

MODELO TRICROMÁTICO DE LA COMPOSICIÓN DE LA LUZ, NO SÓLO DEL COLOR

TRICHROMATIC MODEL OF LIGHT COMPOSITION, NOT ONLY OF COLOR

Daniel Magaña V.¹

black_dmv@hotmail.com

Recibido: febrero, 08 2017/ Aceptado: febrero, 09 2017 / Publicado: junio, 29 2018.

Resumen

La luz es la porción de radiación electromagnética que es percibida por el ojo humano. Aunque el espectro de luz se reconoce como una transición gradual de colores determinados por la longitud de onda (espectro continuo), tradicionalmente se conoce compuesto por los siete colores del arcoíris: rojo, naranja, amarillo, verde, cian, azul (índigo) y violeta; la luz blanca se considera la combinación de todas las frecuencias del espectro visible. Debido a las características inherentes al ojo humano, es decir su fisiología y la teoría tricromática, todos los colores que pueden ser reconocidos en una imagen, son combinación de los llamados colores primarios, rojo R (*Red*), verde G (*Green*) y azul B (*Blue*). En el sentido práctico el modelo tricromático RGB (*Red, Green, Blue*) es consistente sobre la composición del color, porque los colores primarios no pueden obtenerse de la mezcla de otros. El presente trabajo pretende aplicar el modelo tricromático a la composición de la luz. Para la demostración práctica se realizaron los experimentos de Herschel, Ritter y Lenard con algunas modificaciones. Se identificaron tres efectos en la luz blanca, los tres con un pico de mayor intensidad asociado a un solo color del espectro. La luz roja se asoció al efecto fotoeléctrico. La luz verde se asoció al efecto calórico. La luz azul se asoció al efecto fotoquímico. Estos tres colores podrían ser los únicos componentes de la luz blanca.

Palabras clave: luz, color, efecto calórico, efecto fotoquímico, efecto fotoeléctrico.

Abstract

Light is the portion of the electromagnetic radiation that is perceived by human eye. The light spectrum is known as a gradual transition of colors determined by wavelength (continuous spectrum), but traditionally compounded by the seven colors of the rainbow: red, orange, yellow, green, cyan, blue (indigo) and violet; white light is considered a mixture of all the frequencies of the visible spectrum. Due to inherent characteristics of human eye, its physiology and the trichromatic theory, all the colors that can be recognized in an image, are the combination of the so-called primary colors, R (Red), G (Green) and B (Blue). At practical issues the trichromatic model RGB (Red, Green, Blue) is consistent about color composition, because the primary colors can't be made mixing other colors. This work aims to apply the trichromatic model to light composition. For practical demonstration, Herschel, Ritter and Lenard's experiments were performed with some modifications. Three effects were identified in white light, each one with a peak of maximum intensity associated to one single color from the spectrum. Red light was associated to photoelectric effect. Green light was associated to caloric effect. Blue light was associated to photochemical effect. These three colors may be the only components in white light.

Key words: light, color, caloric effect, photochemical effect, photoelectric effect.

1. Introducción

Entender la luz no ha sido sencillo, el conocimiento que tenemos sobre ella se ha obtenido con mucho tiempo y mucho esfuerzo, aún sigue siendo motivo de fascinación y algunos aspectos permanecen sin explicación. Además su percepción está condicionada por parámetros físicos, psicofísicos y psicológicos, por lo que depende fundamentalmente de la fuente de luz, de la geometría de medición, de la naturaleza del sustrato y del observador.



1.1 Algunos datos históricos

En 1704 Isaac Newton publicó su teoría sobre la composición de la luz, consideró siete colores que combinados forman la luz blanca, los mismos siete colores que vemos en el arcoíris: rojo, naranja, amarillo, verde, cian, azul (índigo) y violeta. Comprobó que estos colores no eran descomponibles en otros, es decir son simples. Lo descubrió mediante el fenómeno de dispersión de la luz blanca, separándola al hacerla pasar a través de un prisma de cristal y visualizando el espectro luminoso. Consideró la luz como corpúsculos [1], se basó en la ley de Snell para definir que los colores se separan en el prisma por un cambio en su velocidad al pasar de un medio transparente a otro [2].

En 1766 Moses Harris diseña un círculo cromático que incluye dieciocho tonalidades fundamentales, representa tres colores primarios y quince secundarios [3]. Aunque consideró como colores primarios el rojo, el azul y el amarillo se ubica entre los comienzos de la sistematización del color.

En 1800 William Herschel utilizó termómetros de mercurio para detectar el calor contenido en la luz, la separó mediante un prisma en su espectro, encontró mayor calor en el extremo rojo, muy poco efecto en el violeta, además describió radiación no visible más allá del rojo, lo que llamó rayos calóricos (hoy en día conocida como radiación infrarroja) [4].

En 1801 Johann Ritter utilizó papel bañado en cloruro de plata (AgCl) para evaluar el efecto de oxidación favorecido por la luz (efecto fotoquímico), también separó la luz en su espectro mediante un prisma, registró oxidación en el extremo violeta, sin efecto en el rojo, además describió radiación no visible más allá del violeta, lo llamó rayos oxidantes (radiación ultravioleta o UV) [5].

