorción atómica (AAS) y la espectrometría de plasma por inducción (ICPS).
- ➔ Estudio de los aglutinantes en base a carbono.
- ➔ Neutronenautoradiografie (NAR)
- ➔ Espectroscopia gamma

Teniendo en cuenta que el tema espectro electromagnético es uno de los tratados en bachillerato artístico, desarrollaremos brevemente alguna de las técnicas que utilizan ondas electromagnéticas para obtener información acerca de obras de arte. Si bien es sabido que estos métodos también son muy útiles y se usan en otras áreas como arquitectura y escultura, trataremos su aplicación en el arte a través de la pintura.

### TÉCNICAS QUE UTILIZAN RAYOS X, ULTRAVIOLETAS E INFRARROJOS.

Los rayos X, ultravioletas e infrarrojos, igual que la luz visible, forman parte del espectro electromagnético del que tratamos brevemente en el tema color y mostramos su esquema en [fig. 276](#).

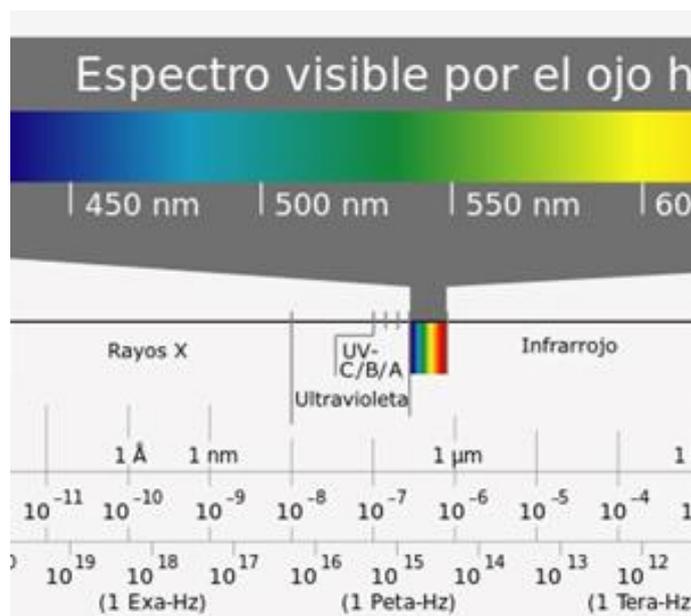


fig. 322 Parte del espectro electromagnético

Recortamos un trozo de la figura 276 para mostrar la posición de los rayos X, ultravioletas e infrarrojos en relación al espectro visible (fig. 322), como se aprecia en este esquema, estas radiaciones corresponden a las longitudes de onda y frecuencias más próximas a la luz por sus dos extremos. Los rayos infrarrojos son contiguos al rojo, los ultravioletas contiguos en el otro extremo, con longitudes de onda un poco menor que el violeta y seguidos por los rayos X.

Los rayos X fueron descubiertos en 1895 por un profesor de física al que sus alumnos apodaban “el inalcanzable”, mientras experimentaba con un tubo de rayos catódicos. Este profesor llamado Wilhelm Röntgen fue el primero en obtener el Premio Nobel de Física en el año 1901 gracias a su descubrimiento.

El descubrimiento de los rayos X revolucionó al mundo de la ciencia, la medicina, y tuvo un enorme impacto social. Por esta razón, previendo el futuro de los rayos X, el inventor e industrial norteamericano Thomas Edison insistió en comprar la patente del descubrimiento a Röntgen, el cual se negó en un gesto digno de destacar porque consideraba los beneficios de su invento como patrimonio de la humanidad. Desde la década de 1920 a 1930 se comenzó a utilizar la técnica de radiografía de rayos X.

Como podemos ver en el esquema de la fig. 322, los rayos X tienen mayor frecuencia que la luz visible y que los rayos ultravioletas, por lo que poseen mayor energía, recuerde que la energía de la onda electromagnética es directamente proporcional a su frecuencia ( $E=hf$ )<sup>142</sup>.

Al tener mayor frecuencia que la luz visible, su longitud de onda es menor, las longitudes de onda de los rayos X son excesivamente cortas, en muchos casos, varias veces menores que el diámetro de un átomo, atraviesan selectivamente los objetos sólidos,

<sup>142</sup> Donde h es la constante de Planck:  $h=6,626076 \times 10^{-34}$  Js

cuanto más grandes son los átomos que componen una sustancia, más opaca será dicha sustancia para los rayos X que atraviesan gran parte de los materiales como papel, madera, tejidos blandos, incluso metales menos densos que el plomo.

Materiales que son opacos para la radiación visible son transparentes para los rayos X que tienen un gran poder de penetración e impresionan las películas fotográficas al igual que la luz visible. Si colocamos una película fotográfica detrás de un cuadro y lo irradiamos por el frente con rayos X, lo mismo que cuando nos sacan una placa, se puede ver en la radiografía lo que no vemos a simple vista, lo que hay debajo de la pintura como los arrepentimientos del pintor o los clavos que afirman la tela al bastidor.

Los compuestos que contienen plomo<sup>143</sup> son opacos para los rayos X y en la radiografía aparecen blancos, los que contienen metales más livianos son menos opacos, por ejemplo si el pigmento utilizado contiene hierro, en la radiografía aparece como gris medio y las zonas que contienen materiales transparentes para los rayos X aparecen negras como la zona de la casaca de Phillips Lucasz, en la siguiente obra de Rembrandt (RETRATO DE PHILLIPS LUCASZ).

La zona de la ropa negra fue pintada con óleo fabricado a partir de pigmentos a base de carbón animal, el carbón animal está compuesto por átomos de carbono, fósforo, azufre, calcio y oxígeno, elementos de bajo número y masa atómica comparados con el Pb. (ver tabla 4)

Elemento y símbolo químico	Número atómico	Masa atómica
Carbono (C)	6	12
Oxígeno (O)	8	16
Azufre (S)	16	32
Calcio (Ca)	20	40
Hierro (Fe)	26	56
Plomo (Pb)	82	207

Tabla 4

<sup>143</sup> El plomo (Pb) con número atómico 82 y masa atómica 207u es un átomo grande y pesado cuyo diámetro cae dentro del rango de las longitudes de onda de los rayos X.



fig. 323 Mosaico de rayos X  
Retrato de Phillips Lucasz



fig. 324 Rembrandt  
Retrato de Phillips Lucasz

En las figuras 323 y 324 comparamos la fotografía de la obra de Rembrandt Retrato de Phillips Lucasz con el mosaico de rayos X y podemos observar que en el mosaico aparece la mano izquierda del protagonista (abajo a la derecha) que en la obra no se encuentra.

¿Un “arrepentimiento” de Rembrandt que inicialmente pintó una mano en la que utilizó blanco de plomo, que luego cubrió con pintura y no aparece en la obra?

¿La obra está inacabada?

¿La obra ha resultado dañada por alguien que cubrió la mano posteriormente a Rembrandt?

Son varias las posibilidades en torno al misterio de la mano, pero estudios científicos acerca de esta obra han ido develando algunos secretos, se sabe que la obra inicialmente era rectangular y que se cambió su formato, es posible que la mano se modificara en ese entonces, con fecha posterior a los años treinta del siglo XVII.

¿Por qué aparece la mano en el mosaico de rayos X?

Los rayos X no atraviesan el plomo ni las sustancias que lo contienen, por lo que la técnica de rayos X ha sido muy útil para detectar las zonas pintadas con blanco de plomo. Este pigmento blanco se utilizaba en la antigüedad desde 400 años antes de Cristo, Plinio y Vitruvio ya lo mencionaban y enseñaban su preparación a partir de plomo metálico y vinagre.

El blanco de plomo o albayalde es opaco para los rayos X y hasta el siglo XIX era el único pigmento blanco usado en pintura artística. A partir del siglo XIX se dejó de utilizar como

pigmento para artistas por ser altamente tóxico, actualmente ha sido sustituido por otros pigmentos.

De acuerdo a estos datos históricos, si a través de una placa con rayos X se detecta que una obra contiene blanco de plomo, es muy probable que haya sido creada antes del siglo XIX, y si a través de los rayos X se detecta que el blanco utilizado no es de plomo, es altamente probable que la obra sea posterior al siglo XIX. De esta forma se han detectado falsificaciones modernas de obras de los grandes maestros que vivieron cuando el blanco que se utilizaba era el albayalde.

