

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE BELLAS ARTES
DEPARTAMENTO DE PINTURA-RESTAURACIÓN



BIBLIOTECA U.C.M.



5307738255

TESIS DOCTORAL

Título:

**SISTEMA DE REINTEGRACIÓN CROMÁTICA
ASISTIDO POR MEDIOS TRANSFERIBLES
OBTENIDOS POR PROCEDIMIENTOS FOTOMECÁNICOS.
APLICACIÓN EN LA RESTAURACIÓN DE
PINTURA DE CABALLETE**

Memoria
que para optar al grado de
doctor en Bellas Artes
presenta:

JOSÉ MANUEL DE LA ROJA DE LA ROJA

Directora:

MARGARITA SAN ANDRÉS MOYA



Madrid, 1999

DATOS TÉCNICOS DE ESTA TESIS:

Diseño, maquetación, composición e impresión:

Realizada por el autor de la obra

Maquetación y composición:

Programa de aplicación de tratamiento de texto

Ilustraciones:

Programa de aplicación de tratamiento de imágenes

Tipo de letra:

Times New Roman,
Cuerpos 24, 13, 11, 10 y 9

Impresión:

Impresora de chorro de tinta

Papel del texto:

Mellotex Blanco Brillante, 100 g/m²

Material de la cubierta:

Tela de color gris

X-53-355417-8

Los derechos de propiedad intelectual del *Sistema de Reintegración Cromática Asistido por Medios Transferibles*, de los que es titular José Manuel de la Roja de la Roja, están inscritos en el Ministerio de Cultura, Registro General de la Propiedad Intelectual, con el núm. M-37614. Señalar que para este sistema de reintegración cromática así como para la elaboración de los denominados Fondos Tramados Transferibles, han sido solicitadas con los números: P9802182 y P9900107 las correspondientes patentes en la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM).

AGRADECIMIENTOS



Agradecimientos

Siendo este apartado el único espacio donde es permisible manifestar la palabras dictadas por la memoria del corazón y no por la razón, expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que de una u otra forma han contribuido a la elaboración de este trabajo.

Su desarrollo ha sido realizado en el Departamento de Pintura-Restauración de la Facultad de Bellas Artes de la Universidad Complutense de Madrid, bajo la dirección de la Dra. Dña. Margarita San Andrés Moya, a quien expreso mi gratitud de una forma sencilla pero sincera por la confianza depositada desde un primer momento, tanto en la idea planteada, como en mis posibilidades y capacidad para poderla llevar a cabo. Asimismo, mi agradecimiento por la oportunidad que en su momento me brindó de ser colaborador honorífico del Departamento durante el desarrollo de esta investigación, así como el

poder llevarla a cabo en el Laboratorio de Química de ese Departamento. Mi reconocimiento por la seriedad y rigor con que ha ejercido la labor de dirección de esta investigación, así como por su capacidad profesional y humana.

Igualmente, mi agradecimiento a los profesores del Dpto. de Pintura - Restauración, Dr. D. Javier Peinado Fernández, Dra. Dña. Sonsoles de la Viña Ferrer y Dr. D. Manuel Prieto Prieto, y al Dr. D. Joaquín Perea González del Dpto. de Dibujo, por la ayuda prestada. Asimismo, a la Dra. Dña. María Sánchez Cifuentes por su apoyo y estímulo aportado durante la fase investigadora de laboratorio, al igual que por su asesoramiento técnico. Del mismo modo, expresar mi agradecimiento a la Dra. Dña. Isabel Báez Aglio por sus consejos y sugerencias.

A la Dra. Dña. Paz Cantalapiedra, quien generosamente y de forma desinteresada ha facilitado obra pictórica de su propiedad en la que llevar a cabo la investigación práctica.

A Consuelo, por su comprensión y estímulo prestado en los momentos difíciles, sobre todo durante la fase experimental de la investigación cuando los resultados expectantes no se correspondían con los obtenidos, animándome a seguir perseverando. También por su ayuda en la edición y corrección del documento.

A mis compañeros del Departamento de Pintura - Restauración Alicia, Olvido, Sonia y Marcos, por sus continuas muestras de afecto y apoyo demostradas.

Asimismo, expresar mi agradecimiento, presentando mis más sinceras disculpas a todas aquellas personas próximas que de una forma u otra, quizás ocasionado por una mayor confianza, han soportado mis variaciones de estado de ánimo motivados por la constante preocupación e importancia que ha supuesto para mí el desarrollo de

esta investigación, motivo que aunque no justificable, desearía que comprendiesen.

Por último, testimoniar la importancia que ha tenido mi entrañable y pequeño pueblo natal, Ruguilla, como reducto de evasión donde recabar fuerzas para afrontar las etapas difíciles y de desánimo surgidas durante la investigación.

A mi hija Celia.

ÍNDICE



Índice

INTRODUCCIÓN.....	19
I. Sistemas de reintegración	31
I.1. Criterios de reintegración.....	31
I.2. Técnicas de reintegración.....	41
I.2.1. Reintegración invisible o ilusionista.....	41
I.2.2. Reintegración visible.....	42
I.2.2.1. Tinta neutra	43
I.2.2.2. <i>Tratteggio o Rigattino</i>	45
I.2.2.3. Puntillismo	47
I.2.2.4. Veladuras.....	49
I.2.2.5. Abstracción cromática-Selección cromática.....	49
I.3. Exigencias técnicas	53
I.4. Aspectos cromáticos.....	57

II. Fundamentos del sistema de reintegración que se propone.....	67
II.1. Principios teóricos del color	68
II.1.1. Estímulos de color - Sensación cromática	69
II.1.1.1. Luz.....	70
II.1.1.2. Interacción luz-materia	78
II.1.1.2.1. Reflexión	80
II.1.1.2.2. Refracción	81
II.1.1.2.3. Transmisión	82
II.1.1.2.4. Dispersión.....	83
II.1.1.2.5. Absorción.....	85
II.1.1.2.6. Difracción.....	88
II.1.1.3. Percepción luz-color	89
II.1.2. Características y especificación del color	104
II.1.2.1. Características subjetivas del color	104
II.1.2.2. Características objetivas del color	107
II.1.2.3. Especificación del color	108
II.1.2.3.1. Cubo de Hicethier	110
II.1.2.3.2. Sistema CIE.....	112
II.2. Reproducción del color	115
II.2.1. Principios básicos de la reproducción del color	119
II.2.1.1. Leyes de mezcla cromática.....	121
II.2.1.1.1. Mezcla aditiva.....	121
II.2.1.1.2. Mezcla sustractiva	125
II.2.1.1.3. Mezcla óptica	135
II.2.2. Aspectos técnicos.....	136
II.2.2.1. Función del soporte	137
II.2.2.2. Función de los pigmentos.....	141
II.2.2.3. Función de los puntos de medio tono	153
II.2.2.3.1. Forma de los puntos.....	157
II.2.2.3.2. Tamaño de los puntos	158
II.2.2.3.3. Espaciado entre los puntos.....	159
II.2.2.3.4. Distribución de los puntos.....	164
II.2.2.3.5. Orientación de los puntos.....	165
II.2.2.3.6. Percepción cromática de un diseño de puntos.....	167
II.2.2.3.7. Fondos Tramados Transferibles (FTT).....	179

III. Material necesario para el desarrollo del sistema. Optimación de la naturaleza de los componentes, dosificación y condiciones de trabajo.....	185
III.1. Características de los Fondos Tramados Transferibles (FTT).....	187
III.1.1. Emulsiones fotosensibles.....	190
III.1.1.1. Composición.....	195
III.1.1.1.1. Coloide.....	195
III.1.1.1.2. Sensibilizador.....	201
III.1.1.1.3. Sustancia colorante.....	206
III.1.1.1.4. Bactericidas.....	208
III.1.1.1.5. Plastificantes.....	209
III.1.1.2. Preparación y aplicación.....	209
III.1.2. Negativos tramados.....	216
III.1.3. Obtención de los FTT.....	230
III.1.3.1. Montaje y exposición.....	230
III.1.3.2. Procesado.....	247
III.1.3.2.1. Revelado.....	247
III.1.3.2.2. Preparación para la transferencia.....	251
III.2. Tablas cromáticas.....	252
IV. Proceso de reintegración. Metodología de trabajo.....	269
IV.1. Análisis del color a reintegrar.....	276
IV.1.1. Análisis comparativo visual.....	277
IV.1.2. Análisis comparativo colorimétrico.....	281
IV.1.3. Valoración porcentual tricromática del color analizado.....	286
IV.2. Síntesis del color a reintegrar.....	287
IV.2.1. Procedimiento operativo.....	288
IV.2.2. Consideraciones técnicas.....	294
V. Discusión.....	307

VI. Conclusiones	319
ANEXO	329
GLOSARIO DE TÉRMINOS	383
BIBLIOGRAFÍA	395
ÍNDICE DE MATERIAS	413

INTRODUCCIÓN



Introducción

Ante una situación de deterioro o ruina de una obra de arte, el restaurador guiado por una actitud crítica, puede dirigir su intervención hacia un tratamiento de conservación y/o de restauración.

Es dentro del proceso de restauración donde tiene lugar la denominada etapa de reintegración cromática. Esta etapa tiene como finalidad principal restablecer el potencial estético de la obra de arte, mermado por los deterioros sufridos por el transcurso del tiempo y que impiden realizar su correcta lectura.

*Reintegración
cromática:
finalidad*

Básicamente, esta etapa consiste en realizar una integración cromática en aquellas zonas de la obra donde existen pérdidas del estrato pictórico, y cuyo color afecta de forma negativa al conjunto general.

*Técnicas de
reintegración
tradicionales*

En la actualidad, para llevar a efecto la reintegración existen diferentes técnicas específicas, como son, entre otras, el *tratteggio*, el puntillismo y la abstracción cromática. Se diferencian fundamentalmente en el método de ejecución (puntos, trazos, veladuras); si bien todas ellas se realizan manualmente con pincel, por aplicación de distintas capas y colores sobre el área a reintegrar. Todos estos aspectos son desarrollados en el Capítulo I de esta Memoria.