En 1802 Thomas Young hizo pasar luz a través de dos ranuras, y al observar un patrón de interferencia se convenció de la propiedad ondulatoria de la luz [6]. En el mismo año postula la teoría tricromática sobre la visión, desarrollada posteriormente por Hermann Von Helmholtz, y define que el ojo humano solo necesita de tres colores: rojo, verde y azul, para interpretar toda la gama de colores [7].

En 1853 Herman Grassmann publica las leyes de la colorimetría, refiere que por síntesis aditiva del color es posible conseguir todos los colores percibidos, basta con mezclar tres franjas del espectro en la proporción adecuada; indica que en la suma de dos colores cualesquiera, el color resultante podría haberse obtenido también sumando los primarios de cada uno de los colores de origen [8].

En 1865 James Clerk Maxwell evidenció que la luz y la electricidad viajan a la misma velocidad, con lo que las asoció en una sola y concluyó que la luz es una onda electromagnética [9].

En 1887 Heinrich Rudolf Hertz descubrió que una descarga eléctrica entre dos electrodos ocurría más fácilmente cuando radiación ultravioleta incidía sobre uno de ellos [10].

En 1902 Phillip Lenard utilizó un circuito conectado a una placa de metal en un tubo al vacío y lo expuso a luz de diferentes colores, describió el efecto fotoeléctrico y descubrió que la intensidad del efecto depende del color de la luz incidente, con el mayor efecto en el ultravioleta, el menor en el infrarrojo [11].

En 1905 Albert Einstein interpretó los resultados de Lenard y afirmó que la luz se comporta como partícula, describió los “paquetes de energía” que ahora conocemos como fotones pero en el mismo artículo admitió ser partidario de la teoría ondulatoria [12].



En 1924 Louis-Victor de Broglie, introdujo el concepto de dualidad, al descubrir que la luz puede comportarse como onda o como partícula [13], uno de los pilares de la física cuántica [14].

En 1925 Richard P. Feynman propuso la electrodinámica cuántica, encargada de estudiar la interacción de las radiaciones electromagnéticas con la materia, incluido el estudio de la luz. Considera que la luz es la porción de radiación electromagnética que es percibida por el ojo humano, refiere que cada color es definido por una longitud de onda específica y su interacción con los receptores oculares, reconoce el espectro de luz como una transición gradual de colores determinados por la longitud de onda, aunque tradicionalmente se considera compuesto por los siete colores de Newton. Propone que existen combinaciones de frecuencias que forman los colores que no se encuentran en el espectro de luz como el rosa o el marrón, así como describe que la luz blanca es la combinación de todas las frecuencias del espectro visible [15].

En 1931 la Comisión Internacional sobre la Iluminación (CIE) en Francia desarrolló un sistema para la especificación de los estímulos cromáticos en base a un observador estándar y el espacio (Sistema CIEXYZ), lo que permite la sistematización del color que utilizamos en la actualidad [16]. Queda definido el sistema aditivo RGB, rojo + verde = amarillo, rojo + azul = magenta, verde + azul = cian. Y la contraparte sustractiva CYM (*Cyan, Yellow and Magenta*), cian + amarillo = verde, cian + magenta = azul, magenta + amarillo = rojo [17].

En 1940 Guillermo González Camarena inventó la televisión a color basándose en el modelo tricromático RGB [18].

En 1983 Jim Bowmaker confirmó que el ojo humano solo tiene tres tipos de receptores de color, tres células especializadas llamadas conos: rojo, verde y azul [19]. No ha habido cambios en el modelo de la composición de la luz en los últimos años.

1.2 Justificación

La tecnología práctica se ha basado en un modelo tricromático aditivo para generar la televisión a color y las pantallas en general, con "luces" rojo, verde y azul que se encienden a diferentes intensidades y se despliega toda la gama de colores. La contraparte sustractiva CYM también ha mostrado utilidad práctica, el arte de la pintura previamente utilizaba rojo, azul y amarillo pero en los últimos años ha adoptado como colores básicos el cian, amarillo y magenta por su congruencia (los tres colores primarios no pueden obtenerse de mezclas, por lo que rojo y azul no cumplen dicha regla en el modelo sustractivo). También las impresoras están basadas en el modelo tricromático CYM, dado que con tres tintes logran reproducir miles de colores. Más notorio es que se han identificado solo tres tipos de receptores de color en el ojo: rojo, verde y azul. La composición de la luz en base al modelo ondulatorio que define el color por longitud de onda no sufrió modificaciones ante el descubrimiento de los tres conos, así como encuentra dificultades para explicar todos los fenómenos del color. No logra explicar por qué en el sentido práctico son suficientes tres colores, no explica cómo una frecuencia específica tiene interacción simultánea pero diferente con los tres receptores, tampoco logra definir una longitud de onda para todos los colores, aquellos que no están visibles en el espectro como el rosa o el marrón son llamados policromáticos o combinación de frecuencias.

Los modelos RGB y CYM tienen correspondencia teórica perfecta, significa que los colores primarios de uno son los secundarios del otro y viceversa, por lo que considero una extrañeza la existencia de colores policromáticos, lo cual es más notorio en el color magenta. En el modelo aditivo el magenta es secundario, en el modelo sustractivo es primario al igual que amarillo y cian, pero mientras el magenta se



considera policromático los otros dos tienen definida una frecuencia. La hipótesis propuesta es que la luz blanca tiene solo tres componentes los cuales no están definidos por longitud de onda.