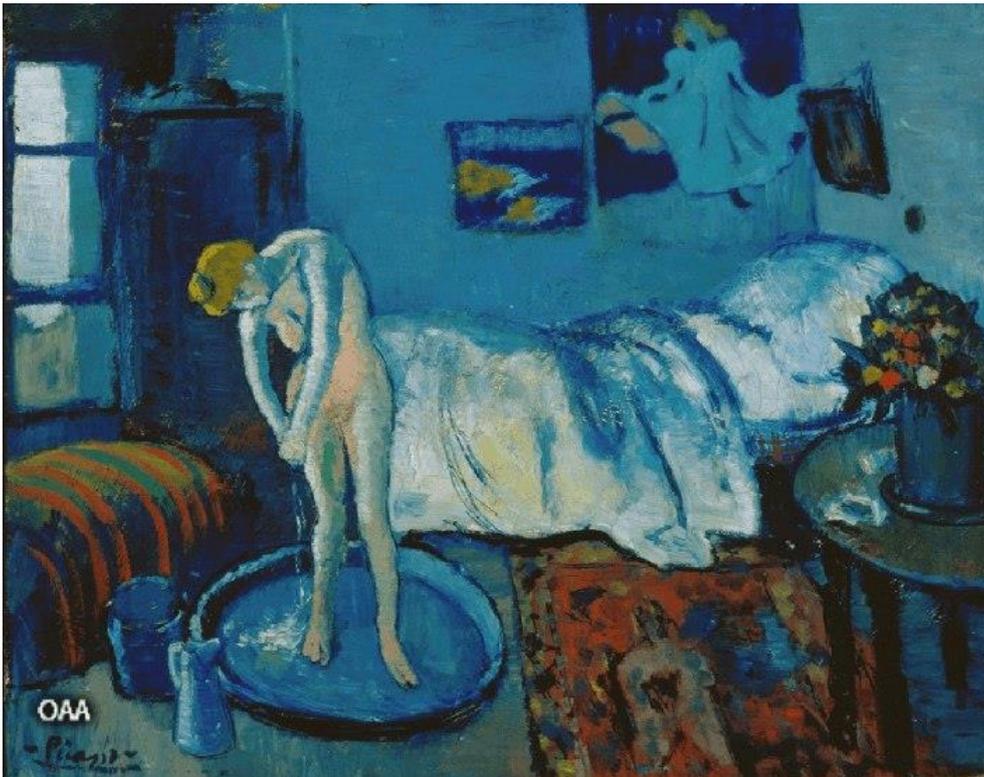


fig. 325 LA HABITACIÓN AZUL de Pablo Picasso



*fig. 326 Estudio con rayos X de la habitación azul de Pablo Picasso*

Cuando los rayos X atraviesan una obra, las transparencias y opacidades dependen de las densidades y del espesor de los materiales, se pueden identificar las modificaciones en la obra, los tipos de pintura utilizados, cómo el artista ha fabricado el soporte y se ven los clavos utilizados para asegurar el lienzo (fig. 337); esto también aporta datos sobre el momento histórico en el que se creó.

A través del estudio con rayos X, debajo de la HABITACIÓN AZUL de Pablo Picasso (fig. 325) se descubrió la figura de un hombre (fig. 326), que corresponde a un cuadro pintado con anterioridad y que Picasso cubrió con una nueva obra. Ésta no es la única obra de Picasso que fue pintada sobre otra, el VIEJO GUITARRISTA, (fig. 327) es otro ejemplo donde podemos ver, a través del estudio de rayos X, la cara y partes del cuerpo de una mujer que subyace debajo de la pintura (fig. 328).



fig. 327 Viejo guitarrista- Pablo Picasso



fig. 328 RX Viejo guitarrista- Pablo Picasso

Los que se dedican a autenticar pinturas usan habitualmente rayos X porque además de develar los secretos que hay debajo de una pintura ayudan a establecer su autenticidad, tipos de materiales, bosquejos preparatorios, cambios en la composición y otras claves que son útiles para probar la naturaleza, el origen de una pintura y detectar rastros de minerales y otros elementos contenidos en la mezcla de pintura. Estos rastros pueden aportar información acerca de dónde y cuándo se creó la obra.

Los rayos X también son utilizados por los museos en otra técnica denominada espectrometría fluorescente por reflexión de rayos X (TXRF), que implica la extracción y análisis de una micro muestra de pintura para examinar la composición de los pigmentos utilizados; consiste en estimular la muestra con rayos X de alta intensidad, esto produce la radiación de rayos X secundarios por parte de la muestra, cada elemento químico emite de determinada manera, es como si pudiésemos ver las huellas digitales de cada elemento que compone la muestra, de esta forma se logra determinar de manera precisa el contenido de la muestra<sup>144</sup>.

<sup>144</sup> [PRINCIPIOS DE LA TÉCNICA TXRF](#)

[https://www.uam.es/ss/Satellite/es/1242668320046/1242666520307/UAM\\_Laboratorio\\_FA/laboratorio/Laboratorio\\_de\\_Fluorescencia\\_de\\_Rayos\\_X\\_por\\_Reflexion\\_Total\\_\(TXRF\).htm](https://www.uam.es/ss/Satellite/es/1242668320046/1242666520307/UAM_Laboratorio_FA/laboratorio/Laboratorio_de_Fluorescencia_de_Rayos_X_por_Reflexion_Total_(TXRF).htm)

Cada pintura tiene una composición química única y se sabe cuándo se comenzó a utilizar.

Según el científico R.Klockenkamper, autor del libro “TOTAL REFLECTION X-RAY FLUORESCENCE ANALYSIS” y especialista en el análisis espectral de rayos X, una determinada característica de los pigmentos puede ayudar en la asignación de una fecha probable a la pintura.

Por ejemplo, el azul de Prusia comenzó a utilizarse en 1725, si en una obra atribuida a Rembrandt, que vivió entre 1606 y 1669, se detecta azul de Prusia, seguramente es falsa, tan falsa como EL HOMBRE DEL YELMO DORADO (fig. 329) del museo de Berlín que, a pesar de ser una de las obras más reproducidas en los catálogos de Rembrandt, fue declarado una falsificación después de realizarle un análisis forense<sup>145</sup> y la prueba de Morelli<sup>146</sup>.

EL HOMBRE DEL YELMO DORADO es tal vez una de las pinturas más reproducidas en los últimos doscientos años. Después que el Comité Rembrandt evaluó esta pintura, se la declaró como una imitación hecha en el siglo XVIII.<sup>147</sup>

---

<sup>145</sup> Los análisis forenses sirven para determinar la autenticidad de una obra, entre las pruebas que se realizan están: la utilización de rayos X, la prueba de datación por carbono, que determina la edad de un objeto y espectrometría fluorescente por reflexión de rayos X.

<sup>146</sup> El análisis de Morelli es un método empírico que busca identificar artistas y talleres por detalles estilísticos repetidos que aparecen en sus trabajos, diferencia los trabajos genuinos de los falsos y fue desarrollado por Giovanni Morelli a finales del siglo XIX. [AMPLIAR INFORMACIÓN](#)

<http://www.artexpertswebsite.com/es/morellian-es.php>

<sup>147</sup> [FUENTE](#)

<http://criminalistica.mx/areas-forenses/categorias/1304-analisis-forense-de-una-obra-de-arte>



fig. 329 EL HOMBRE DEL YELMO DORADO ¿¿¿¿Rembrandt????

Otro de los estudios realizados para obtener información acerca de las obras de arte es el estudio con radiación ultravioleta, la fotografía con luz ultravioleta no necesita materiales muy complicados, incluso se puede obtener con una cámara digital, un filtro UV y una lámpara que emita UV (que puede ser un tubo fluorescente de mercurio de los usados para iluminación), la fotografía así obtenida es una reflectografía ultravioleta que aporta información respecto a la composición de los pigmentos, se ha encontrado que los barnices antiguos presentan fluorescencia con este método mientras que los más nuevos no la producen, de esta manera se puede diferenciar lo pintado tiempo atrás de lo moderno y determinar qué zonas de una obra fueron restauradas.

En la figura 330 podemos ver la reflectografía ultravioleta de la obra **HÉRCULES EN LA CORTE DE ONFALIA** de Hans Cranach, que vimos cuando tratamos soporte y barniz, donde se pueden observar manchas oscuras que corresponden a zonas retocadas en restauraciones. La fotografía pertenece al estudio de la obra realizado para su restauración en el museo Thyssen.



fig. 330 Reflectografía ultravioleta de la obra *HÉRCULES EN LA CORTE DE ONFALIA* de Hans Cranach [FUENTE](#)<sup>148</sup>

La fotografía infrarroja permite ver los trazos del dibujo subyacente que realizó el artista antes de pintarlo. En la figura 331 vemos la fotografía infrarroja de la misma obra de Hans Cranach.

---

<sup>148</sup> <http://pdigital.museothyssen.org/index.html?revista=87224685&pagina=6934>



fig. 331 Fotografía infrarroja de la obra de Hans Cranach: HÉRCULES EN LA CORTE DE ONFALIA.