Inconvenientes

La utilización de cualquiera de estas técnicas supone un proceso lento y laborioso, hecho que resulta especialmente evidente cuando se pretende reintegrar áreas de gran formato; en cualquier caso es necesaria la realización de un minucioso trabajo, trazo a trazo o punto a punto, hasta completar el área de la laguna objeto de la reintegración.

Por otra parte, se encuentra el inconveniente de que no se conoce *a priori* el resultado cromático de la reintegración que se va a obtener con los colores utilizados, por lo que es necesario estar continuamente rectificando durante el transcurso de la intervención. Por comparación visual se tiene identificado el color que se quiere conseguir, pero no los colores necesarios ni su dosificación para lograr su reproducción. A este inconveniente hay que añadir la dificultad técnica que supone la obtención sistemática de un trazado homogéneo, tanto formal como cromáticamente.

De lo expuesto se deduce que, la ejecución de estas técnicas tradicionales de reintegración suponen, por una parte, una excesiva laboriosidad y, por otra, una falta de metodología concreta y precisa respecto a su materialización cromática y formal. Esta situación da lugar a que cada restaurador actúe de una forma *sui generis*, aplicando diferentes soluciones subjetivas de carácter ciertamente intuitivo.

Así, se puede considerar patente la subjetividad del restaurador en la ejecución cromática del área reintegrada, cualquiera que sea la técnica utilizada. Este aspecto se hace más evidente en obras de gran

formato, en las que es necesaria la participación de un equipo de varios restauradores; en tales situaciones resulta muy frecuente apreciar diferencias, tanto de ajuste cromático como de ejecución formal, en el resultado final de la reintegración desarrollada por cada uno de los miembros del equipo, aunque se haya seguido la misma técnica de reintegración.

Por lo tanto, los resultados obtenidos se consideran y se presentan como fruto de la intuición, la experiencia y la habilidad del restaurador. Criterios poco rigurosos en la medida que pueden estar influenciados por una serie de condicionantes; entre otros, las posibles anomalías cromáticas en la visión, la destreza en la ejecución de la reintegración, y la elección de los colores idóneos, referida esta última, tanto a los tonos seleccionados como a sus proporciones, aspectos, que a su vez, están estrechamente relacionados con los conocimientos que posea el restaurador acerca de la teoría de color.

Como ya mencionara Leonardo da Vinci (1986:99), existe el error en quienes ejercen la praxis sin la ciencia, advirtiendo que tal praxis debe estar fundamentada en una correcta teoría.

A partir de la consideración de los inconvenientes que presentan estas técnicas de reintegración en su ejecución cromática, surge la cuestión que muchos restauradores se habrán podido formular sobre la existencia de algún otro método más rápido y cómodo; es posible incluso que alguien haya pensado en algún procedimiento concreto, pero probablemente su materialización se haya visto truncada debido al complejo mundo del color.

*Planteamiento
del nuevo sistema*

Con este mismo planteamiento, surge la idea de un nuevo sistema de reintegración cromática, que podrá solventar en gran parte los inconvenientes citados. En concreto, se parte de relacionar los fundamentos de la Fotografía en color y la metodología seguida en los procesos de reproducción en las Artes Gráficas.

SIRECRAMT A partir de esta relación y en base a un laborioso trabajo experimental, se propone un nuevo sistema de reintegración, denominado: *Sistema de Reintegración Cromática Asistido por Medios Transferibles*, y que en esta Memoria se identificará con la siglas: SIRECRAMT.

Los resultados obtenidos son fruto de la labor de investigación que durante seis años se ha venido realizando en el Laboratorio de Química del Departamento de Pintura - Restauración de la Facultad de Bellas Artes.

Objetivación Este nuevo sistema es concebido bajo una perspectiva de racionalidad científica que facilite la labor del restaurador, con un enfoque sobrio y un punto de vista eminentemente práctico. Se pretende limitar los condicionantes subjetivos presentes en la ejecución cromática de la reintegración, de forma que sea posible obtener unos resultados más óptimos y sistemáticos que, a su vez, permitan disminuir la laboriosidad de ejecución y dotar al sistema de un cierto carácter objetivo.

Solución práctica Con este sistema de reintegración no se pretende cuestionar los sistemas de reintegración existentes, respecto al criterio a seguir en la solución del problema planteado por las lagunas, sino la forma manual de su materialización. Por ello, el sistema además de ser una alternativa a los actuales sistemas de reintegración, supone una solución práctica que facilita la forma de ejecución de aquellos.

Marco de actuación En el ámbito de la Restauración de pintura hay que partir del hecho de que existe toda una filosofía, que gira alrededor del concepto de reintegración y de los criterios que deben seguirse para la materialización de este proceso. Básicamente, su desarrollo ha dado lugar a dos directrices, en cuanto a que la reintegración efectuada resulte "visible o invisible" al observador de la obra. Cada una de estas directrices puede llevarse a cabo siguiendo distintas técnicas, pero

siempre bajo una serie de condicionantes relacionados fundamentalmente con el respeto a la obra de arte, siendo dentro de este marco de actuación donde se encuadra el SIRECRAMT.

Puede decirse que este sistema consiste básicamente en realizar una restitución del color a reintegrar en las lagunas mediante una tricromía. Previamente se compara el color a reproducir con unos patrones cromáticos, a fin de seleccionar los tres colores y dosificación apropiada para la reproducción; estos tres colores seleccionados se superponen por transferencia, mediante una ligera presión sobre el área de la laguna. Este proceso se realiza siguiendo una metodología definida y ágil, frente al carácter laborioso e intuitivo de los sistemas de reintegración existentes.

Fundamentos

A partir de esta idea y de la consideración de su coherencia y viabilidad, se han realizado los ensayos correspondientes, cuyos resultados han permitido establecer una determinada metodología de trabajo. Esta metodología se refiere tanto a la elaboración de los elementos necesarios como a las distintas etapas que comprende la aplicación práctica de este sistema de reintegración.

Los objetivos planteados para poner de manifiesto la viabilidad del sistema, y que han guiado esta labor investigadora, comprenden los siguientes aspectos:

Objetivos

- 1) Establecer o definir las etapas que comprenden el diseño y elaboración de las películas transferibles.
- 2) Selección de los materiales a utilizar en cada una de estas etapas, que cumplan las condiciones necesarias para su utilización en el campo de la Restauración y que pueden considerarse, en principio, como los más adecuados para la preparación de estas películas.

- 3) Determinación de las proporciones en las que estos materiales deben ser dosificados y optimación de las condiciones de trabajo.
- 4) A partir de estas películas transferibles, obtención de una carta de colores patrón, que permita caracterizar cada uno de los colores a reproducir en la reintegración, mediante la cuantificación de los tres colores primarios.
- 5) Aplicación práctica de este sistema (SIRECRAMT) a casos concretos de reintegración sobre obra real.

*Reproducción
del color*

Para la consecución de estos objetivos se han tenido en cuenta los fundamentos que permiten la reproducción del color en otras disciplinas, tales como las Artes Gráficas y la Fotografía en color. La analogía establecida con la metodología seguida en estas disciplinas, ha permitido desarrollar el procedimiento de reintegración que se propone y, por esta misma razón, parte de la terminología utilizada tiene su origen en dichos campos de conocimiento.

*Participación
de otras
disciplinas*

La materialización de este procedimiento de reintegración requiere de la participación de distintas disciplinas científicas, como son la Química, la Fotografía y la Restauración. No obstante, el trabajo se plantea desde y para la Restauración; por ello, y siendo consciente de las limitaciones que conlleva el pretender abarcar distintos campos de conocimiento, algunos aspectos relacionados con las otras disciplinas implicadas pueden ser susceptibles de variaciones dentro de su propio campo. Sin embargo, aquí deben valorarse, en todo caso, como meras herramientas que hacen posible el desarrollo del sistema.

*Desarrollo
explicativo*

Básicamente, la estructuración seguida para el desarrollo explicativo del sistema de reintegración se divide en tres apartados principales: fundamentos teóricos en los que se basa, materiales

necesarios y optimación de las condiciones de trabajo para su ejecución, y metodología de aplicación práctica.

En relación a los fundamentos teóricos en que, se apoya el sistema que se propone, materia tratada en el Capítulo II, hay que señalar que al igual que en cualquier otro sistema de reintegración, es necesario considerar los aspectos relacionados con la reproducción del color y, por lo tanto, con la teoría del color que lo hace posible. En este sentido, se analizan los fundamentos teóricos que permiten la obtención del color a reintegrar, concretamente las leyes de mezcla cromática y su concreción física mediante puntos o trazos de color, cuya percepción óptica simula los distintos grados de saturación de cada uno de los colores primarios utilizados.

*Fundamentos
teóricos*

Por otro lado, el sistema se basa en que cada uno de los colores primarios puede ser obtenido en distintos grados de saturación, en forma de películas de unas características tales que permiten su transferencia sobre la superficie a reintegrar; estas películas se denominan *Fondos Tramados Transferibles (FTT)*.

*Fondos
Tramados
Transferibles
(FTT)*

De esta forma, y mediante la adecuada combinación de dichos colores primarios, es posible obtener una amplia gama de tonalidades, cuya representación en tablas cromáticas permite, a su vez, conseguir de forma sistemática, un color semejante al de la zona a reintegrar.

*Tablas
cromáticas*

Los FTT son preparados mediante el adecuado procesado de emulsiones fotosensibles especialmente preparadas al efecto, y que deben reunir unas características muy concretas. En el Capítulo III junto con el Anexo de esta Memoria se recoge el laborioso proceso experimental, que ha permitido poner a punto la metodología de obtención de estos FTT. Señalar que existen otros métodos de obtención, los cuales son planteados en esta Memoria como futuras vías de investigación.