La capacidad ocular de percibir los fotones no es lo único implicado en la visión, sino también la interpretación que la corteza cerebral occipital le da a esos fotones para crear una imagen, y por último la interpretación cognitiva de la imagen: "*el ojo solo ve lo que la mente está preparada para comprender*", *Henri Bergson*. Esta investigación se inicia a partir de un fenómeno que el ojo es capaz de detectar, bajo un enfoque cognitivo diferente que nos ha pasado por alto. La primera evidencia está a simple vista, basta con considerar el fenómeno aditivo del color para contemplar un espectro tricromático con la observación directa (Figura 1), su interpretación (Figura 2) es lo que motiva esta revisión diferente.



Figura 1. Espectro de luz conformado por tres franjas (rojo, verde y azul)

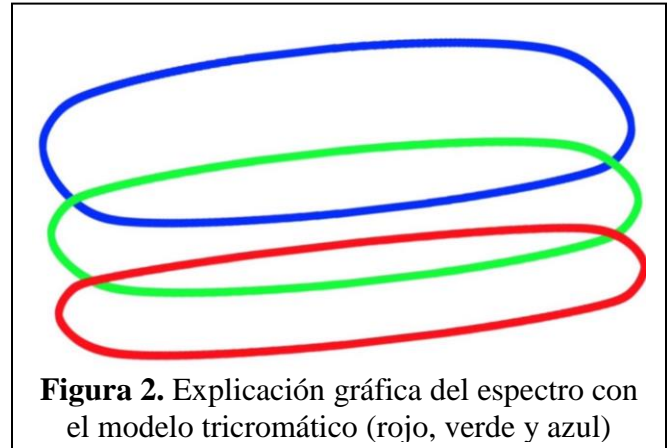


Figura 2. Explicación gráfica del espectro con el modelo tricromático (rojo, verde y azul)

La apreciación visual es subjetiva, pero existen fenómenos objetivos de la luz blanca que favorecen la idea de tres componentes, como el hecho de que se conocen tres efectos energéticos en ella: calórico, fotoquímico y fotoeléctrico. Lo que discrepa es que tres efectos se describieron en solo dos sitios del espectro, se decidió investigarlos con mayor refinamiento en un intento de discernir su distribución exacta dentro del espectro de luz, evaluando la posibilidad de que se sitúen en tres lugares.

2. Material y Métodos

2.1 Colores que componen la luz blanca

Se eligieron dos experimentos visuales para la demostración de los componentes básicos de la luz blanca, la dispersión en colores mediante un prisma y el fenómeno aditivo de los colores. El proceso incluye la dispersión de la luz solar al hacerla pasar a través del prisma y la observación directa del espectro de luz.

Material: Dos prismas triangulares fabricados con paredes de vidrio e interior de agua, medida 26mm de lado y 76mm de alto (prismas que se utilizaron en todos los experimentos siguientes), una cartulina blanca como pantalla de observación. Fotografías tomadas con iPhone 4.

Experimento 1: Se hace incidir luz solar sobre un prisma triangular, se proyecta el espectro luminoso a 3 metros de distancia sobre una superficie plana. De forma opcional se puede colocar el haz del espectro en un ángulo de 30 grados en referencia a la pantalla de observación para visualizarlo con mayor longitud.

Experimento 2: En el mismo montaje, se utiliza un segundo prisma de iguales características para generar otro espectro de dimensiones y ángulo similar, se acerca este espectro luminoso desde el extremo rojo hacia el extremo azul del primero de manera que se superpongan.

2.2 Transporte de energía en la luz blanca

Se eligieron los tres experimentos clásicos para evaluar los efectos energéticos conocidos de la luz blanca: calórico, fotoquímico y fotoeléctrico. Los experimentos de Herschel, Ritter y Lenard se reproducen con algunas modificaciones, intencionalmente se mantienen simples incluyendo materiales cotidianos para su fácil reproducción. Tratando de no modificar la esencia de los hallazgos originales se eligió la luz solar como fuente de energía. El proceso incluye la dispersión de la luz solar al hacerla pasar a través del prisma, evaluar cada efecto desde el infrarrojo hasta el ultravioleta haciendo mediciones a intervalos regulares dentro del espectro de luz. La intención es delimitar los sitios con mayor efecto.

Materiales: un prisma triangular de vidrio, ocho termómetros de mercurio con rango de 35 a 42°C, un marcador indeleble negro, una cinta métrica, una cinta adhesiva transparente, 20grs de sulfadiazina de plata ($C_{10}H_9AgN_4O_2S$) al 1% en crema de uso farmacéutico, sal común (NaCl), una hoja de papel bond blanco, una célula fotovoltaica de silicio amorfo de 2cm por 2.6cm (comunes en las calculadoras), un voltímetro, una caja de cartón de 1 metro de lado y una caja de cartón de 10cm de lado.

Experimento 3 (Herschel modificado): se incrementa el número de termómetros a 8, con el marcador se pinta de negro el bulbo de cada termómetro, en su extremo opuesto se pegan con cinta adhesiva a la caja de cartón pequeña de forma en que queden paralelos y equidistantes a 3mm, se colocan dentro de la caja grande que fungirá como cámara oscura sin que toquen las paredes de la caja para evitar transferencia de calor por conducción y convección. Se hace incidir en el extremo de mercurio luz solar separada en su espectro por un prisma a una distancia de 1 metro, de forma perpendicular. En el termómetro número 3 se hace incidir luz roja, en el 4 luz verde, en el 5 luz cian y en el 6 luz azul, teóricamente 1 y 2 infrarrojo, 7 y 8 ultravioleta, durante 5 minutos (Para mantener esta distribución el experimento no puede dejarse estático, se ajustó cada dos segundos la posición del prisma acorde a la variabilidad constante del sol).