La radiación infrarroja fue descubierta por Sir William Herschel en 1800 mientras descomponía luz solar con un prisma y medía la variación de temperatura al colocar el termómetro en los diferentes colores del espectro visible. Mientras experimentaba, se vio sorprendido por un aumento mayor de temperatura después del rojo, donde no había radiación visible, por eso los llamó infrarrojos, por estar debajo del rojo.

Los infrarrojos, las radiografías de rayos X o la exposición a la luz ultravioleta son técnicas esenciales para que historiadores y restauradores descifren la verdadera historia tras las obras de arte y puedan actuar con más seguridad en su restauración, sabiendo qué hay debajo de las capas de pintura.

Los estudios técnicos son imprescindibles para acometer una restauración, ya que brindan un apoyo muy importante a la hora de establecer un criterio de intervención y una metodología de trabajo. Por otra parte, la información obtenida proporciona datos fundamentales sobre el proceso de creación de la obra, permite explorar las capas internas y ver lo que no se ve a simple vista cuando la obra es iluminada con luz del espectro visible.



fig. 332 RX Hércules en la corte de Onfalia de Hans Cranach

Acerca de los estudios técnicos de la obra HÉRCULES EN LA CORTE DE ONFALIA de Hans Cranach, el museo Thyssen publica en su página Web:

*“La radiografía nos muestra todos los estratos que forman la obra, desde el soporte de madera con el embarrotado, hasta la capa superficial de pintura. A través de los rayos X se aprecia con claridad las zonas pintadas con materiales opacos: los blancos y brillos de las joyas. Cranach elaboró la obra conociendo el resultado que quería obtener, por eso la radiografía y la pintura se ajustan perfectamente. En el soporte de madera se aprecian las galerías de insectos xilógrafos de una antigua contaminación.*

*La fotografía infrarroja descubre el dibujo preciso y delicado que realizó el artista antes de pintar el cuadro. El encaje de las figuras es fiel al resultado final y demuestra que Cranach tenía muy clara la composición. En las carnaciones, la capa de pintura es casi una veladura que permite contemplar el dibujo subyacente. “FUENTE<sup>149</sup>*

<sup>149</sup> [http://pdigital.museothyssen.org/index.html?revista=87224685&pagina=6932%20:](http://pdigital.museothyssen.org/index.html?revista=87224685&pagina=6932%20)

Como en el caso anterior, existen infinidad de ejemplos en que los conocimientos científicos acerca de la radiación electromagnética se han puesto al servicio del arte, veamos otros dos estudios publicados por museos acerca de la obra de Van Eyck EL MATRIMONIO ARNOLFINI y LA GIOCONDA (COPIA) del taller de Leonardo da Vinci.

La publicación del estudio de la obra de Jan Van Eyck pertenece a la National Gallery de Londres y la del taller de Leonardo da Vinci al Museo Nacional del Prado de Madrid.



fig. 333 Reflectograma infrarrojo compuesto de EL MATRIMONIO ARNOLFINI  
Jan van Eyck (detalle) [FUENTE<sup>150</sup>](#)

En el Reflectograma infrarrojo compuesto de EL MATRIMONIO ARNOLFINI podemos observar las variaciones en la posición de los ojos y las manos, parte del informe presentado luego del estudio es el siguiente:

---

<sup>150</sup> [http://www.nationalgallery.org.uk/upload/pdf/billinge\\_campbell1995.pdf](http://www.nationalgallery.org.uk/upload/pdf/billinge_campbell1995.pdf)

*“Un reflectograma infrarrojo de El retrato Arnolfini muestra muchos detalles, alteraciones que el artista realizó; algunos se ven reforzadas por las imágenes de color de la pintura. Hay numerosos cambios en los rostros y en las posiciones de las manos y los pies,... Muchos detalles arquitectónicos, que se considera que tiene el simbolismo central para el retrato, resultan haber sido pintados en una etapa tardía, sin dibujo subyacente.”*

*Billinge, R., Campbell, L. "Los reflectogramas infrarrojos de retrato de Juan de Jan van Eyck (?) Arnolfini y su esposa Juana Cenami (?)"'. National Gallery Boletín Técnico Vol 16, pp 47-60. [FUENTE](#)<sup>151</sup>*



*La Gioconda (copia) antes de la restauración*



*La Gioconda (copia) después de la restauración*

*fig. 334 Gioconda (copia) Antes y después*

La última obra de la que veremos los estudios a través de ondas electromagnéticas se encuentra en el Museo del Prado de Madrid, es una copia de la Gioconda de Leonardo da Vinci que se encuentra en el Museo del Louvre de París. Se cree que la copia que estudiaremos fue pintada en el taller de Leonardo simultáneamente con la original. Esta copia ha sido analizada con el objetivo de acometer su restauración y existen registros e informes de los resultados obtenidos, el estudio técnico manifiesta:

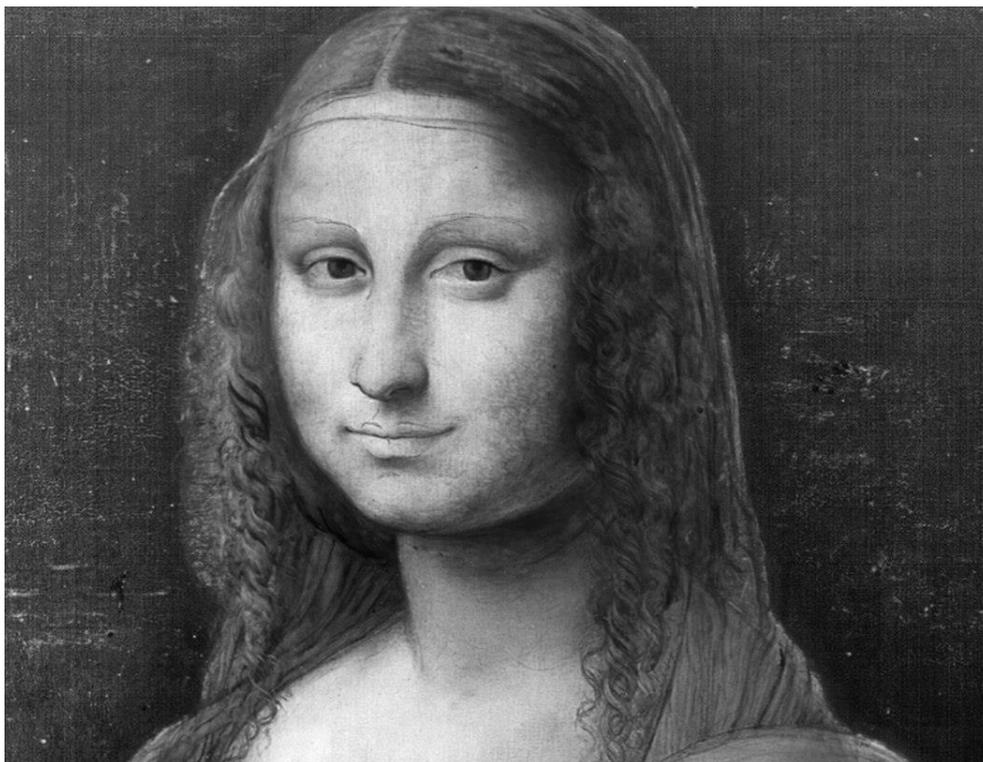
<sup>151</sup> [http://www.nationalgallery.org.uk/technical-bulletin/billinge\\_campbell1995](http://www.nationalgallery.org.uk/technical-bulletin/billinge_campbell1995)

*“El análisis técnico y la restauración han permitido recuperar la imagen original del cuadro y uno de los testimonios más representativos de los procedimientos del taller de Leonardo, convirtiéndola en la versión más importante de la Gioconda conocida hasta el momento (fig. 334)”*



*fig. 335 Detalle de La Gioconda (copia) junto a La Gioconda (©Elsa Lambert, C2RMF)*

*El estudio cruzado de las dos obras y de sus documentos técnicos está contribuyendo también a comprender la pintura del Louvre y a completar la secuencia de los pasos de su ejecución, puesto que la nitidez de las imágenes generadas por el examen de la copia ayuda a distinguir rasgos en los documentos de la original que, hasta ahora, habían pasado desapercibidos o cuya comprensión no era fácil (Fig. 335). Los datos aportados por el examen comparado de las dos obras, corroboran también lo que se conoce sobre el funcionamiento del taller de Leonardo, descrito por Martin Kemp en su investigación sobre las versiones existentes de la Madonna del huso y registrado en una carta escrita por Fray Pietro de Novellara a Isabella d'Este, tras visitar la bottega del maestro, en la que le mencionaba haber visto a dos de sus aprendices hacer copias porque el maestro estaba muy atareado.*