*Material
necesario*

Hay que destacar que, si bien cualquier trabajo de investigación experimental requiere una etapa de ensayos previos, que permita determinar las condiciones de trabajo más adecuadas a fin de lograr el objetivo u objetivos propuestos inicialmente, en este caso, ésta ha sido la etapa más laboriosa por diversas razones, entre las que cabe destacar la escasa bibliografía existente relacionada de forma directa con la aplicación práctica del sistema, así como por la participación de otras disciplinas distintas a la Restauración (Química y Fotografía), que como ya se ha mencionado, deben cumplir una serie de exigencias técnicas marcadas por la primera.

Exigencias técnicas

Las limitaciones y exigencias técnicas implícitas en todo proceso de restauración han delimitado el margen de maniobra en la elaboración de estos elementos, FTT y tablas cromáticas. Es por ello, que el desarrollo de esta fase de la investigación ha supuesto una inversión de tiempo muy importante, en relación con el conjunto de todo el trabajo; la fase experimental ha sido tremendamente laboriosa, habiéndose realizado gran cantidad de ensayos.

Sin embargo, con el fin de agilizar la descripción de las distintas etapas que comprende el proceso de obtención de los FTT y tablas cromáticas, y la explicación de los resultados obtenidos, se ha considerado conveniente recoger en el Capítulo III de esta Memoria únicamente los resultados óptimos; estos resultados se refieren a los materiales, dosificación y condiciones de trabajo, como a la descripción de las distintas etapas del proceso.

Como ampliación de este Capítulo III, en el Anexo de esta Memoria se explica de forma más detallada la evolución por la que ha transcurrido esta experimentación. Se describen las distintas variables, su interrelación y cómo, finalmente, se han llegado a optimar. No obstante, hay que destacar que si bien en este Anexo figuran únicamente 23 ensayos, el número total de los mismo ha sido mucho más numeroso

(alrededor de 530); los que aquí se muestran son los más significativos, y puede considerarse que de alguna forma abarcan todos los realizados.

Una vez optimado el proceso de elaboración de los FTT por medios fotomecánicos, y la elaboración de las correspondientes tablas cromáticas, la etapa siguiente corresponde a la aplicación práctica de este sistema de reintegración y la demostración de su viabilidad. Puede considerarse que estos dos últimos aspectos constituyen el objetivo principal de esta Memoria; son tratados en el Capítulo IV, donde se explica detalladamente el proceso seguido en la reintegración llevada a cabo sobre obra real y se exponen los resultados obtenidos.

Aplicación del sistema

A partir del conjunto de los resultados obtenidos, en relación con los objetivos propuestos, en el Capítulo V se plantea la discusión sobre determinadas cuestiones; concretamente, se discuten aspectos relacionados con la preparación de los FTT, elaboración de las tablas cromáticas y aplicación práctica del SIRECRAMT.

Discusión

Por último, se establecen en el Capítulo VI las conclusiones derivadas del desarrollo de este trabajo de investigación, así como del resultado de cotejar el SIRECRAMT con los sistemas de reintegración tradicionales.

Conclusiones

Destacar que si bien en el desarrollo de esta Memoria la aplicación del SIRECRAMT está enfocada a la reintegración cromática de pintura de caballete, resulta igualmente válida su aplicación en escultura y pintura mural; no obstante será necesario realizar los ensayos previos oportunos que pongan de manifiesto sus posibilidades.

Ámbito de aplicación

Asimismo, existen otras aplicaciones que pueden tener cabida en otros campos ajenos a la Restauración, como pueden ser el Diseño Gráfico y la Maquetación, los cuales no son objeto de estudio en este trabajo, quedando abiertos a posibles investigaciones futuras.

*Viabilidad del
sistema*

Por último, observar que aunque tanto el desarrollo como la puesta a punto de las diferentes etapas que hacen posible la aplicación del procedimiento planteado, son susceptibles de posibles variaciones, para esta investigación han permitido poner de manifiesto el objetivo principal propuesto de mostrar la viabilidad del sistema.

I. SISTEMAS DE REINTEGRACIÓN



Sumario: I.1.- Criterios de reintegración. I.2.- Técnicas de reintegración. I.2.1.- Reintegración invisible o ilusionista. I.2.2.- Reintegración visible. I.2.2.1.- Tinta neutra. I.2.2.2.- *Tratteggio* o *Rigattino*. I.2.2.3.- Puntillismo. I.2.2.4.- Veladuras. I.2.2.5.- Abstracción cromática-Selección cromática. I.3.- Exigencias técnicas. I.4.- Aspectos cromáticos.

I

Sistemas de reintegración

I.1.- CRITERIOS DE REINTEGRACIÓN

En una obra pictórica, se denominan "lagunas" a las faltas ocasionales o intencionadas, bien de la capa pictórica, o bien de la capa pictórica y de la capa de preparación. Estas faltas o pérdidas constituyen por sí mismas unos elementos físicos, en cuanto a forma y color, que interrumpen el mensaje implícito de la obra, fundamentalmente el estético; aportan a la superficie pictórica una nueva configuración, ya que, generalmente al no ser elementos neutros, aparecen contorneados, mostrando el color de la preparación, del soporte o de la imprimación (Bello y Borrel, 1995:23; Brandi, 1993:74; Buces, 1991:460; Díaz, 1975:178).

¿Qué es una laguna?

Las interferencias más graves en la continuidad coherente de una imagen no siempre se corresponden con las lagunas más extensas. La

*Tamaño y
localización*

perturbación producida varía e influye de diferente forma según sea su localización, o bien en función del tipo y características de la obra. Así, por ejemplo, un conjunto de diminutas lagunas pueden crear una gran interferencia en la percepción de determinadas imágenes, mientras que una laguna extensa puede interferir mínimamente dentro de un fondo monocromático de color similar al de la laguna (Legorburu, 1995:351). Generalmente, es más grave el efecto visual ocasionado por la laguna, en cuanto a su inserción indebida, que la falta matérica ocasionada por la misma (Fig. I.1).



Fig. I.1. Obra pictórica en la que aparecen diferentes lagunas cuya apreciación visual se hace notoria dentro de la imagen, distorsionando la lectura estética general de la misma.

Así, la presencia de la laguna en la imagen se hace notoria y precisa, resaltando y atrayendo la atención del espectador y llegando a percibirse, según Cesare Brandi (1993:74-75):

[...] como una *figura* a la que la imagen pictórica, escultórica o arquitectónica queda obligada a hacer de *fondo*, mientras es ésta la propia figura y en primerísimo término.

*Cómo se
percibe una
laguna*

La laguna, como superficie contorneada incluida dentro de los límites de la totalidad de la imagen, al poseer un área menor, tiende a adquirir un *status* de figura en relación a la superficie circundante, que a su vez es percibida como fondo. El fenómeno de figura-fondo fue estudiado inicialmente por Rubin y, posteriormente, por la escuela psicológica de la *Gestalt*, que se dedicó a la investigación de los fenómenos perceptivos que se acaban de indicar. Según uno de sus principios, la limitación en el espacio de una superficie define la posibilidad de dividir figura-fondo, y generalmente las áreas limitadas o circundadas son atribuidas a figuras y no a un fondo (Koffka, 1973:278; Luna, 1992:369; Schuster y Beisl, 1982:25).

Otro aspecto que contribuye a aumentar la notoriedad de la laguna en la imagen, es el cambio abrupto de los gradientes de intensidad luminosa existente entre ambas -laguna/imagen-, ya que se genera una mejor definición o resolución de los mismos (Gibson, 1974:158); tal situación se produce, por ejemplo, en una zona de penumbra de la imagen interrumpida por una laguna, la cual presenta, generalmente, el color blanco correspondiente a la capa de preparación. Según el efecto de Liebmann (Koffka, 1973:155-156), una figura roja aplicada sobre un fondo verde con una luminosidad exactamente igual, se observa que la distinción figura-fondo se desvanece; así, la distinción entre figura-fondo depende más de la luminosidad que del matiz. Este aspecto es utilizado a menudo por los pintores para reforzar las diferencias de matiz aplicando distinta luminosidad.

*Aspectos que
destacan la
laguna*

Zona de mayor interés

Una vez que la laguna -figura- ha sido visualmente aislada como zona de mayor interés para el observador, la atención se centra sobre ella; este hecho queda reflejado en un aumento del número y duración de las fijaciones del ojo en el área de la laguna -figura-, en mayor grado que en la imagen general -fondo-, así, se establece una transferencia periódica de atención desde una parte -laguna- a una totalidad -imagen general- (Granovskaya, Bereznaya y Grigorieva, 1987:46-47).

Devaluación de la imagen

A la mutilación de la imagen producida por las lagunas, hay que añadir además, una *devaluación*, es decir, un retroceso con carácter de fondo de lo que precisamente en su origen era la figura (Brandi, 1963:150; Brandi, 1993:27-28).

Interferencia de las lagunas

Las lagunas generan ciertas tensiones que compiten con las propias de la imagen pictórica, ya que no permiten al ojo efectuar una lectura equilibrada de la imagen, y producen una sensación equívoca, generalmente, desagradable. Esa duda hace imprecisa la lectura y afecta al juicio perceptual del observador. Ante estas situaciones confusas o ambiguas, el esquema visual deja de determinar lo que se ve y entran en juego otros factores subjetivos del observador, tales como su foco de atención o su preferencia por alguna dirección determinada (Arnheim, 1994:27).

En la obra pictórica contemporánea, la perturbación estética ocasionada por las lagunas puede resultar incluso más grave que en obras antiguas, ya que, en general, la esencia o principio de la pintura actual se basa con frecuencia en efectos cromáticos (Althöfer, 1991:85-86).