Experimento 4 (Ritter modificado): Se sustituye el cloruro de plata por la mezcla de crema de sulfadiazina de plata con sal común en relación 20:1, sustancia que también cambia de color al exponerse a la luz por oxidación debido a su contenido de plata. En un cuarto oscuro se unta la crema en un recorte de papel bond blanco y cuadrado de 10cm de lado, se realiza una marca lineal por la mitad de forma horizontal, se coloca en el fondo de una caja de 1 metro que funge como cámara oscura y que solo permite la entrada de luz desde una abertura en uno de sus extremos, se hace incidir sobre el papel luz solar separada en su espectro por un prisma a 1 metro de distancia, de forma perpendicular, se coloca de manera que la luz verde incida en el centro del papel, sobre la línea marcada incide el color azul, debajo de ella el color rojo (Para mantener esta disposición el experimento no puede dejarse estático, se ajustó la posición del prisma continuamente). Posterior a 5 minutos se mide en centímetros el cambio de coloración considerada como la manifestación macroscópica de la formación de óxido de plata (Ag_2O). Se le dio una puntuación cualitativa al oscurecimiento en el papel, con una escala del 0 al 3, en donde 0 es sin cambio de coloración, 1 coloración gris claro, 2 gris y 3 gris oscuro. Como medio de control se tomaron los sitios untados con la crema que no fueron expuestos a la luz, cuyo resultado fue 0.

Experimento 5 (Lenard modificado): Se sustituye el tubo al vacío y el metal en su interior por una célula fotovoltaica de silicio amorfo, se coloca en una caja de 10cm de lado que funge como cámara oscura, y que solo permite el paso de un haz de luz por un agujero de 2mm de diámetro. Se utiliza voltímetro para medir la diferencia de potencial eléctrico, midiendo milivoltios. Se hace incidir sobre la

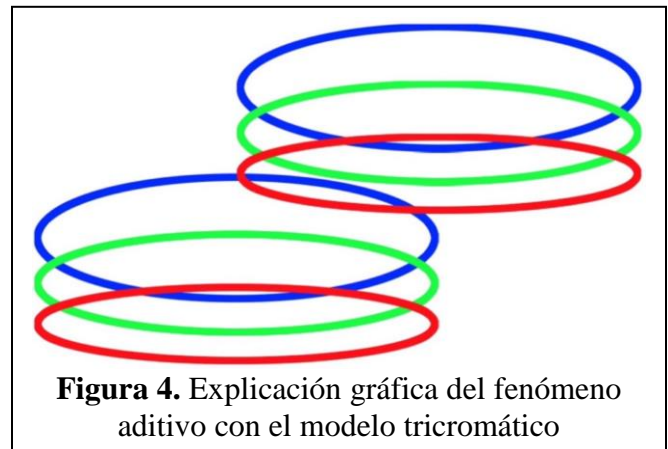


celda a 90° luz solar separada en su espectro a través de un prisma a 2 metros de distancia. Se gráfica cada centímetro, se toma de referencia el verde como centro (0), positivo azul, negativo rojo. Medición basal en oscuridad total 0mV, la medición basal en la cámara oscura sin ocluir el orificio de entrada ni dirigirlo hacia la fuente de luz fue de 81mV.

3. Resultados

Experimento 1: Se encuentran tres franjas de apariencia ovalada y de diferente ancho: rojo 1cm, verde 1.4cm y azul 2.2cm que se sobreponen en el centro dando lugar a colores secundarios, en los bordes laterales permanecen sin sobreponerse rojo, verde y azul. En donde se sobrepone rojo con verde se ve amarillo, y en donde se sobrepone verde con azul se ve cian (Figura 1).

Experimento 2: Con rojo sobrepuesto al azul aparece el color magenta (Figura 3). Se expresa de forma gráfica en la Figura 4. Confirma que la superposición de dos colores primarios genera colores secundarios, en el fenómeno aditivo son cian, amarillo y magenta, la convergencia de los tres le regresan a su blanco original. No se considera el naranja pues es apenas un esbozo en la transición rojo a amarillo. No aparece el violeta hasta sobreponer otro espectro de luz, de igual forma el violeta es mínimo en la transición de azul a magenta.



Experimento 3:

Tabla 1. Registro de calor con termómetros de mercurio

UV	UV	Azul	Cian	Verde	Rojo	Infrarrojo	Infrarrojo
8	7	6	5	4	3	2	1
35.0°C	35.0°C	36.3°C	37.4°C	39.2°C	38.4°C	37.3°C	35.2°C

Confirma que hay transporte de calor de tipo radiación en el color rojo, también calor que sobrepasa el extremo rojo del espectro visible. El punto máximo de calor se asocia al verde (Tabla 1 y Figura 5).

Experimento 4: espectro de 2.25cm, opacidad de 4cm, sobre la línea 3cm y debajo de la línea 1cm. Hago notar que los bordes laterales de la opacidad tienen nitidez, mientras que el borde superior e inferior son difuminados (Figura 6).