*fig. 336 Reflectografía infrarroja de La Gioconda (copia)*

*La existencia del paisaje bajo el fondo negro se detectó en la reflectografía infrarroja (fig. 336) y el examen de la superficie con luz rasante, antes del comienzo de la restauración, confirmándose después con la radiografía (fig. 337). A pesar de la evidencia, fue necesario determinar si la adición de la sustancia negra era posterior a la ejecución de la pintura y, en este caso, si ocultaba algún daño en ella. Los análisis químicos concluyeron que se trataba de un repinte”*

[FUENTE](#)<sup>152</sup>

---

<sup>152</sup> <https://www.museodelprado.es/investigacion/estudios/estudio-de-la-gioconda-del-museo-nacional-del-prado/estudio-tecnico-y-restauracion-de-la-obra/analisis-tecnico/>



fig. 337 Radiografía de La Gioconda (copia)

En el siguiente link puedes entrar a un visor interactivo creado por el Museo del Prado donde se superpusieron las dos imágenes y se puede comparar la obra antes y después de la restauración, tirando de las flechas en el medio de la obra hacia la derecha o hacia la izquierda el lector podrá ver la obra antes o después de la restauración. [IR AL VISOR INTERACTIVO](https://www.museodelprado.es/pradomedia/multimedia/visor-interactivo-la-gioconda-antes-y-despues-de-la-restauracion/) <sup>153</sup>

Estos ejemplos son una muestra de cómo la utilización de técnicas en las que intervienen ondas electromagnéticas no visibles, que han sido estudiadas por la ciencia, se emplean en la conservación de las obras de arte y también aportan a la historia del arte. Estos no son los únicos procedimientos aplicados, ellos se combinan con otros, que también utilizan conocimientos científicos como la radioactividad o la espectrometría.

---

<sup>153</sup> <https://www.museodelprado.es/pradomedia/multimedia/visor-interactivo-la-gioconda-antes-y-despues-de-la-restauracion/>



## EPÍLOGO

Querido lector, si me has acompañado hasta aquí tal vez compartas la idea de que ciencia y arte, lejos de ser antagónicos, se complementan.

Este trabajo ha pretendido ser una pequeña muestra de las infinitas redes que la humanidad viene tejiendo desde tiempos remotos entre arte y ciencia, estamos muy, muy lejos de agotar el tema, quedan muchas puertas que puedes abrir e investigar, detrás de cada una de ellas hay un mundo esperando a que lo descubras y contribuyas a esa enorme red que es el conocimiento humano.



## BIBLIOGRAFÍA

Juan Arentsen S.- LUZ, EGOS Y UNIVERSOS- Ed. Andrés Bello-Chile 1985

Jean Baptiste Dumas- TRATADO DE QUÍMICA APLICADA A LAS ARTES, VOLUMEN 2- traducción al español de Luciano Martínez.-Imprenta D. Benito Hortelano y Compañía- Madrid 1845

David Bomford, Christopher Brown, Ashok Roy – REMBRANDT, materiales, métodos y procedimientos del arte.- Ediciones del Sarbal- España 1996

<sup>5</sup>Charles Bouleau- TRAMAS: LA GEOMETRÍA SECRETA DE LOS PINTORES- Editorial AKAL- Madrid 2006

Jaime Buhigas Tallon- LA DIVINA GEOMETRÍA –Editorial La esfera de los libros -España 2008

Cennino Cennin - EL LIBRO DEL ARTE - Editorial Argos BBAA 1947

Lourdes Cirlot, Anna Pou, Mireia Arnau, Natalia Miranda, Sandra Miranda.- MUSEOS DEL MUNDO – KUNSTHISTORISCHES- cetro editor PDA, S.L. Argentina 2005

Enrique Corrales Crespo, LA OBRA FOTOGRÁFICA DE DAVID HOCKNEY UNA REFLEXIÓN SOBRE LO MÚLTIPLE FOTOGRÁFICO, TESIS DOCTORAL, Universidad Complutense de Madrid, Madrid 2012

Jonathan Crary- LAS TÉCNICAS DEL OBSERVADOR: VISIÓN Y MODERNIDAD EN EL SIGLO XIX-CENDEAC, 2008 Murcia-España

André Chaste EL ARTE ITALIANO- AKAL 1988 Madrid, España

Max Doerner -LOS MATERIALES DE PINTURA Y SU EMPLEO EN EL ARTE - REVERTE, 1977, Barcelona, España

Bruno Ernest –EL ESPEJO MÁGICO DE M.C. ESCHER- Ed. Taschen Alemania 1992

George Gamow- BIOGRAFÍA DE LA FÍSICA- editorial Alianza, Madrid 1985

David Hernández de la fuente- VIDAS DE PITAGORAS- Ediciones Atalanta – Girona, España 2014

Eugene Hecht – FÍSICA 1 Y FÍSICA 2 ÁLGEBRA Y TRIGONOMETRÍA – segunda edición – Editorial Thomson - México 2001

Fil Hunter, Steven Biver, Paul Fuqua- LA ILUMINACIÓN EN LA FOTOGRAFÍA CIENCIA Y MAGIA- Ed. Anaya- Madrid 2012

Leonardo Da Vinci- TRATADO DE LA PINTURA- traducción Rafael Galvano- Ediciones Libertador Argentina 2004

Leonardo Da Vinci- TRATADO DE LA PINTURA – Traducción por Diego Antonio Rejon De Silva-Imprenta Real Madrid 1827

Accademia di Eteletti (San Miniato, Italia) - Boletín de la Accademia di Eteletti: manchas de sol y la pintura: la correspondencia L. Cizoli-G. Galilei (1609-1613), la Accademia di Eteletti,1959, pp 52-53 (carta del 23 de marzo de 1612)

Gloria Judith Flores - DE LOS POLIEDROS A LOS POLÍGONOS USANDO HERRAMIENTAS TECNOLÓGICAS PARA POTENCIAR EL AVANCE ENTRE NIVELES DE RAZONAMIENTO GEOMÉTRICO- Universidad nacional de Colombia facultad de ciencias departamento de ciencias básicas Bogotá 2011

Paul Hills LA LUZ EN LA PINTURA DE LOS PRIMITIVOS ITALIANOS – AKAL 1995 Madrid, España

Julián Irujo Andueza – LA MATERIA SENSIBLE técnicas experimentales de pintura – Ediciones Tursen S.A./ H.Blume, 2008, Madrid, España

<sup>4</sup>Martín Kemp- LA CIENCIA DEL ARTE- editorial a AKAL, Madrid 2000

Aristotle Pierre Louis: PROBLÈMES. TOME II, SECTIONS XI À XXVII.(Collection des universités de France) Sect. XI-XXVII, Les Belles Lettres, Paris 1993.

Benoît Mandelbrot- LOS OBJETOS FRACTALES. FORMA, AZAR Y DIMENSIÓN- Editor digital: koothrapali 1984

Luis Javier Plata Rosas- UN CIENTÍFICO EN EL MUSEO DE ARTE MODERNO- Siglo XXI- Colección ciencia que ladra- Argentina 2011

Ana Villarquide LA PINTURA SOBRE TELA: HISTORIGRAFÍA, TÉCNICAS Y MATERIALES- Editorial NEREA S.A. 2004, España

Arthur Zajonc -ATRAPANDO LA LUZ: HISTORIA DE LA LUZ Y DE LA MENTE-Ed. Andres Bello Chile 1995

Ángel Ruiz Zúñiga - HISTORIA Y FILOSOFÍA DE LAS MATEMÁTICAS- EUNED 2012

## BIBLIGRAFÍA WEB

CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas:

<http://www.csic.es/presentacion>

DEPARTAMENTO DE FÍSICA Y QUÍMICA IES Leonardo da Vinci. Alicante:

<http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/fisica/fisica.htm>

<http://sdelbiombo.blogia.com/2008/110601-la-trinidad-de-masaccio.-una-obra-del-quattrocento-comentada.php>

<http://www.parro.com.ar/definicion-de-perspectiva+c%F3nica>

Findlen, Paula. Early Science Lab, Stanford University:

<https://web.stanford.edu/class/history13/earlysciencelab/body/eyespages/eye.html>

<http://cochesmk.com/tag/aurea/>

Cuaderno de cultura científica

<http://culturacientifica.com/2014/11/05/es-aureo-el-aston-martin-de-james-bond/>

Designals

<http://www.designals.net/2013/02/la-proporcion-aurea-en-las-marcas/>

Ciencia de sofá

<http://cienciadesofa.com/category/matematicas>

Total creativo

<http://totalcreativo.com/esculturas-con-sombras>

Victoria and Albert Museum de Londres

<http://www.vam.ac.uk/>

Trabajos de Jeppe Hein

<http://www.jeppehein.net/pages/works.php>

Billinge, R., Campbell, L. "Los reflectogramas infrarrojos de retrato de Juan de Jan van Eyck (?) Arnolfini y su esposa Juana Cenami (?)". National Gallery Boletín Técnico Vol 16, pp 47-60.