Valor negativo de la laguna

Si se considera la obra de arte como una unidad, una laguna actúa sobre ella fragmentándola, al interrumpir su plano figurativo y cromático. Cuando se deteriora esa conexión, la lectura natural de la obra resulta difícil en muchos casos debido a que la laguna asume una

función que no le corresponde, haciéndose, así, más notoria su presencia en forma de figura en un primer plano.

Esta interrupción o fragmentación de la imagen en la obra de arte ocasionada por las lagunas se puede restituir ya que, según Brandi (1993:25-26):

[...] la obra de arte, al no constar de partes, si está fragmentada físicamente, deberá continuar subsistiendo *potencialmente* como un todo en cada uno de sus fragmentos, y esta *potencialidad* será exigible en una proporción directamente vinculada con la huella formal que ha sobrevivido a la disgregación de la materia en cada uno de los fragmentos.

La obra como un todo

Para restablecer el potencial expresivo de la obra se recurre a neutralizar el carácter negativo que la laguna tiene sobre la misma, reduciendo el valor emergente que la laguna asume respecto a la obra, de figura a fondo (Brandi, 1963:150). Para ello, la laguna deberá asumir un valor de nexo de unión de las partes o fragmentos originales existentes y no de interrupción como pérdida, tratando por otra parte, de que quede patente su existencia en la obra como un hecho ligado al tiempo-vida de la misma (Casazza, 1992:65; Philippot, 1959:5; Pincas, 1991:292). La intervención que trata de resolver esta ambivalencia, dentro del proceso de restauración de la obra, se denomina reintegración. Este proceso se establece como una hipótesis crítica, es decir, como proposición sujeta a posibles modificaciones (Philippot, 1959:11).

Neutralizar la laguna

Reintegración

Así pues, mediante el proceso de reintegración, se consigue recomponer la unidad estética de la obra al situar la laguna en el plano que le corresponde, o lo que es igual, se obtiene su integración en el contexto, estableciendo un equilibrio cromático (Malavoy, 1988:129); asimismo, se intenta no modificar los aspectos formales de la misma y se valoran en su justa medida las partes originales. Se pretende, en fin,

Unidad estética

que el tratamiento de la laguna tenga una solución que no perjudique el futuro de la obra y no altere su esencia (Brandi, 1963:151).

*Inicio de la
reintegración*

Limpieza

Dentro del proceso de restauración de la obra, la fase de reintegración tiene lugar una vez estucadas las lagunas y efectuada la limpieza de la capa pictórica, y una vez aisladas estas intervenciones por una capa de barniz de retoques.

Estucado

Con la primera fase citada -estucado de las lagunas-, se consigue una continuidad matérica, nivelando la superficie de éstas con la del estrato pictórico¹; este proceso se puede considerar como una primera fase de la reintegración, ya que la calidad de su ejecución afecta notoriamente a los resultados posteriores de la reintegración cromática. En cuanto a la segunda fase, eliminación del barniz alterado, así como de las materias extrañas depositadas, indicar que permite efectuar la reintegración de las lagunas con respecto a los colores de la obra, libres de enmascaramientos que los distorsionen² (Bergeon, 1996:20; Sánchez y Dalmau, 1997:126-127). Por último, la capa de barniz de retoques aísla la intervención de reintegración con respecto a la capa pictórica original y además reactiva la intensidad de los tonos, facilitando así la igualación cromática entre la intervención y el original.

*Exigencias
técnicas*

La reintegración cromática exige tanto una interpretación crítica apoyada en una sensibilidad artística, como una cultura histórica y estética (Brandi, 1963:146; Philippot, 1959:6). Por otra parte, el restaurador debe ser consciente de que es inevitable la influencia del periodo histórico en el que vive y su visión cultural de percibir la obra; así, el acto concreto de reintegración debe reconocerse como una

¹ Los equivalentes a texturas o empastes de materia de la capa pictórica original, nunca se deben obtener por relieve del color aplicado, sino por el del estuco; aplicando en la reintegración una fina película de color (Bergeon, 1996: 26).

² La variación de los colores es muy frecuente debido al amarilleamiento del barniz, así, por ejemplo, colores azules aparecen como verdes y blancos como amarillos.

intervención sujeta a la relatividad del momento (Scicolone, 1993:111) y, por lo tanto, susceptible de ser mejorada en el futuro.

Es a partir del año 1945 cuando se empieza a utilizar la palabra *reintegración* en los Institutos de Restauración de Roma y Bruselas (Legorburu, 1995:254). Se emplea el término *reintegración* y no el término *retoque* (a veces usado por algunos autores especialmente en el pasado), debido a que este último ha tenido históricamente una connotación de imitación y de repinte³ del original (James, 1991:219), lo que pudiera inducir a error ya que en todo momento la reintegración deberá limitarse estrictamente al contorno de la laguna, sin exceder de sus bordes y no invadiendo lo más mínimo las zonas adyacentes de la capa pictórica.

*Reintegración
versus Retoque*

Con carácter general, la reintegración cromática contempla los problemas de índole estético en relación a la intervención en la obra de arte. Teniendo en cuenta los aspectos mencionados, puede decirse que consiste en la integración cromática de las partes que faltan en la obra de arte, a fin de conseguir que ésta sea legible nuevamente; este proceso debe llevarse a cabo sin que intervenga la inventiva del restaurador.

Brandi (1993:14-15), en su obra *Teoría de la restauración*, crea un pensamiento filosófico sobre la obra de arte, situándola ante el espectador en el tiempo y en el espacio en sus dos aspectos, estético e histórico.

El valor de la obra de arte se deriva siempre de su conjunto y originalidad, de su ser inimitable. Por ello, la inserción de un material extraño es grave, bien sea desde el punto de vista histórico o matérico (Scicolone, 1993:112). Para respetar la estructura matérica original de la

Reversibilidad

³ Según Calvo (1997:189), se denomina repintes "[...] a las capas de color aplicadas sobre una pintura o decoración policroma con intención de reparar u ocultar daños existentes en el original, total o parcialmente, o de modificar su aspecto. Están realizados en época posterior a la conclusión de la obra, por artistas diferentes a los autores".

obra, la reintegración debe ser llevada a cabo usando materiales reversibles, que no interaccionen con los restos originales (Legorburu, 1995:350).

De acuerdo con el segundo principio de la restauración citado por Brandi (1993:17), el cual dice:

[...] la restauración debe dirigirse al restablecimiento de la unidad potencial de la obra de arte, siempre que sea posible sin cometer una falsificación artística o una falsificación histórica y sin borrar huella alguna del transcurso de la obra de arte a través del tiempo.

el proceso de reintegración quedaría imposibilitado, así como cualquier intervención, si no se adopta una actitud crítica frente a la obra.

Actitud crítica

Un deterioro tal como una laguna, sufrido por la obra como resultado de su propia existencia, y que interrumpe el ritmo establecido por la imagen, no debe prevalecer sobre la recuperación estética, siempre y cuando ésta pueda realizarse sin cometer una falsificación; por el contrario, otros tipos de deterioro no perturbadores en la lectura de la imagen, como por ejemplo las craqueladuras, pueden y deben permanecer⁴.

Este segundo principio de Brandi, delimita la restitución de la unidad potencial, con el fin de evitar que con ello se llegue a una falsificación artística o histórica.

⁴ Cabe matizar entre distintos tipos de craqueladuras: "de edad" y "de color o prematuras". Las denominadas craqueladuras "de edad" afectan a toda la materia pictórica, abarcando las capas profundas hasta la preparación; éstas, por lo general, no perturban la lectura de la obra. Por otra parte, las craqueladuras "de color o prematuras", se deben a defectos de secado de la capa pictórica (exceso de aceites secativos, falta de porosidad de la capa de preparación, etc.) y aparecen de manera prematura; pueden ser de tamaño considerable y perturbar la lectura de la obra por la ruptura de la capa pictórica final que deja aparecer la capa subyacente de otro color. La actuación sobre este tipo de craqueladuras "de color o prematuras", consiste en reducir su notoriedad, no obstante sin esconder esta característica particular de la técnica de ciertos artistas (Bergenon, 1996:25).

Lo primero, falsificación artística, sucedería si la reintegración de las lagunas existentes en la obra se realizara en base a hipótesis, tales como analogías documentales o estéticas, intentando de esta forma reconstruir la imagen. Este hecho, en sí mismo, es una falsificación que desvirtúa la impresión estética del original, ya que incorpora elementos extraños a su entidad.

*Falsificación
artística*

Respecto al segundo tipo de falsificación -histórica-, se hace patente la historicidad marcada por el tiempo, ya que su huella se encuentra en la misma materia, la cual no puede ser actualizada sin transgredir los límites del respeto de su propia historia; debiendo ser discernible la intervención efectuada con respecto al original.

*Falsificación
histórica*

Ante esta ambivalencia que presenta una obra, histórica y estética, son dos las posiciones críticas que puede adoptar el restaurador en cuanto a la reintegración de las lagunas o pérdidas en las obras de arte: no intervención o intervención.

La aplicación del primer criterio supondría una mera conservación arqueológica, en la que prevalece el aspecto histórico frente al estético. En algunos casos, tales como aquellos en los que la constitución, situación, extensión y número de las lagunas no afecten al valor estético de la obra, este criterio puede adoptarse, y con ello se podrán salvar ambos, el documento histórico y su unidad estética (Bergeon, 1990:197; Díaz, 1975:178). Otros factores que también pueden influir en la no intervención es el destino de la propia obra, es decir, si en el futuro va a ser expuesta, o bien permanecerá en depósito y, en este caso, si va a ser consultada frecuentemente o su acceso será restringido (Bello y Borrel, 1995:37). Asimismo, cuando su propia funcionalidad es la razón de un deterioro concreto puede ser interesante dejar perceptible las faltas ocasionadas en la materia pictórica para recordar su función original⁵ (Bergeon, 1990:194), o bien en el caso de

*No
intervención*

Factores

⁵ Los trazos del uso que tienen las obras según su función en una sociedad constituyen, lo que denomina Bergeon (1996:19), "la pátina de utilización".

que la laguna producida sea consecuencia de un hecho histórico relevante (Buces 1991:461). No obstante, la no intervención puede afectar de manera importante al ritmo establecido en la obra y, sobre todo, a la lectura natural de la misma.