Tabla 2. Registro apreciativo de oxidación sobre la Sulfadiazina de plata

Ultravioleta	Índigo	Azul	Verde	Amarillo	Rojo	Infrarrojo
1	2	3	2	1	0	0

Confirma que existe reacción fotoquímica en el extremo ultravioleta y confirma radiación no visible con un espectro de 2.25cm y un resultado de 4cm. No hubo efecto en el extremo rojo. El mayor efecto se encuentra en donde incidía la luz azul (Tabla 2 y Figuras 6 y 7).

Experimento 5:

Tabla 3. Registro de potencial eléctrico con célula fotovoltaica

UV	Azul	Cian	Verde	Rojo	Infrarrojo	Infrarrojo	Control
+3cm	+2cm	+1cm	0	-1cm	-2cm	-3cm	-4cm
81mV	85mV	90mV	120mV	132mV	118mV	88mV	81mV

Se encuentra el efecto fotoeléctrico en el extremo espectral rojo e infrarrojo, se presenta con mayor intensidad en el rojo, muy poco en el azul, no se encuentra efecto en el ultravioleta (Tabla 3 y Figura 8).

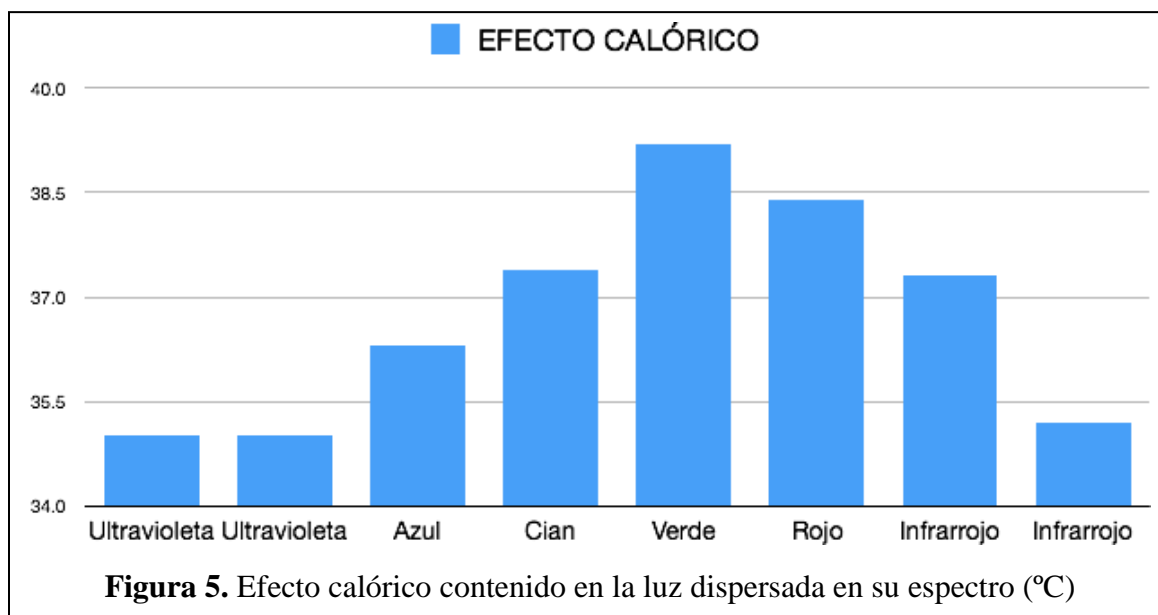




Figura 6. Efecto oxidante sobre Sulfadiazina de plata, rectángulos azul y rojo en representación del espectro de luz.