[http://www.nationalgallery.org.uk/technical-bulletin/billinge\\_campbell1995](http://www.nationalgallery.org.uk/technical-bulletin/billinge_campbell1995)

#### [Sociedad española de oftalmología](#)

<http://www.oftalmo.com/seo/archivos/articulo.php?idSolicitud=735&numR=9&mesR=9&anioR=2000&idR=37>

#### [Themes.com](#) fotografía de Bokeh

<http://7-themes.com/6867350-gold-bokeh-wallpaper.html>

#### [Revista científica Clinical Anatomy](#)

<http://onlinelibrary.wiley.com/enhanced/doi/10.1002/ca.22580/>

#### [Invención de la perspectiva florentina Pdf](#)

<http://sotavento.typepad.com/files/2.-invenci%C3%B3n-florentina-de-la-perspectiva.pdf>

#### [Históptica:](#)

<http://histoptica.com/>

#### [La Cámara de Vermeer:](#)

<http://www.vermeerscamera.co.uk/home.htm>

[El Toaster y Tim's Vermeer:](#)

<http://www.videodepot.com.mx/newtek/el-toaster-y-tims-vermeer/>

[Bruce Munro:](#)

<http://www.brucemunro.co.uk/installations/field-of-light/>

[Proyecto Clío:](#)

<http://clio.rediris.es/index.html>

[BBC Mundo:](#)

[http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/08/150810\\_vert\\_fut\\_vision\\_limites\\_lp](http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/08/150810_vert_fut_vision_limites_lp)

[TEORIA DE LA DIFUSION DE LA LUZ APLICADA A LAS DISPERSIONES DE FIBRAS TEXTILES:](#)

<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/6370/Article02.pdf?sequence=1>

Billinge, R., Campbell, L. "Los reflectogramas infrarrojos de retrato de Juan de Jan van Eyck (?) Arnolfini y su esposa Juana Cenami (?) ". National Gallery Boletín Técnico Vol 16, pp 47-60.

[Http://www.nationalgallery.org.uk/technical-bulletin/billinge\\_campbell1995](Http://www.nationalgallery.org.uk/technical-bulletin/billinge_campbell1995)

## TABLA DE ILUSTRACIONES

fig. 1 Galileo Galilei (1564-1642) .....	7
Pintura realizada por J.Sustermans (1636).....	7
fig. 2 Ludovico Cigoli (1559-1613) .....	7
Pintura realizada por su discípulo .....	7
Sigismondo Coccapani .....	7
fig. 3 Galileo .....	8
Acuarela de la Luna en el manuscrito de SIDEREUS NUNCIUS 1609.....	8
fig. 4 Grabado, La superficie de la luna, de SIDERUS NUNCIUS de.....	9
Galileo Galilei, 1610.....	9
fig. 5 Ludovico Cigoli .....	10
Detalle de la cúpula dela Iglesia de Santa María Maggiore .....	10
fig. 6 Acuarela del manuscrito de Galileo .....	10
Luna identificada con el número 1 en el manuscrito (fig.3 rotada 90º) .....	10
fig. 7 Manchas Solares de Galileo .....	12
6 de junio de 1613 Fuente.....	12
fig. 8 Análisis perspectivo de las Manchas Solares, Galileo.....	13
fig. 9 Impresión, Sol Naciente, 1872 .....	14
Museo Marmottan Monet, París.....	14
Obra que le dio nombre al impresionismo.....	14
fig. 10 Euclides .....	16
Detalle dela obra ESCUELA DE ATENAS.....	16
Pintura de Rafael Sanzio .....	16
fig. 11 Ejemplo de línea de Tiempo interactiva al a que puedes acceder en el siguiente link .....	17
Video 1.....	17
fig. 11 Cuerda vibrante de Pitágoras .....	20
fig. 12 Divisiones sencillas del plano utilizadas por algunos artistas.....	21
fig. 13 Botticelli .....	21
EL NACIMIENTO DE VENUS.....	21
fig. 14 Hombre en la taberna" .....	22
Rafael Barradas 1922.....	22

Óleo sobre tela, 1.06 x 0.825 m.....	22
fig. 15 El Molinero Aragonès.....	22
Rafael Barradas 1924.....	22
Òleo sobre tela .....	22
fig. 16 La Guerra.....	23
(Detalle de LA GUERRA Y LA PAZ).....	23
Pablo Picasso 1952 .....	23
fig. 17 Pentágono Estrellado o Pentagrama .....	24
Símbolo de los Pitagóricos.....	24
Video 2 Relación Áurea. Selección de .....	25
DONALD EN LA TIERRA DE LA MATEMÁTICA. ....	25
fig. 18.....	25
fig. 19 Dodecaedro.....	27
fig. 20 Construcción de un Rectángulo Áureo .....	28
fig. 21 ...Tabla 1 .....	29
Pite Mondrian 1926.....	29
Óleo sobre tela .....	29
fig. 22 Esquema de composición de Tabla 1 de Mondrian.....	29
fig. 23 Boceto realizado por Salvador Dalí para su obra LEDA ATÓMICA.....	30
fig. 24 Leda Atómica, Salvador Dalí .....	31
fig. 25 Triángulo de Kepler .....	32
fig. 26 El Triángulo de Kepler en la gran Pirámide de Guiza.....	33
Video 3 Selección de The Miracle of 528Hz .....	34
Solfeggio and Fibonacci Numbers .....	34
YouTube- Bruine Dewer 2012.....	34
fig. 27 Caparazón de Nautilus.....	34
fig. 28 corte de Nautilus .....	34
fig. 29 Tornado.....	35
fig. 30 Relación áurea en lanaturaleza .....	35
fig. 31 $\phi$ en la naturaleza .....	36
fig. 32 Pentáculo .....	36

fig. 33	Gran Pirámide de Keops .....	37
fig. 34	El Partenón.....	38
fig. 35	Torre Eiffel.....	38
fig. 36	Aston Martin .....	39
fig. 37	Vipper.....	40
fig. 38	Insignia Honda.....	41
fig. 39	Insignia Toyota .....	41
fig. 40	linsignia Mercedes Benz .....	42
fig. 41	Insignia de Porsche .....	42
fig. 42	Logotipo de Pepsi FUENTE .....	43
fig. 43	Logotipo Apple,.....	44
	Intervención del esquema en la pág. Ar 3d.....	44
fig. 44	Logotipo National Geographic FUENTE .....	45
fig. 45	Logotipo Twitter, intervención del esquema del Ar 3D.....	46
fig. 46.	La Creación de Adán, fresco (1508-1512).....	47
	Miguel Ángel Buonarroti. ....	47
fig. 47	El techo de la Capilla Sixtina (1508-1512). ....	47
	Miguel Ángel Buonarroti. ....	47
	.....	48
fig. 48	Biblia de Carlos el Calvo.....	48
	"El Rey y su corte" .....	48
fig. 49	Biblia de Carlos Calvo.....	49
	"EL REY Y SU CORTE" .....	49
fig. 50	"APROBACIÓN DE LA ORDEN FRANCISCANA" .....	50
	Giotto 1290-1300.....	50
fig. 51	Detalle intervenido de la obra "Aprobación de la orden Franciscana" .....	50
	Giotto 1290-1300 .....	50
fig. 52	Forma de obtener arabescos utilizando el compás.....	51
fig. 53	" La Trinidad " Masaccio.....	52
fig. 54	Equilibrio estable e inestable .....	53
fig. 55	ICOSAEDRO REGULAR y los otros cuerpos platónicos FUENTE .....	54

fig. 56	Dibujos de Leonardo Da Vinci .....	56
fig. 57	Grabado del Libro "Perspectiva Corporum Regularium" .....	57
	(1568) Wentzel Jamnitzer.....	57
fig. 58	Grabado del Libro "Perspectiva Corporum Regularium" .....	58
	(1568) Wentzel Jamnitzer.....	58
fig. 59	Representación del modelo de sistema solar de Kepler .....	59
fig. 60	"ESTRELLAS" Xilografía (1942) M.C. Escher .....	60
fig. 61	Sueño de San Gregorio Giotto .....	61
fig. 62	"PROFUNDIDAD" .....	64
	Grabado en Madera .....	64
	Etcher 1955.....	64
fig. 63	Detalle de obra.....	65
Video 4	Fractales.....	66
	"A la Caza de la Dimensión Oculta" .....	66
fig. 64	Romanesco o Coliflor Románica.....	67
fig. 65	Montañas del Himalaya .....	68
	Foto: Earth Observatorio de la Nasa .....	68
fig. 66	INTREPID 1 .....	69
	Arte fractal Yvonne Mous.....	69
fig. 67	"FLEXIBLE" Light Ska Iktomi .....	69
	Concurso Arte Fractal Benoit Mandelbrot 2011- .....	69
fig. 68	Imagen fractal, Star Nurseries .....	70
fig. 69	Conjunto de Cantor.....	70
fig. 70	Curva de Koch .....	71
fig. 71	.....	72
fig. 72	Árbol Pitagórico (fuente) .....	72
fig. 73	Creación del Árbol de Pitágoras.....	73
fig. 74	Árbol de Pitágoras .....	73
Video 5	UNIVERSO FRACTAL de Lisandro Sabio año 2013 .....	75
Video 6	Como en un Sueño Viaje 3D Fractal .....	75
fig. 75	Cámara oscura utilizada por el pintor Canaletto.....	80