Este tipo de proceder de "no intervención", con marcado carácter historicista, debe adoptarse con una actitud crítica ya que, de lo contrario, las obras de arte podrían convertirse en auténticas obras arqueológicas, perfectamente válidas para la historia, pero alejadas y ajenas al fin principal de su creación: su potencial estético (Marijnissen, 1967:372-373; Mora, Mora y Philippot, 1984:302).

Intervención

El segundo criterio -intervención-, comprende diversas formas de proceder, que se denominan técnicas de reintegración, todas ellas permiten dar una solución estética adecuada a una gran variedad de problemas y tienen como objetivo común llegar a restablecer el potencial expresivo de la obra. El empleo de una técnica concreta, así como el grado de acabado, estará determinado en función de una interpretación crítica de cada caso, ya que cada obra es distinta y por tanto también habrá de serlo su tratamiento. En la elección influirán una serie de factores, como son la extensión, el tamaño y la ubicación de las lagunas, la documentación existente, así como la funcionalidad, el estilo y el carácter de la obra (Bello y Borrel, 1995:37; Bergeon, 1990:194; Calvo, 1995:200-201; Ciatti, 1990:61; Legorburu, 1992:87; Legorburu, 1995:255; Philippot, 1959:9; Pincas, 1991:293). En resumen, la técnica elegida deberá ser la más acorde a las características individuales y a los problemas que cada obra presente.

Factores

De lo expuesto se deduce la dificultad de establecer unas normas metodológicas generales y precisas de actuación en la elección de la técnica de reintegración adecuada, que afronte los problemas de la reintegración de lagunas; por ello, dependerá en cada caso y en gran medida del criterio y sensibilidad del restaurador.

I.2.- TÉCNICAS DE REINTEGRACIÓN

I.2.1.- Reintegración invisible o ilusionista⁶

Con esta técnica, también llamada integral o imitativa, se plantea tanto la integración del color, como de la forma y textura de las zonas de la capa pictórica que muestran pérdidas. Este proceso se lleva a cabo de manera que no se distinga el área reintegrada del original, y muy frecuentemente, esta técnica llega a acercarse a una falsificación.

Fundamentos

En algunos casos este tipo de reintegración se guía por la imaginación y la fantasía del restaurador; se imita algo que no se sabe cómo era inicialmente lo cual supone una falsificación, salvo cuando existen documentos gráficos que lo atestiguan (Fernández, 1996:161).

Falsificación

La reintegración invisible o ilusionista se ha venido aplicando casi de forma exclusiva, desde los inicios de la historia de la restauración hasta principios del siglo actual (Macarrón, 1995:171); no obstante, aunque es cuestionada y desaconsejada por los nuevos criterios de restauración, se sigue utilizando a menudo, con la salvedad de que se ha incorporado el empleo de materiales reversibles. Algunos autores aconsejan la conveniencia de su utilización, como por ejemplo en cuadros de pequeño formato (Malavoy, 1988:131), o bien hacen una defensa de la misma en determinados tipos de intervenciones en las que no tenga opción la arbitrariedad creativa del restaurador (Bergeon, 1996:24; Legorburu, 1992:89; Legorburu, 1995:362-365).

Aplicación

Una buena ejecución de esta técnica hace que no sea posible apreciar o distinguir a simple vista la reintegración respecto de la parte original; para su identificación deberá recurrirse a métodos científicos, como el uso de lámparas de luz ultravioleta o la realización de análisis químicos. Sin embargo, con el transcurso del tiempo, la reintegración

Identificación

⁶ Según Bergeon (1996:27), la palabra *ilusionista* tiene su origen en el siglo XVIII, época en la que la reintegración es imitativa.

efectuada puede sufrir un envejecimiento individual y distinto al de la obra, lo que evidencia y pone de manifiesto su diferencia cromática respecto al original (Bello y Borrel, 1995:38; Malavoy, 1988:131).

Técnicas

Tradicionalmente, este tipo de reintegración se ha obtenido por la superposición de veladuras de tonalidad más oscura y caliente sobre un fondo de tono más claro y más frío que el original (Bergeon, 1996:24); todo ello con la finalidad de que la reintegración se funda ópticamente con el color adyacente. Asimismo, también se consigue mezclando los colores en la paleta hasta encontrar uno semejante al de la zona próxima que circunda la laguna.

Otra forma totalmente distinta de realizar esta reintegración ilusionista se basa en la reconstrucción siguiendo la misma sucesión de estratos que los de la obra a restaurar; a este método se le denomina "continuidad de estructura" (Bergeon, 1990:192; Bergeon, 1996:24).

Utilización

En muchos casos, el sistema de reintegración invisible o ilusionista viene exigido por los propietarios, galerías de arte, marchantes, anticuarios y coleccionistas y tiene, entre otras, como razón más noble, la de rodearse de cosas bellas, no de documentos; de ahí su deseo de restaurar objetos de valor (Bello y Borrel, 1995:38; Marijnissen, 1967:375). Frente a ellas, la reintegración visible, que se describe en el siguiente apartado, suele venir exigida principalmente por los museos (Malavoy, 1988:129), en donde las pérdidas son reconocidas como tales. Bajo esta consideración, las lagunas se mantienen en tonalidades neutras sencillas o con el tono de la imprimación, de tal forma que la intervención efectuada no pueda comprometer los posibles exámenes posteriores que se lleven a cabo.

1.2.2.- Reintegración visible

*Intervención
discernible*

Este sistema de reintegración trata de restablecer el potencial expresivo de la obra y a su vez mostrar con honestidad los deterioros,

tales como las lagunas, sufridos a lo largo de su existencia. Para cumplir esta doble exigencia -estética e histórica-, según menciona Brandi (1993:74), la reintegración debe ser fácilmente discernible visualmente por un observador al aproximarse a la obra y, por otra parte, resultar integrada en la misma cuando se contempla a cierta distancia.

Así, estableciendo como principio del sistema de reintegración visible, el reconocimiento o distinción de las áreas reintegradas con respecto a las partes originales de la obra, tanto a nivel estético como a nivel técnico, queda salvaguardada además de su integridad estética, propia de la reintegración, su integridad histórica (Prieto y Sánchez, 1997:19). Este principio se lleva a cabo efectuando la reintegración por medio de un código de signos discernibles del original.

Dentro de la reintegración visible se encuadran los siguientes métodos de reintegración:

I.2.2.1.- Tinta neutra

Este procedimiento tiene sus antecedentes en las especialidades de restauración arqueológica. Consiste en realizar una reintegración por medio de un supuesto tono neutro, resultado de la síntesis de todos los tonos de la obra, de forma que entonen en el conjunto y, además, sitúen las lagunas en un segundo término en la visión de la imagen (Bello y Borrel, 1995:39). Según Bergeon (1990:194), la elección del tono sería el semejante al color más frecuente en la obra.

Arqueología

*Tono neutro
general*

Este método, que en un principio puede considerarse como válido, sería aplicable siempre y cuando la tinta neutra se integrara con los colores propios de la obra; este hecho es ciertamente utópico, ya que la interacción del color siempre está patente y de modo distinto según sea el color adyacente (Albers, 1985:35-36, 53). Desde una perspectiva cromática puede decirse que la tinta neutra no existe objetivamente

*Interacción del
color*

Fragmentación (Bergeon, 1990:194; Legorburu, 1995:263; Ruhemann, 1968:257); por este motivo, la arbitrariedad en las interpretaciones del término *neutro* da lugar en la práctica a resultados poco satisfactorios como, por ejemplo, la fragmentación cromática de la obra, en la que existen áreas reintegradas con el supuesto color neutro que no mantienen relación alguna con el original (Díaz, 1975:178; Fernández, 1996:161; James, 1991:219).

Tono neutro general
Resultados desiguales

La aplicación de un tono neutro general en la totalidad de las lagunas presentes en la obra, sin tener en cuenta su ubicación y extensión, produce resultados distintos dentro de la misma. En algunas zonas, las lagunas pueden estar integradas y en otras, por el contrario, totalmente desentonadas (Legorburu, 1995:263). Como ya se ha mencionado en el párrafo anterior, este fenómeno es debido a la interacción del color neutro con los colores contiguos y, en concreto, a determinados efectos como es el de persistencia de la imagen o contraste simultáneo; efectos que originan una decepción cromática en la percepción del supuesto color neutro general (Albers, 1985:35-36, 53; Chevreul, 1969:1-4).

Efecto contrario

En estos casos en los que las lagunas desentonan con los colores circundantes se puede incurrir, además, en el predominio de la forma sobre el color, al generar límites apreciables en áreas determinadas, por lo que en algunos casos puede proporcionar un efecto totalmente negativo.

Limitaciones

El criterio general que se aplica es elegir un tono neutro más claro que el de los tonos adyacentes que presenta la obra (Legorburu, 1992:88); si bien, este sistema de reintegración no permite alcanzar la ilusión óptica que genere la sensación de volumen, ni restituir el aspecto matérico de los elementos representados en la obra (Marijnissen, 1967:379).

Los procedimientos por los que se puede llevar a cabo la reintegración con tinta neutra son varios; puede realizarse con un *tratteggio*, unas veladuras o un puntillismo, según se describe en los apartados siguientes (Bergeon, 1990:194).

Técnicas

Según sugiere Marijnissen (1967:378), esta técnica de reintegración puede ser considerada en ciertos casos, concretamente en obras en las que el tono general sea muy uniforme, sin contrastes cromáticos. No obstante, este método de reintegración neutra, unitaria o general, tiende a ser rechazado en el campo de la pintura.