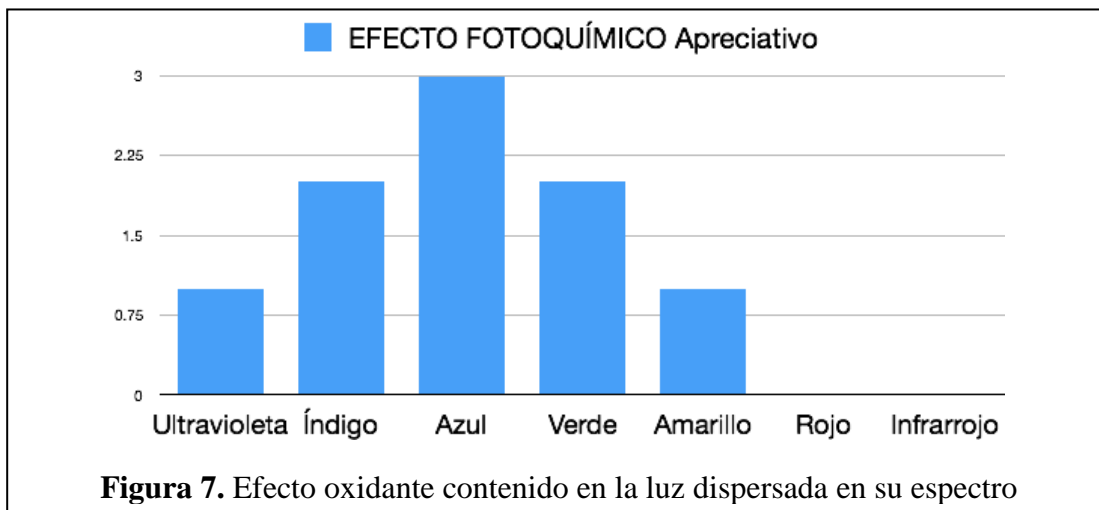


Figura 7. Efecto oxidante contenido en la luz dispersada en su espectro

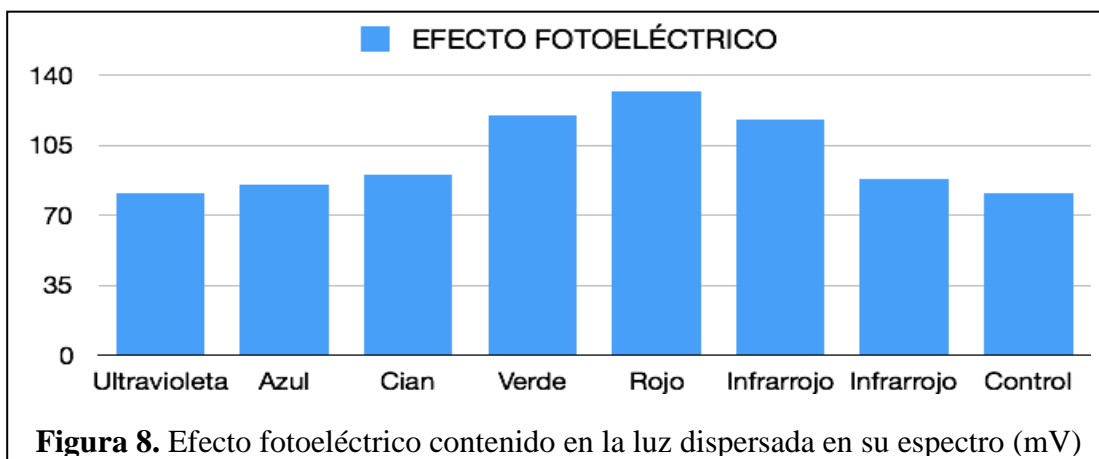


Figura 8. Efecto fotoeléctrico contenido en la luz dispersada en su espectro (mV)

Para garantizar la reproducibilidad los experimentos fueron repetidos en situaciones climáticas varias a lo largo de un año dos veces por mes, y las proporciones en forma de curva fueron reproducibles cada vez. Las cifras mostraron dependencia a la intensidad, en horario vespertino y día de verano se requirió menos tiempo de exposición solar. Los resultados expresados son solo representativos, muestran resultados que ascienden, llegan a un punto máximo y descienden como una curva, tendiendo a la simetría. A pesar de los cambios de intensidad en las mediciones el color percibido es siempre el mismo.

4. Discusión

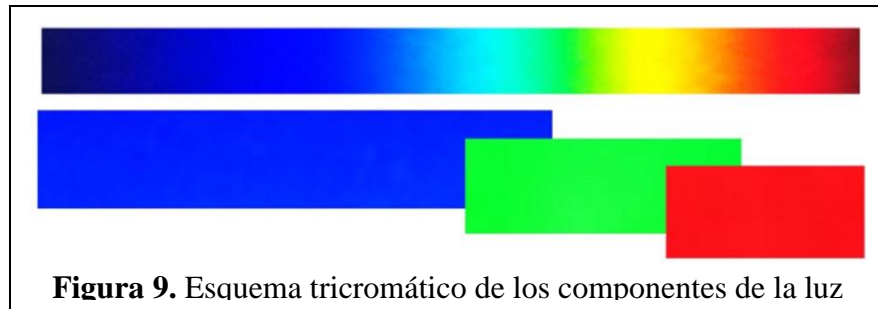
Cuando se hace pasar luz blanca a través de un prisma se dispersa en sus componentes básicos, así lo describió Newton "*la luz es color*" y concuerdo con él en la dispersión, pero observo solo tres componentes: rojo, verde y azul. Son siempre en las mismas proporciones asimétricas, rojo una banda delgada, verde una banda más amplia y azul una gran banda de casi el doble de ancho que las anteriores cómo se muestra en la Figura 9, esta distribución asimétrica es inherente a la fuente de luz utilizada, en este caso el sol. Tanto la descripción de Newton como la presente descripción son basadas en mera observación, pero cuando Newton lo describió no existía información previa, ahora contamos con el sistema RGB como evidencia de congruencia en cada pantalla de televisión o dispositivo electrónico y el conocimiento de la existencia de solo tres receptores de color en la retina.

El ojo humano puede considerarse un receptor selectivo de fotones. El doctor Bowmaker encontró la evidencia de que el ojo humano solo tiene células receptoras para tres colores, confirmando la teoría tricromática apreciativa de Young-Helmholtz. Con dicho hallazgo el modelo de la luz no sufrió modificaciones puesto que no podemos asegurar que nuestros receptores oculares sean producto exclusivo de la evolución adaptativa a los estímulos físicos, pero también es cierto que los receptores rojos, verdes o azules son los que predominan en todo el reino animal, están presentes aun en especies con visión monocromática o bicromática. De momento no puedo explicar la teoría del tetracromatismo.