Video 7 • Kendell Geers - Piezas colgantes .....	81
fig. 76 .....	82
fig. 77 .....	82
fig. 78 .....	83
fig. 79 LA DONCELLA CORINTIA, .....	85
Joseph Wright 1782-1784.....	85
fig. 80 Esquema del método de Cennino Cennini .....	86
para modelar las formas con sombra.....	86
fig. 81 DÍPTICO DE LA ANUNCIACIÓN .....	88
Jan van Eyck.....	88
Óleo sobre tabla 1433-1435 .....	88
fig. 82 VOCACIÓN DE SAN MATEO .....	89
Caravaggio .....	89
fig. 83 Umbra y penumbra.....	90
fig. 84 Ampliaciones de umbra y penumbra .....	91
fig. 85 Intervención de LA VOCACIÓN DE SAN MATEO.....	92
fig. 86 LA VOCACIÓN DE SAN MATEO, Caravaggio.....	92
fig. 87 EL JOVEN DIDUJANTE 1.....	93
fig. 88 EL JOVEN DIBUJANTE 2 .....	93
fig. 89 El Joven Dibujante .....	94
fig. 90 El Joven Dibujante 2.....	95
fig. 91 Detalle versión 1 .....	96
fig. 92 Detalle versión 2º .....	96
fig. 93 Detalle de la versión 1 .....	97
fig. 94 Detalle de la versión 2 .....	97
fig. 95 Detalle de la versión 1 .....	98
fig. 96 Detalle de la versión 2 .....	99
fig. 97 CAMPESINA COSIENDO .....	99
Vincent Van Gogh.....	99
fig. 98 EL CRISTO DE SAN JUAN DE LA CRUZ, .....	101
Salvador Dalí.....	101

fig. 99 Detalle de EL CRISTO DE SAN JUAN DE LA CRUZ .....	102
Salvador Dalí .....	102
fig. 100 .....	102
fig. 101 .....	102
Video 8.....	103
fig. 102 LA MADONNA DE PORT LLIGAT .....	104
fig. 103 Detalle de la obra: LA MADONNA DE PORT LLIGAT .....	105
Salvador Dalí .....	105
fig. 104 Perseo y Andrómeda .....	106
fresco, año 10 y 1 a. C.....	106
fig. 105 Detalle de Perseo y Andrómeda, .....	107
fresco, año 10 y 1 a. C.....	107
fig. 106 Detalle de Perseo y Andrómeda .....	107
fresco, año 10 y 1 a. C.....	107
fig. 107 AUTORRETRATO BLANDO CON BACÓN FRITO .....	108
fig. 108 Intervención de la obra.....	109
AUTORRETRATO BLANDO CON BACÓN FRITO .....	109
fig. 109 .....	110
fig. 111 .....	111
fig. 110 .....	111
fig. 112 .....	112
fig. 113 .....	113
fig. 114 escultura de Edward Krasinski .....	113
fig. 115 escultura de Edward Krasinski .....	113
fig. 116 Lanza, (1963-1964). Edward Krasinski .....	114
fig. 117 Edward Krasinski.....	115
fig. 118 .....	116
fig. 119 .....	116
fig. 120 .....	116
fig. 121 Escultuta de Tim Noble y Sue Webster .....	117
fig. 122 Escultuta de Tim Noble y Sue Webster .....	118

fig. 123 Variación del tamaño de la sombra.....	120
al modificar la posición del objeto. ....	120
Video 9 Grupo de teatro Shadow .....	121
fig. 124 Esquema de cámara oscura .....	122
fig. 125 Intensidad en relación a la distancia desde la fuente. ....	123
fig. 126 Imágenes del sol durante un eclipse solar a través de las hojas de un árbol. ....	125
03 de octubre 2005, .....	125
San Juliens, Malta. Fuente .....	125
fig. 127 “Ojos de sol” circulares a través de las hojas de los árboles.....	126
fig. 128 Dibujo del ojo de Leonardo da Vinci.....	128
fig. 129 Esquema de cámara oscura - ojo de Leonardo Da Vinci .....	128
fig. 130 Representación de Cámara oscura .....	129
fig. 131 esquema del dibujo de Leonardo da Vinci en Tratado de la pintura .....	130
fig. 132 Grabado analizando el eclipse solar de 1544 .....	131
fig. 133 Cámara oscura .....	132
fig. 134 cámara oscura con espejo, 45º y pantalla cóncava.....	133
fig. 135 Linterna mágica .....	137
fig. 136 Cámara de Johann Zahn .....	138
fig. 137 Esquema de cámara oscura con lente y espejo plano a 45º.....	138
fig. 138 Cámara oscura en Torre Tavira de Cádiz Fuente .....	139
fig. 139 Imagen en la pantalla cóncava de la cámara oscura de torre Tavira. Fuente .....	140
Video 10 Cámara Oscura de Cádiz.....	140
fig. 140 Piel humana .....	142
fig. 141 Papel visto con microscopio electrónico .....	142
fig. 142 Esquema de superficie donde se produce reflexión difusa.....	143
fig. 143 Esquema según Leonardo da Vinci .....	144
fig. 144 CATHARINA HOOFT CON SU NIÑERA .....	145
Frans Hals.....	145
fig. 145 reflexión difusa en obra de Frans Hals .....	146
fig. 146 detalle de la obra de Jan van Eyck: El matrimonio Arnolfini .....	147
fig. 147 reflexión difusa en obra de Jan van Eyck.....	148

fig. 148 reflexión difusa en obra de Jan van Eyck.....	149
fig. 149 Iluminando con Reflexión difusa .....	150
fig. 150 Reflexión difusa .....	151
fig. 151 SEGURIDAD EN LA ESPERANZA, Isabel Guerra. ....	152
Video 11 Reflexión difusa en obras pictóricas.....	153
fig. 152 Baptisterio de San Juan .....	154
fig. 153 Experimento de Brunelleschi .....	155
fig. 154 Experimento de Brunelleschi Fuente de imagen .....	156
fig. 155 Esquema de la Hipótesis de L. Cabezas Gelabert y J. C. OliverTorelló .....	157
fig. 156 Dispositivo de Brunelleschi según la Hipótesis de L. Cabezas Gelabert y J. C. OliverTorelló .....	158
Video 12 .....	159
fig. 157 1518-19 Fresco LOGGIA Palacio del Vaticano- Rafael. ....	160
fig. 158 .....	161
fig. 159 Maqueta del método de Giulio Romano	fig. 160 Ampliación de la foto de la
figura 159	162
invertida verticalmente .....	162
fig. 161 Maqueta del método de Giulio Romano .....	162
fig. 162 Caída de los gigantes Fresco de Giulio Romano .....	163
fig. 163 Veronés, fresco en el techo de la sala del Olimpo .....	164
Villa Barbaro, Italia .....	164
fig. 164 LA SABIDURÍA.....	164
Tiziano.....	164
fig. 165 Espejo de Claude. 1775-1780 .....	165
The Victoria & Albert Museum, Londres .....	165
fig. 166 Experimentación con el Espejo de Claude, fotografía de Tintern Abbey.....	166
fig. 167 PAISAJE CON SAN ONOFRE, Claudio de Lorena.....	167
fig. 168 Thomas Gainsborough, “ARTISTA CON EL ESPEJO DE CLAUDE” .....	168
fig. 169 EL MATRIMONIO ARNOLFINI,.....	169
JAN van Eyck .....	169
fig. 170 Detalle de EL MATRIMONIO ARNOLFINI, .....	170
Jan van Eyck.....	170