Aplicación

1.2.2.2.- *Tratteggio* o *Rigattino*⁷

Este sistema tiene su origen en el Instituto Centrale del Restauro de Roma⁸, y está inspirado en la teoría de la restauración de Cesare Brandi (Bergeon, 1990:193; Brandi, 1963:149). Para conseguir el color de la reintegración, se basa en generar una ilusión óptica, obtenida por la división de los colores y su posterior mezcla visual. Althöfer (1991:86) define este sistema como la versión italiana del puntillismo.

Fundamentos

Ilusión óptica

La reintegración se realiza a partir de colores puros, mediante la aplicación de una serie de pequeños trazos paralelos y verticales superpuestos y yuxtapuestos. La recomposición del tono surge en el ojo del espectador gracias a la persistencia de las imágenes luminosas sobre la retina; efecto que permite obtener una equivalencia cromática del área reintegrada con respecto al original adyacente. Por otra parte, su diferencia con el original queda patente al contemplarse a una distancia próxima, puesto que el aspecto que presenta es el de un entramado de trazos (Fig. I.2).

⁷ Se utiliza el término *rigattino*, quizás más difundido en España, como equivalente de *tratteggio* usado en Italia, según N. del T. del libro de Cesare Brandi: *Teoría de la restauración*, Madrid, Alianza Forma, 1988, pág. 74.

⁸ El *tratteggio* fue elaborado por los restauradores Laura y Paolo Mora, entre 1945-1950 (Bergeon, 1996:27).

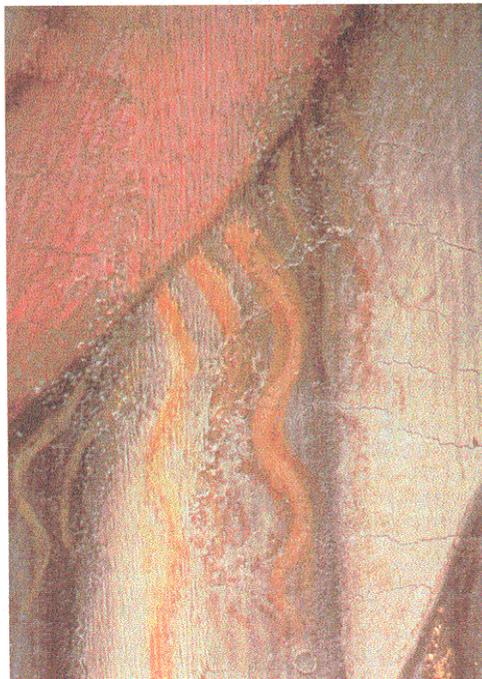


Fig. I.2. Detalle de una reintegración cromática realizada mediante *tratteggio* (Bergeon, 1996:22).

La reintegración así efectuada puede prestarse a confusión respecto al color original, en el caso de que su ejecución se realice sin ninguna o poca calidad y no permita apreciar los trazos efectuados, o bien, se ejecuten unos trazos intensos y gruesos que haga prevalecer el aspecto formal de los mismos sobre el efecto cromático que se persigue.

Exigencias técnicas

Su ejecución necesita de unas exigencias técnicas específicas, entre ellas su realización sobre un estuco blanco, ya que la luminosidad de éste crea una superficie reflectante para los trazos de los colores puros que se utilicen.

Procedimiento

Básicamente, este método de reintegración tiende a realizarse con la aplicación de tres colores. Los primeros trazos configuran un tono base y se disponen a intervalos iguales y equivalentes al grosor del trazo. Estos intervalos se rellenan posteriormente con un color diferente y después con otro, hasta obtener por yuxtaposición y superposición de

colores el tono y modelado deseado. Los trazos pueden ser más o menos finos, próximos y adaptados según la dimensiones de la obra (Mora, Mora y Philippot, 1984:309).

Su aplicación es compleja, lenta y laboriosa, ya que los trazos se realizan con pinceles muy finos y los resultados obtenidos no siempre son los deseados. A la laboriosidad de ejecución de esta técnica, hay que añadir la dificultad de obtener pinceladas que sean nítidas en los trazos, es decir, sin discontinuidad y sin formar gotas en la parte inferior de los mismos, de manera que comiencen y terminen en forma aguda. Cada uno de los trazos ha de ser por sí mismo poco intenso, con el fin de conseguir la intensidad por su yuxtaposición y superposición y no por la fuerza del color (Mora, Mora y Philippot, 1984:309).

Inconvenientes

Una variación de este procedimiento de reintegración es el denominado *tratteggio modulato* o *matizado*, donde el color de los trazos puede variar a lo largo de su trayecto (Bergeon, 1990:193; Pincas, 1991:294); este sistema permite obtener un grado de reintegración más elevado y mantener a simple vista su carácter discernible.

*Tratteggio
modulato*

Cuando estas reintegraciones se llevan a cabo sobre lagunas extensas o de formas poco complejas, tales como áreas monocromas, la vibración del rayado tiende a generar una imprecisión perceptual (Legorburu, 1995:260; Mora, Mora y Philippot, 1984:310).

I.2.2.3.- Puntillismo

El método del puntillismo consiste en la aplicación de múltiples puntos de colores puros yuxtapuestos y superpuestos (Fig. I.3). Al igual que el *tratteggio*, este sistema tiene sus antecedentes en el principio de contraste simultáneo de los colores de Delacroix, en el impresionismo donde los colores son obtenidos por trazos yuxtapuestos y, más concretamente, en los neo-impresionistas en cuanto a la descomposición

Fundamentos

de colores y yuxtaposición de colores puros; aspecto que en la actualidad lo podemos encontrar en distintas disciplinas tales como la televisión en color y, más concretamente, en los sistemas de reproducción de los colores impresos; todos estos sistemas se basan en las leyes de mezcla cromáticas.



Fig. I.3. Detalle de una reintegración cromática efectuada mediante la técnica de puntillismo (Bergeon, 1996: 23).

Aplicación

Este procedimiento de reintegración, más flexible que el *tratteggio*, se adapta muy bien a las obras cuya técnica original está marcada por un cierto puntillismo, o bien en pinturas con soporte de tela, en los que se aprecia un aspecto más o menos punteado, originado por la propia textura del soporte. En general, este procedimiento se adecua a distintos tipos de obras de épocas diferentes, obteniéndose, normalmente, resultados óptimos (Legorburu, 1995:261).

Dependiendo del trazado de los puntos en cuanto al tamaño y espaciado, la reintegración será discernible a simple vista o bien parecerá poco visible en los casos límite, donde los puntos realizados sean tan minúsculos que el ojo no pueda apreciarlos si no es con la

ayuda de un instrumento óptico de aumento (Bergeon, 1990:194; Pincas, 1991:295).

Al igual que en el *tratteggio*, en este caso es necesario partir de un fondo de color blanco para dar la mayor luminosidad posible a los colores que se aplican.

Exigencias

La tarea de reintegrar una superficie de dimensiones considerables punto a punto y en varias capas y colores, supone una lentitud y laboriosidad notables en relación con el porcentaje de tiempo empleado en el proceso de restauración de la obra.

Lentitud y laboriosidad

I.2.2.4.- Veladuras

Este procedimiento se aplica cuando en un cuadro la pintura original existe pero resulta borrosa o poco evidente en determinadas áreas, debido al desgaste de la capa pictórica (Legorburu, 1995:262), o bien falta la capa pictórica, pero la capa de preparación subsiste todavía (Bergeon, 1990:193; Pincas, 1991:295).

Aplicación

La reintegración se efectúa por medio de veladuras de color muy sutiles que procuren transparencias y permitan visualizar toda la subcapa y la información que conlleva.

Procedimiento

Este procedimiento es suficiente para restablecer a cierta distancia el equilibrio cromático general de la obra.

I.2.2.5.- Abstracción cromática - Selección cromática

Se trata de dos soluciones propuestas por Umberto Baldini y Ornella Casazza para la reintegración cromática de lagunas; la



aplicación de uno u otro sistema está relacionado con el tamaño y la situación de éstas en la superficie pictórica original.

Selección cromática

La *selección cromática* se realiza cuando es posible establecer una unión cromática o formal, o bien, cromática y formal, entre la laguna y el color circundante, sin que se produzca en ningún caso una actuación arbitraria que derive en un acto de imitación o falsificación (Casazza, 1992:30).

Abstracción cromática

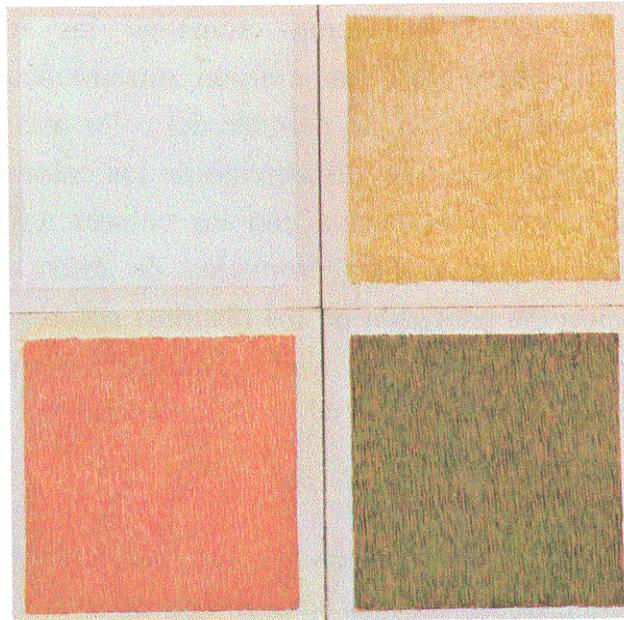
La *abstracción cromática* se aplica cuando por la localización o extensión de la laguna, no es posible realizar una selección cromática sin caer en una actuación interpretativa o arbitraria, como por ejemplo, una laguna importante circundada de varios colores (Baldini, 1983:36; Casazza, 1992:65; Ciatti, 1990:60).