La función receptiva del ojo no difiere entre observadores, lo que difiere es la interpretación cognitiva de lo observado, teniendo en mente el fenómeno aditivo basta con mirar las figuras 1 y 3 para apreciarlo. Las figuras 2 y 4 ayudan a la explicación visual. La figura 9 muestra que el magenta no está en el espectro de un solo prisma porque azul y rojo se dispersan a sitios opuestos y con un solo espectro no se puede formar dicho color secundario. Acorde a los hallazgos del doctor Bowmaker y su analogía con el modelo ondulatorio los colores monocromáticos serían exclusivamente: Azul lo que actualmente se considera 420nm, Verde con 534nm y Rojo con 564nm que fueron los colores que más absorción mostraron en los receptores oculares. Referente a la visión, al aplicar el modelo tricromático a la composición de la luz se define que cada fotón tiene interacción solo con un tipo de receptor, evitando así la necesidad de explicar cómo una frecuencia interactúa con tres receptores, se evita también la necesidad de la combinación de frecuencias, si existen solo tres fotones se logra explicar la consistencia de la teoría del color RGB, con tres señales y tres receptores es la corteza cerebral la que interpreta el resto de los colores.

Los experimentos de Herschel, Ritter y Lenard según la literatura previa situaban los tres efectos energéticos de la luz en dos sitios del espectro, dos efectos en el ultravioleta y uno en el infrarrojo, lo que representaba un problema para esta teoría, al elegir reproducirlos se pretendía encontrar alguna leve desviación de alguno de ellos que permitiera situarlos en tres lugares diferentes del espectro, lo cual se logró, pero no fue una desviación ligera. Extrañamente todos discreparon de alguna forma, el calórico de forma imprevista y el fotoeléctrico de forma radical.





Herschel propone que el efecto calórico está en todos los colores, efecto más notorio en el extremo rojo y efecto máximo en el infrarrojo, describe una gráfica lineal de temperatura que asciende hasta el infrarrojo y el efecto calórico cesa en su punto de mayor intensidad. En el experimento 3 se encontró un efecto en forma de curva, con mayor temperatura en donde incidía el color verde. No se ha descrito antes un fenómeno infraverde ni superverde, acorde a la teoría tricromática solo el color verde es portador del efecto calórico, con estos resultados se sugiere efecto en ambos extremos, pudiera ser que el efecto calórico conocido como infrarrojo es en realidad uno de esos extremos. La historia del descubrimiento de radiación no visible en el experimento original es fascinante, Herschel buscaba la distribución del calor por color y encontró calor más allá de donde lo buscaba, una serendipia, en ella se explica que Herschel registraba la temperatura de sus termómetros a intervalos de tiempo regulares, pero no se menciona si realizó ajustes en la posición de los termómetros o del prisma, no se menciona si la luz incidía de forma perpendicular. En el experimento se ajustó la posición del prisma de cada 2 segundos para mantener la distribución inicial, ese pudiera ser el motivo de la discrepancia entre resultados.

El efecto fotoquímico se ha atribuido a la luz ultravioleta al igual que el efecto fotoeléctrico. Ritter buscaba intencionalmente radiación no visible en el extremo opuesto del espectro, lo encontró en base a un fenómeno químico, la oxidación de la plata, describe el resultado de forma apreciativa dicotómica, oxidación presente o ausente, pero a la vez la literatura atribuye el mayor efecto al ultravioleta y con un cese abrupto en el sitio de mayor intensidad. En el experimento 4 se utiliza también la oxidación de la plata y una forma cualitativa para su clasificación, se amplía el criterio a 4 opciones, se considera una forma de curva por los bordes superior e inferior difuminados con mayor oscurecimiento en el centro. Con resultados muy similares a los de Ritter, concuerda en que existe efecto fotoquímico en el extremo ultravioleta del espectro, pero se encontró mayor efecto en donde incidía el color azul. Acorde a la teoría tricromática el efecto atribuido al color azul es solamente el fotoquímico, bajo la premisa de que cada color de fotón tiene propiedades diferentes y transporta energía diferente.

El efecto fotoeléctrico también se ha considerado dependiente del color, la interpretación de Lenard y Einstein al respecto es que depende de la longitud de onda, considerando al rojo con la longitud de hasta 780nm, y al violeta 380nm aproximadamente, sugieren que todos los colores tienen un efecto en mayor o menor medida, se esperaba una gráfica lineal con efecto inversamente proporcional a la longitud de onda y un cese en su punto de mayor intensidad. Por tanto el ultravioleta se esperaba con el mayor efecto y el infrarrojo con el menor, resultado que no se reproduce en el experimento 5. Se encuentra efecto no lineal, sino en curva, y que predomina en el extremo opuesto del esperado. Con la teoría tricromática se sugiere que solo uno de los tres colores es portador de este efecto, el rojo. En el experimento original Lenard incluía una fuente de tensión (batería) y utilizó amperímetro para medir la corriente eléctrica, en este experimento se midió la diferencia de potencial eléctrico con un voltímetro. Dicha diferencia metodológica es sustancial, pues la existencia de una batería implica que el experimento original se comporta como una fotorresistencia, asumiendo que el vacío logrado por Lenard no es absoluto, la energía contenida en la luz incidente permite a los electrones vencer una resistencia y saltar un espacio "vacío"

conectando el circuito preexistente, además Lenard tomó la elección de exponer a la luz el cátodo (-) y poner el medidor en el ánodo (+). Por otro lado el material utilizado en el experimento 5 es una fotocelda que tiene una función receptora de fotones cuyo fin es aprovecharlos para generar electricidad, el potencial eléctrico en ausencia de luz es 0 y el medidor no es parte del circuito. Esto explica la discrepancia de resultados, pero no necesariamente explica resultados en sitios opuestos del espectro, tampoco me explico por qué Lenard obtuvo un resultado lineal.