fig. 171 “AUTORRETRATO EN UN ESPEJO CONVEXO”, 1524.....	171
Parmigianino.....	171
fig. 172 SAN BAVÓN, HAARLEM, Tinta china.....	172
Escher 1920 .....	172
fig. 173 Grabado, AUTORRETRATO SENTADO,.....	173
Escher. ....	173
fig. 174 ONDULACIONES EN EL AGUA, .....	174
Escher .....	174
fig. 175 Litografía, TRES MUNDOS,.....	175
Escher 1955. ....	175
fig. 176 Esquema de reflexión en TRES MUNDOS.....	176
fig. 177 Litografía NATURALEZA MUERTA CON ESPEJO, .....	177
Escher, 1934 .....	177
fig. 178 Litografía, MANO CON ESFERA REFLEJANTE, .....	178
Escher, 1935. ....	178
fig. 179 Esquema de reflexión especular en esfera.....	179
fig. 180 Litografía, NATURALEZA MUERTA CON ESFERA REFLEJANTE, .....	180
Escher 1934,.....	180
fig. 181 Media tinta, OJO, .....	181
Escher 1946 .....	181
fig. 182 Litografía, EL ESPEJO MÁGICO .....	182
Escher 1946 .....	182
Bruno Ernst.....	183
fig. 183 Jeppe Hein proyecto Sígueme, Bristol.....	183
fig. 184 Proyecto SÍGUEME, BRISTOL, .....	184
Jeppe Hein .....	184
fig. 185 Proyecto SÍGUEME, BRISTOL .....	184
Jeppe Hein .....	185
Video 13 Reflexión en Art Park.....	185
Ordrupgaard .....	185
fig. 186 EL GRAN ÁRBOL Y EL OJO, .....	186

Anish Kapoor.....	186
fig. 187 "PONIENDO EL MUNDO AL REVÉS, JERUSALÉN",.....	187
Anish Kapoor.....	187
fig. 188 PUERTA A LAS NUBES, .....	188
Anish Kapoor.....	188
fig. 189, PUERTA A LAS NUBES, .....	188
Anish Kapoor.....	188
Video 14 PUERTA A LAS NUBES.....	189
Anish Kapoor .....	189
fig. 190 RESPIRAR-UNA MUJER ESPEJO .....	190
Kimsooja .....	190
fig. 191 RESPIRAR-UNA MUJER ESPEJO, .....	191
Kimsooja .....	191
fig. 192 RESPIRAR-UNA MUJER ESPEJO, .....	192
Kimsooja .....	192
fig. 193 detalle de EL MATRIMONIO ARNOLFINI de Jan van Eyck	fig. 194 detalles de EL MATRIMONIO ARNOLFINI .....
MATRIMONIO ARNOLFINI .....	193
fig. 195 Fotografía de una bolita de vidrio transparente	fig. 196 Detalle del MATRIMONIO ARNOLFINI .....
MATRIMONIO ARNOLFINI	194
fig. 197 Detalle de la fotografía de la figura 195 donde se numeraron las zonas de luz .....	195
fig. 198 foto de una bolita de vidrio, imagen virtual e imagen real de una ventana.	196
fig. 199 Intervención de un detalle de EL MATRIMONIO ARNOLFINI .....	197
Jan van Eyck.....	198
fig. 200 Intervención de un detalle de EL MATRIMONIO ARNOLFINI .....	198
Jan van Eyck.....	198
fig. 201 Esquema del vitral y ventana .....	199
fig. 202 Modelo dela obra EL MATRIMONIO ARNOLFINI .....	200
fig. 203, LA VIRGEN DEL CANÓNIGO VAN DER PAELE , .....	201
Jan van Eyck 1436.....	201
fig. 204, Fresco EL CARDENAL UGO DI PROVENZA.....	202
Tommaso da Modena 1352.....	202

fig. 205 Fotografía con círculos de confusión, en fotografía se les llama bokeh .....	203
fig. 206 Fotografía con círculos de confusión o bokeh.....	203
Beatriz de Mattos .....	203
fig. 207 Fotografía con bokeh no circulares .....	204
fig. 208 Fotografía: Gotas en un pétalo de flor .....	204
fig. 209 detalle de Virgen del canónigo Van der Paele Jan van Eyck .....	205
fig. 210 detalle de Virgen del canónigo Van der Paele Jan van Eyck .....	205
fig. 211 Detalle de “Adoración del cordero” de J. van Eyck - Macrofotografía .....	206
fig. 212 Parte de la colección de fotos de cuadros de D. Hockney ver imagen ampliada .....	207
fig. 213 Cambio en la representación que se produjo en el siglo XV .....	207
Video 15 Aumento del naturalismo Link a video completo .....	208
Video 16 Porqué de varios puntos de fuga link a video completo.....	209
Video 17 Todo enfocado-Link a video completo.....	210
fig. 214 Detalle del cuadro EL MATRIMONIO ARNOLFINI .....	211
Video 18 Tratamiento de superficies brillantes Link a video completo .....	212
Video 19 Video Tamaño de as obras, selección de video de D. Hockney- Link a video completo.....	213
fig. 215 Fuente.....	214
fig. 216 Vista de Delft, de Johannes Vermeer .....	215
fig. 217 EL OFICIAL Y LA MUCHACHA RIENDO .....	217
Vermeer.....	217
fig. 218 LA VIRGEN Y EL NIÑO CON SANTA ANA .....	218
Leonardo Da Vinci.....	218
fig. 219 LA TRANSFIGURACIÓN.....	219
Rafael .....	219
fig. 220 SANTO TOMÁS DE VILLANUEVA .....	220
Murillo 1668 .....	220
fig. 221 LA LECHERA.....	221
Vermeer.....	221
fig. 222 Detalle de La Lechera de Vermeer donde se ve la zona que se amplía .....	221

fig. 223 Detalle de la obra La Lechera de Vermeer donde se aprecia el tratamiento de los brillos .....	222
fig. 224 Detalle de La encajera de Vermeer .....	223
fig. 225 Plano del estudio de Vermeer por Philip Steadman Fuente .....	224
fig. 226 Ejemplo de cámara oscura en el estudio de Vermeer Fuente .....	225
fig. 227 Foto del sistema de lente y espejos utilizado en el proyecto Tim'Vremeer ...	226
fig. 228 Foto del sistema de lente y espejos utilizado en el proyecto Tim'Vremeer ..	227
fig. 229 Foto de la duplicación de LA LECCIÓN DE MÚSICA .....	227
proyecto Tim'Vremeer.....	227
fig. 230 Estudio de reflexión y refracción de Turner .....	229
fig. 231 JMW Turner EL ÚLTIMO VIAJE DEL TEMERARIO REMOLCADO A AMARRE PARA SU DESGUACE, 1839. Óleo sobre lienzo, 90,7 × 121,6 cm. National Gallera de Londres. ....	229
fig. 232 CASTILLO DE FLINT acuarela sobre papel .....	231
JMW Turner, 1838.....	231
fig. 233 BARCO A VAPOR EN LA BOCA DE UN PUERTO EN LA TORMENTA DE LA NIEVE .....	232
JMW Turner, 1842.....	232
fig. 234 LLUVIA, VAPOR Y VELOCIDAD .....	233
JMW Turner 1844 .....	233
fig. 235 Grabado COMPENETRACIÓN DE DOS MUNDOS .....	234
Escher .....	234
fig. 236 Fotografía de una bolita de vidrio .....	235
fig. 237 Fotografía de una bolita de vidrio 2 .....	236
fig. 238 GOTAS DE ROCÍO .....	236
Escher .....	237
fig. 239 Detalle de GOTAS DE ROCÍO .....	237
Escher .....	237
fig. 240 Detalle de la obra EVOLUCIÓN DE UN HÍBRIDO .....	238
Koen Vanmechelen.....	238
fig. 241 Detalle de la obra EVOLUCIÓN DE UN HÍBRIDO .....	239
Koen Vanmechelen.....	239
fig. 242, BOTELLA PERFECTA,.....	240