Procedimiento

Las técnicas de selección y abstracción cromática se sirven de pequeños trazos aplicados en varias capas de color superpuestos a cobertura, de modo que una parte de cada uno de los colores parciales esté siempre visible (incida en el ojo de forma pura) y otra parte se mezcle combinándose con los colores adyacentes y subyacentes.

El método consiste básicamente en una progresión, como se muestra en la figuras I.4 y I.5. Durante la primera etapa se aplican una serie de trazos puros monocromos correspondientes al primer color. En la segunda se disponen los trazos puros del segundo color, de manera que una parte de los mismos muestran, por transparencia, el resultado de su mezcla con los trazos del primer color. De igual modo, en la tercera etapa se aplican los trazos puros del tercer color; una parte de éstos muestra el color puro y otra correspondería a un color compuesto, resultado de su mezcla con el primero y el segundo color (Baldini, 1988:54-55; Casazza, 1992:29-32).

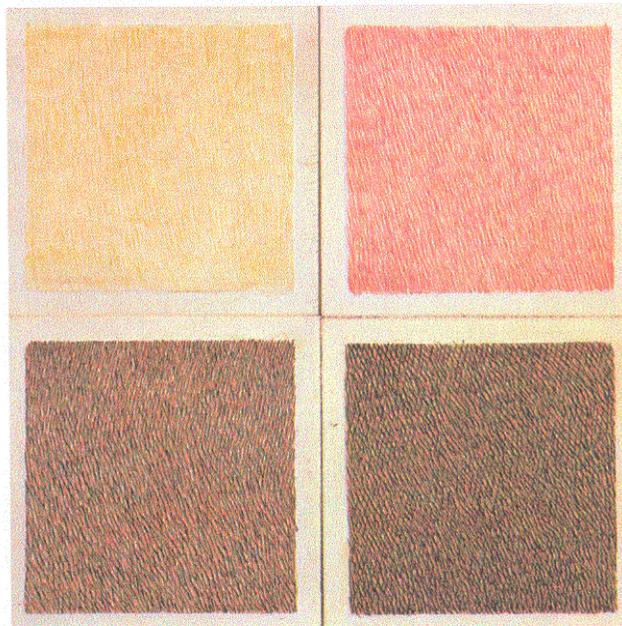
Fig. I.4. Muestra del proceso de reintegración del oro según el método de selección cromática. El color amarillo estaría en relación con el color que define al oro, el rojo en relación con color cálido del bol y el verde en relación al color frío de su transparencia (Baldini, 1988:92, 174).



La abstracción cromática difiere en su ejecución de la selección en que los trazos son realizados entrelazando las pinceladas ligeramente oblicuas de la segunda etapa a la última (Fig. I.5); de esta forma se consigue un entramado de signo homogéneo y variado de colores superpuestos (Casazza, 1992:69).

Abstracción cromática: ejecución

Fig. I.5. Ejemplo del proceso de abstracción cromática por sucesiva yuxtaposición de diversos trazos de colores; el tejido pictórico final presenta una vibración cromática dinámica (Baldini, 1988: 91, 173).



*Selección
cromática:
ejecución*

En la selección cromática los trazos deben ser lo más homogéneos posibles, con un trazado acorde con la representación pictórica original; se procede del color más claro al más oscuro en las distintas etapas de disposición de los colores (Casazza, 1992:36). Para la unión de la laguna con los colores adyacentes se deberá realizar primero un análisis cromático de éstos, con el fin de obtener la selección adecuada de los distintos colores a través de los cuales, una vez aplicados en la laguna, ésta pueda alcanzar la identidad cromática que sirva de nexo de unión respecto al color adyacente (Casazza, 1992:34).

En las obras en las que se efectúa la abstracción cromática, la unión de las lagunas se hace con un tono neutro general (Fig. I.6), que debe contener de forma separada los valores medios de los colores existentes en la obra y ser capaz de asumir valor "cero" (Baldini y Casazza, s.a.; Casazza, 1992:66); este aspecto es bastante relativo y cuestionado pues, como se ha citado, la interacción del color es un hecho determinante en los resultados cromáticos de la reintegración efectuada.

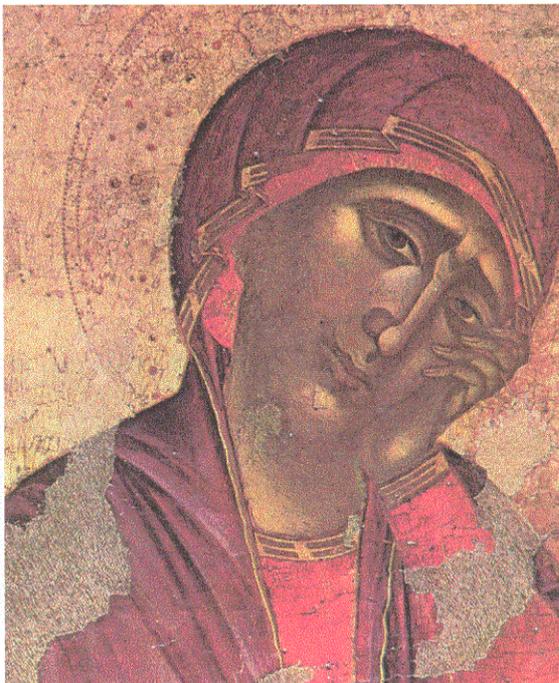


Fig. I.6. Fragmento correspondiente a la obra del *Cristo de Cimabue*, reintegrada mediante la técnica de abstracción cromática (Baldini y Casazza, s.a:123).

El resultado de la abstracción y selección cromática aplicado en las lagunas, es percibido por el ojo como una vibración cromática dinámica, producto de la mezcla óptica y cromática que se genera en las diversas etapas de superposición de colores realizadas.

I.3.- EXIGENCIAS TÉCNICAS

En la actualidad, el objetivo que se intenta conseguir con la reintegración es devolver a la obra su legibilidad desde un punto de vista estético, pero salvaguardando al mismo tiempo los valores documentales que lleva implícitos; para ello, la intervención está sujeta a una serie de principios éticos considerados fundamentales (Brandi, 1993:75; Buces 1991:461; Legorburu, 1995:256-257, 267; Macarrón, 1995:183; Pincas, 1991:293); entre ellos cabe citar los siguientes:

Principios

- Deberá *limitarse estrictamente al área* que comprende el contorno de las lagunas, sin exceder sus bordes ni invadir las zonas de pintura original.
- *No deberá ser hipotética o por analogía*, con objeto de evitar falsificaciones o confusiones miméticas. Este aspecto no se cumple de forma íntegra en el tipo de reintegración invisible o ilusionista, siendo éste uno de los motivos por el que se cuestiona la aplicación de este sistema.
- Deberá ser *fácilmente identificable o reconocible*⁹.
- Deberá ser *reversible*¹⁰, es decir, debe poder eliminarse con facilidad cuando interese, sin que esto suponga un peligro para

⁹ Es a partir de mediados del siglo actual, 1940-1945, cuando se exige en toda intervención de restauración los principios de legibilidad, reversibilidad y estabilidad.

¹⁰ Bergeon (1996:26), define dos tipos de reversibilidad: una *física*, que implica la posibilidad física de extraer la materia aplicada, y otra *química*, significa que si la materia es disuelta para ser aplicada, permanezca soluble en el disolvente utilizado.

la pintura original adyacente; esto conlleva la elección de materiales más endebles que el original.

- Se deberán *utilizar materiales estables* que sean permanentes en su envejecimiento e inoocuos con respecto a la materia original; por tanto, antes de su utilización estarán suficientemente probados.
- Deberá *documentarse exhaustivamente la intervención efectuada*.

Técnicas de ejecución

Las técnicas pictóricas utilizadas en la ejecución de los distintos sistemas de reintegración revisados son varias; por lo que se hace necesario conocer las ventajas e inconvenientes que cada una de ellas presenta, con el fin de poder determinar su mejor adaptación al procedimiento de reintegración elegido, así como a la propia técnica pictórica utilizada en la obra.

Aglutinante

Con independencia del sistema de reintegración adoptado, en la selección del aglutinante a utilizar, además de las características generales de estabilidad y reversibilidad, es necesario valorar una serie de propiedades (Scicolone, 1993:113-114):

- Debe ser capaz de *formar una película elástica* que conserve sus propiedades iniciales de flexibilidad, con el fin de evitar la aparición de craqueladuras.
- *No debe generar reacciones de incompatibilidad* con los pigmentos que aglutina.
- Es necesario que el *componente volátil no presente problemas de retención*, a fin de que el aglutinante tenga la máxima eficacia.

- El grado de volatilidad del disolvente deberá permitir una *aplicación cómoda*.
- Por último, es necesario considerar la *viscosidad del aglutinante*, la cual variará en función del grado de dilución y de la naturaleza de sus componentes. Esta propiedad influye en la facilidad de aplicación de los trazos o capas.

En relación a los pigmentos, deben utilizarse los considerados más puros y estables, con el fin de evitar posibles alteraciones futuras.

Pigmentos

En comparación con otras técnicas, la acuarela¹¹ presenta las ventajas de secar rápidamente, conservar su solubilidad en agua, no amarillear con el paso del tiempo y, debido a su resistencia a los disolventes orgánicos, permitir la eliminación del barniz posterior. Por otra parte, como inconvenientes se encuentran su falta de elasticidad, la susceptibilidad al crecimiento de microorganismos y la variación notable del color en el barnizado (Gómez, 1994:161; Legorburu, 1995:267-269; Pincas, 1991:293). El aspecto óptico de la mayoría de las pinturas murales al fresco se adecua a los resultados obtenidos con la reintegración efectuada con acuarela.

Acuarela

Ventajas

Inconvenientes

La técnica al óleo no debe ser utilizada por razones de reversibilidad y estabilidad, en cuanto que presenta tiempos y características de envejecimiento negativos y, por lo general, tratarse de la misma técnica pictórica que en su origen se utilizó para realizar las obras.