Los experimentos originales fungieron como base para generar el modelo vigente de la composición de la luz, pero los hallazgos de los experimentos realizados en este trabajo difieren de forma considerable, soy consciente de que puede resultar difícil aceptar que el efecto fotoeléctrico está en el color rojo, aún más difícil aceptar que el efecto calórico está en el color verde, afortunadamente son experimentos de fácil reproducción que pueden ponerse a prueba incluso en casa. La distribución de las mediciones en forma de curva sugiere una dispersión asimétrica de la energía, con mayor concentración de energía en el centro de cada color, pudiese ser mayor densidad de partículas. El color se aprecia invariablemente de la cantidad de energía o cantidad de luz como Grassmann describe en su tercera ley: aunque la iluminancia varíe, la sensación cromática se mantendrá constante.

Intencionalmente se buscaron las bibliografías de los experimentos originales. No se encontró el experimento original en el cual se midió la longitud de onda específica por color para complementar el análisis. El modelo tricromático no contempla longitud de onda, se centra en la característica de partícula del fotón como lo interpretó Newton.

5. Conclusión

El espectro de luz puede interpretarse de forma tricromática desde la observación directa teniendo en mente el fenómeno aditivo de los colores. El color es luz y la luz es color, el mismo modelo puede aplicarse a ambos conceptos. Se consideran solo tres tipos de fotones: Azul 420nm, Verde 534nm y Rojo 564nm pero enfatizando su propiedad de partícula. Referente a la visión, si poseemos un receptor para cada tipo de fotón se logra explicar la consistencia de la teoría del color RGB y del fenómeno aditivo, se consideran solo tres colores puntuales monocromáticos, los miles de colores restantes son policromáticos, ya sean secundarios (bicromáticos) o terciarios (tricromáticos) son la interpretación cerebral a las diferentes combinaciones.

Se favorece la idea de que la luz blanca tiene tres componentes físicos al encontrar tres efectos energéticos en ella. También la favorece que al realizar la dispersión con un prisma dichos efectos se separan en tres porciones diferentes del espectro luminoso. Se confirmaron los tres efectos de la luz blanca, los tres con un pico de mayor intensidad asociado a un solo color del espectro tricromático. La luz roja se asoció al efecto fotoeléctrico. La luz verde se asoció al efecto calórico. La luz azul se asoció al efecto fotoquímico. Se puede describir la naturaleza de la luz visible de forma bastante acertada con estos tres colores primarios, incluso podrían ser los únicos componentes físicos de la luz blanca.

Referencias bibliográficas

1. Newton, I. (1730). *Opticks: a treatise of the reflections, refractions, inflections and colors of light*. libro 1. Printed for William Innys at the west End of st. Pauls. London
2. López, E. (1988). *De la ley de Snell-Descartes a las ecuaciones de Hamilton en el espacio fase de la óptica geométrica*. Rev. Méx. Fis. 35, pag 291-300
3. Harris, M. (1766). *The natural system of colours*. New York. Cornell University
4. Holden, E. (1881). *Sir William Herschel: his life and works*. New York; Charles Son's. Cap 22



5. Hockberger, P. E. (2002). *A history of ultraviolet photobiology for humans, animals and microorganismos*. Photochem. Photobiol. Vol. 76, pag 561-579
6. Young, T. Phil, T. (1804). *Bakerian lecture: Experiments and calculations relative to physical optics*. Trans. R. Soc. Lond. 94, pag 96-101
7. Young, T. Phil, T. (1802). *The bakerian lecture: On the theory of light and colours*. Trans. R. Soc. Lond. 92, pag 12-48
8. Grassmann H.G. (1853). *Zur Theorie der Farbenmischung*. Annalen der Physik. 89, pag 69-84
9. Maxwell, J.C. (1873). *A treatise of electricity and magnetism*. Oxford Press, pag 504
10. Hecht, E. (2000). *Óptica*. Adisson Wesley iberoamericana, Madrid, pag 26-89
11. Lenard, P. (1967). *Nobel lectures: On cathode rays*. Physisc, Elsevier Publishing Company. Ámsterdam
12. Einstein, A. (1905). *Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz*. Annalen der Physik, 17, pag 132-148
13. Broglie, L. V. (1924). *Investigaciones sobre la teoría de los cuantos*. Tesis. París
14. Atkins, P. (2002). *Physical Chemistry*. New York: Oxford University Press, pag 243-276
15. Feynman, R. P. (2000). *QED:(QED (book))*, pag 89-90
16. Adams, E. Q. (1942). "X-Z planes in the 1931 I.C.I. system of colorimetry". JOSA 32:3, 168-173
17. Lossada, F. (2012). *El color y sus armonías*. Universidad de los Andes. Pag 29-44
18. Krauze, E. González, G. Jr. (1999). *50 años de la televisión Mexicana*. Editorial Clío.
19. Bowmaker, J. K. (1983). *Human visual pigments: microspectrometric results from the eyes of seven persons*. Royal Society Publishin 220, pag 121