Luca Pancrazzi 2007.....	240
fig. 243 MASERATIRUNDUM .....	241
Luca Pancrazzi.....	241
fig. 244 IGLESIA ARCO IRIS museo de arte contemporáneo Tokio.....	241
Tokujin Yoshioka FUENTE .....	241
fig. 245 IGLESIA ARCO IRIS museo de arte contemporáneo Tokio.....	242
Tokujin Yoshioka FUENTE .....	242
fig. 246 dispersión de la luz al pasar a través de un prisma .....	243
fig. 247 RAYO DE LUZ.....	244
Tokujin Yoshioka FUENTE .....	244
fig. 248 Detalle de RAYO DE LUZ, Tokujin Yoshioka FUENTE .....	245
fig. 249 Reflexión total interna .....	246
Tabla 1 .....	247
fig. 250 Esquema de fibra óptica .....	247
fig. 251 Fibras ópticas .....	248
fig. 252 EL CAMPO DE LA LUZ, Longwood Gardens, USA .....	249
Bruce Munro 2012 FUENTE .....	249
fig. 253 EL CAMPO DE LA LUZ Cheekwood Gardens, EE.UU., .....	249
Bruce Munro 2013 FUENTE .....	249
fig. 254 ERIZOS DE FAGIN, instalación .....	250
Bruce Munro.....	250
Video 20 Montaje de la instalación "Campo de luz" de Bruce Munro.....	251
Video 21 Instalación Campo de luz de Bruce Munro. ....	251
fig. 255 Foto de la piscina de estancia Vik en José Ignacio, Uruguay.....	252
Video 22 Fuente de la plaza Colón de Tacuarembó Video de Beatriz de Mattos.....	253
fig. 256 Esquema de la trayectoria de los rayos de luz en el diamante tallado .....	254
fig. 257 Piedras en bruto .....	255
fig. 258 piedras después del tallado .....	255
fig. 259 LA ADORACIÓN DEL NOMBRE DE DIOS fresco de Francisco de Goya.....	257
fig. 260 CASA Y FIGURA ENTRE LOS ÁRBOLES .....	259
Pierre Auguste RENOIR.....	259

fig. 261 Dispersión de Rayleigh.....	261
fig. 262 Luz que atraviesa la atmósfera.....	262
fig. 263 CASAS EN CAGNES .....	263
Pierre Auguste Renoir.....	263
fig. 264 EL JOVEN MENDIGO, .....	264
Bartolomé Esteban Murillo .....	264
fig. 265 SEÑORITA MARIE-THERESE DURAND-RUEL COSIENDO .....	265
Pierre Auguste Renoir.....	265
fig. 266 LA SAGRADA FAMILIA DEL PAJARITO Bartolomé Esteban Murillo.....	266
fig. 267 LA ADORACIÓN DE LOS PASTORES Bartolomé Esteban Murillo .....	267
Tabla 2 .....	269
fig. 268 HÉRCULES EN LA CORTE DE ONFALIA antes de la restauración.....	273
Hans Cranach.....	273
fig. 269 HÉRCULES EN LA CORTE DE ONFALIA después de restaurado.....	273
Hans Cranach.....	273
fig. 270 Baco y Ariadna .....	274
Tiziano (1519-1523) .....	274
fig. 271 Imagen de sección transversal del fondo en la obra.....	275
HÉRCULES EN LA CORTEDE ONFALIA de Hans Cranach FUENTE.....	275
fig. 272 Imagen de sección transversal del vestido rojo en la obra .....	276
HÉRCULES EN LA CORTEDE ONFALIA de Hans Cranach FUENTE Ampliar imagen ....	276
fig. 273 Esquema de veladura roja .....	277
fig. 274 veladura amarilla sobre fondo azul .....	278
fig. 275 Fondo amarillo y veladura azul.....	279
fig. 276 Espectro electromagnético FUENTE .....	282
AMPLIAR .....	282
Video 23 Percepción del color .....	284
Tabla 3 RELACIÓN DE LONGITUDES DE ONDA CON EL MATIZ PERCIBIDO.....	285
Los valores son aproximados y dependen de cada persona.....	285
fig. 277 Diferencia de matices .....	285
fig. 278 Círculo cromático.....	286

fig. 279 Sensibilidad relativa de conos sensibles al rojo, verde y azul .....	287
fig. 280 Mezcla de colores saturados con gris.....	288
fig. 281 Variación de saturación .....	288
fig. 282 EL ESCOLAR Vicente Van Gogh	289
fig. 283 DOS GIRASOLES Vicente Van Gogh	289
fig. 284 Madame Matisse (fauvismo) .....	289
HENRI MATISSE.....	289
fig. 285 variación de valor .....	290
fig. 286 Valores crecientes .....	290
fig. 287 Diferencia de matiz, igual valor. ....	291
fig. 288 Azul y amarillo saturados.....	291
fig. 289 LA COSECHA EN LA CRAU, CON MONTMAIOUR EN SEGUNDO PLANO .....	292
Vincent Van Gogh .....	292
fig. 290 PAJARES EN GIVERNY 1.....	293
Claude Monet .....	293
fig. 291 DE COMPRA CON RED Y EL BUEY BLANCO .....	293
Vincent van Gogh .....	293
fig. 292 LA ROMERÍA DE SAN ISIDRO 1820-1823 .....	294
Francisco de Goya.....	294
fig. 293 Mezcla de pigmentos Amarillo y azul.....	295
fig. 294 Mezcla de pigmentos.....	296
fig. 295 Percepción de los colores según teoría tricromática .....	297
fig. 296 Teoría tricromática. ....	298
Veladura cian sobre fondo amarillo .....	298
fig. 297 Copa de cristal	299
fig. 298 Cristal molido FUENTE .....	299
fig. 299 Sustancia blanca formada por partículas transparentes.....	300
fig. 300 Mezcla opaca. Fibras transparentes $n_1$ muy distinto a $n_2$ .....	302
fig. 301 Fibras transparentes $n_1$ próximo a $n_2$ .....	303
fig. 302 Transparencia del papel manteca .....	304
Video 24 cambio en el índice de refracción del medio. ....	305
fig. 303 Mezcla transparente, $n_1 = n_2$ .....	306
Video 25 Transformación de blanco en transparente.....	307

Video 26 Bolotas invisibles-Índice de refracción FUENTE .....	307
fig. 304 Piel de oso polar .....	308
fig. 305 Ampliación de un pelo de oso polar FUENTE .....	309
fig. 306 Mezcla de luz (ADITIVA).....	310
fig. 307 Mezcla aditiva de color.....	310
fig. 308 Ballet, pintando con luz .....	311
fig. 309 Sombras de colores .....	312
fig. 310 Esquema para la obtención de sombras de colores.....	313
Video 27 SOMBRAS DE COLORES .....	314
fig. 311 Pantalla de celular .....	314
con agua pulverizada.....	314
fig. 312 Ampliación de pantalla de celular .....	315
con tres gotas de agua que actúan como lentes.....	315
fig. 313 Estructura de diferentes pantallas .....	316
fig. 314 FUENTE .....	317
fig. 316 Cubo RGB.....	318
fig. 317 Rojo (255, 0, 0), verde (0, 255,0), azul (0,0, 255). Editor de color del Paint .	319
fig. 318 amarillo (255, 255, 0), cian (0, 255,255), magenta (255, 0, 255). Editor de color del Paint.....	320
fig. 319 Escala de grises en la diagonal que une negro y blanco FUENTE.....	320
fig. 320 color RGB (60, 90, 200).....	321
fig. 321 RGB (102, 140, 166) FUENTE .....	322
fig. 322 Parte del espectro electromagnético .....	326
Tabla 4 .....	327
fig. 323 Mosaico de rayos X.....	328
Retrato de Phillips Lucasz .....	328
fig. 324 Rembrandt.....	328
Retrato de Phillips Lucasz .....	328
fig. 325 LA HABITACIÓN AZUL de Pablo Picasso.....	329
fig. 326 Estudio con rayos X de la habitación azul de Pablo Picasso.....	330
fig. 327 Viejo guitarrista- Pablo Picasso .....	331
fig. 328 RX Viejo guitarrista- Pablo Picasso .....	331

fig. 329 EL HOMBRE DEL YELMO DORADO ¿¿¿¿Rembrandt????..... 333

fig. 330 Reflectografía ultravioleta dela obra HÉRCULES EN LA CORTE DE ONFALIA de Hans Cranach FUENTE ..... 334

fig. 331 Fotografía infrarroja de la obra de Hans Cranach: HÉRCULES EN LA CORTE DE ONFALIA..... 335

fig. 332 RX Hércules en la corte de Onfalia de Hans Cranach ..... 336

fig. 333 Reflectograma infrarrojo compuesto de EL MATRIMONIO ARNOLFINI..... 337

Jan van Eyck (detalle) FUENTE ..... 337

..... 338

La Gioconda (copia) antes de la restauración ..... 338

La Gioconda (copia) después de la restauración..... 338

fig. 334 Gioconda (copia) Antes y después ..... 338

fig. 335 Detalle de La Gioconda (copia) junto a La Gioconda (©Elsa Lambert, C2RMF) ..... 339

..... 339

fig. 336 Reflectografía infrarroja de La Gioconda (copia) ..... 340

fig. 337 Radiografía de La Gioconda (copia)..... 341