Otra técnica pictórica que, según Lank (1990:156-157), puede emplearse en la mayoría de los sistemas de reintegración e incluso preferible a la acuarela, es el temple al huevo; una vez barnizado tiene

*Temple al
huevo*

¹¹ La acuarela utiliza como aglutinante gomas vegetales como la goma arábica o tragacanto (polisacáridos).

la apariencia de una pintura al óleo oxidada¹², lo que supone una ventaja para la reintegración de este tipo de obras.

*Resinas
terpénicas*

El empleo de resinas terpénicas es poco recomendable, ya que sus propiedades mecánicas no son lo suficientemente estables, pierden solubilidad y amarillean con el paso del tiempo; comportamiento que ha quedado constatado en la restauración de obras antiguas en las que fueron utilizadas. Los mismos inconveniente presentan las resinas de policiclohexanona, actualmente muy utilizadas en la elaboración de barnices artísticos (Calvo, 1997:189; Gómez, 1994:161; Legorburu, 1995:271-273; San Andrés *et al.*, 1995:96).

*Resinas de
policiclohe-
xanona*

*Alcohol de
polivinilo*

El alcohol de polivinilo utilizado como aglutinante para la reintegración, tiene como ventajas su solubilidad en medio acuoso y la posibilidad de formar películas elásticas y resistentes a la luz; sin embargo, presenta como inconvenientes la pérdida de solubilidad con el envejecimiento, en presencia de luz o calor (Horie, 1994:97; Kühn, 1986:162)

*Resinas
acrílicas y
vinílicas*

Por último, señalar la utilización de resinas de poliacetatos de vinilo y las resinas acrílicas; en comparación con las resinas naturales, presentan unas mejores propiedades mecánicas y ópticas de envejecimiento y tienen como ventaja su posible utilización en dispersiones acuosas.

*Poliacetatos
de vinilo
versus
Resinas
acrílicas*

Frente a las resinas acrílicas, los poliacetatos de vinilo ofertados por el mercado actualmente, presentan peores propiedades de envejecimiento, entre ellas, una menor flexibilidad y un mayor amarilleamiento que incluso puede llegar a ser el doble (Down *et al.*, 1996:34-39). Dentro de la gama de resinas acrílicas, la más utilizada es

¹² Contrario a lo que la experiencia demuestra, Lank (1990:157) cita como ventaja de este sistema su reversibilidad, pudiéndose eliminar la reintegración efectuada, después de muchos años, mediante la utilización de agua y un disolvente orgánico como white spirit; quizás la afirmación de Lank se debe a que el temple al huevo es utilizado en una proporción muy diluida (50%), y por otra parte, su aplicación se hace sobre una fina capa de barniz reversible.

el Paraloid® B-72,¹³ debido en parte a su solubilidad y estabilidad; se trata de un copolímero de metacrilato de etilo y acrilato de metilo. En general, las resinas acrílicas son fáciles de manipular tanto en veladuras como en capas cubrientes y permiten una rápida superposición de estratos gracias a su rápido secado (Gómez, 1994:161-162; Legorburu, 1995:273-276; Pincas, 1991:294; Ruhemann, 1968:254-255).

No obstante, existe la posibilidad de combinar varias técnicas; por ejemplo, se puede realizar una primera entonación con acuarela y un acabado final con una técnica a base de una resina sintética (Calvo, 1997:189; Gómez, 1994:162).

*Combinación
de varias
técnicas*

I.4.- ASPECTOS CROMÁTICOS

Con carácter previo, es necesario señalar que el color es el elemento más relativo de los medios que emplea el arte. Al efectuar la reintegración hay que partir del hecho de que en la percepción visual, el color se ve muy pocas veces como es en realidad, como es físicamente; por tanto deberá tenerse en cuenta que un mismo color puede evocar varias lecturas.

*Relatividad del
color*

La reintegración suele iniciarse con un barnizado previo de todo el cuadro, utilizando para ello un barniz específico de retoques¹⁴, esta fina y regular capa de barniz cumple dos objetivos:

*Barniz de
retoques*

- a) *Facilitar la posterior igualación del color, ya que es muy difícil la reintegración entonada con el original sin una intensificación previa de sus colores.*

¹³ El Paraloid® B-72 químicamente es un copolímero de metacrilato de etilo / acrilato de metilo en la proporción 70/30; es producido por ROHM and HAAS, Rohm & Haas Co., Independence Mall West, Philadelphia, Pa. 19105, (Estados Unidos de América).

¹⁴ Según Pincas (1991:296), los barnices de retoque que se comercializan, están constituidos a base de resinas cetónicas o de resinas de polimetacrilato de isobutilo, con un índice de refracción similar al de las resinas de origen vegetal como la dammar o resina mastic.

- b) *Aislar el original* de todas las posteriores intervenciones que se realicen; de esta forma, si fuera necesario, es posible proceder a la eliminación de las reintegraciones efectuadas, sin riesgo para el original.

Ejecución

El color no debe utilizarse en exceso, únicamente la cantidad suficiente para ocultar el estuco subyacente; de esta manera se evita una acumulación de pigmento que impediría obtener la transparencia deseada. Por superposición de tonalidades o en veladuras, los colores han de ser preparados con suma limpieza (Doerner, 1991:291-292). En la mayoría de los sistemas de reintegración *tratteggio* o *rigattino*, puntillismo, abstracción y selección cromática, no es conveniente utilizar más de tres colores en la obtención de un color final, ni realizar mezclas antes de su aplicación; el incumplimiento de estas observaciones irá en detrimento de la vibración del color resultante, que no armonizara cromáticamente con el color circundante a reproducir.

Vibración cromática

En la intervención se parte del color blanco del estuco, por lo que se deberá jugar con la luminosidad que éste aporta, excluyéndose el uso de pigmento blanco adicional, ya que altera y rebaja la transparencia de los restantes colores; su utilización produce una sensación de colores *sucios*, acromáticos y, por lo tanto, no idóneos al tipo de pureza que se persigue como objetivo esencial (Casazza, 1992:30).

Alteraciones cromáticas

Las posibles alteraciones cromáticas, surgidas con el envejecimiento de los materiales utilizados, hacen que una reintegración que inicialmente fue realizada de forma correcta, con el transcurso del tiempo aparezca cromáticamente desequilibrada. Con el fin de evitar estas posibles alteraciones cromáticas, deben emplearse pigmentos puros y sin mezcla alguna; no obstante, si fuera necesario mezclarlos, debe restringirse el número de ellos con objeto de disminuir posibles riesgos durante la evolución de la reintegración (Bergeon, 1996:21; Pincas, 1991:293).

El desarrollo del proceso de reintegración debe realizarse bajo una serie de condiciones lumínicas específicas, tanto en su aspecto cromático como en intensidad.

Algunos estudios realizados en este sentido, consideran la conveniencia de realizar la observación de los originales de color en unas condiciones lumínicas determinadas, ya que su valoración correcta es fundamental. La respuesta cromática de colorantes y pigmentos varía según sean las condiciones de iluminación, por lo que resulta imprescindible mantener una iluminación normalizada durante todo el proceso.

*Condiciones
lumínicas*

Se considera que la fuente de luz más adecuada para este tipo de trabajo es la que posee un buen rendimiento de color¹⁵, en concreto semejante al emitido por la fuente de iluminación natural de la luz media del día (Küppers, 1994:9-10; Ruhemann, 1968:251; Staniforth, 1985:101; Thomson, 1986:207). En relación a estas características, se utiliza el iluminante normalizado D65, correspondiente a un espectro de emisión continuo¹⁶ y a una temperatura de color de 6.500° K. Este tipo de iluminante permite establecer una mayor diferenciación entre las zonas roja y azul del espectro. Así, se puede considerar este tipo de iluminación la más adecuada para desarrollar el proceso de reintegración. Dentro de los distintos tipos de iluminación artificial próximos a las características definidas, están entre otras, las lámparas

¹⁵ El rendimiento de color relaciona la apariencia cromática que una fuente de iluminación determinada provoca sobre un objeto, respecto a la obtenida con una fuente de iluminación patrón. Así, una fuente de iluminación presenta un buen rendimiento de color cuando la apariencia cromática del objeto iluminado es semejante a la obtenida bajo la fuente de iluminación patrón, en este caso del iluminante D65.

¹⁶ Se denomina espectro continuo de una luz emitida cuando, apreciada a través de sus componentes monocromáticos, éstos son adyacentes y emergen imperceptiblemente uno de otro, estando representadas con un valor apreciable todas las longitudes de onda. Sin embargo, en un espectro discontinuo o de líneas, las longitudes de onda son relativamente pocas y específicas.

fluorescentes¹⁷; presentan diferentes espectros de emisión según las sustancias fosforescentes empleadas en su elaboración¹⁸.

Metamerismo

Una vez efectuado el proceso de reintegración bajo una fuente lumínica de una temperatura de color concreta, la observación posterior de la obra ya reintegrada con otra fuente de iluminación cuya temperatura de color sea distinta a la utilizada durante la reintegración, en algunos casos puede evidenciar la existencia de desajustes cromáticos, que durante su ejecución no se percibían; esto es debido a los posibles colores metámeros existentes en la obra¹⁹ (Bergeon, 1996:21; James, 1991:221; Roire, 1988:64-68; Staniforth, 1985:101; Thomson, 1986:53).

Teoría del color

El conocimiento de la teoría del color encuentra una aplicación directa y fundamental en el aspecto cromático de la reintegración, ya que su aplicación hace posible reintegrar cualquier color a partir de sus características y componentes; estos datos permiten reproducir en el ojo el efecto de dicho color. Los colores base componentes del color a reintegrar, así como sus proporciones, no son conocidos *a priori* por el restaurador; son determinados, generalmente, bien mediante ensayos previos o tentativas, o bien rectificando durante la propia intervención. Esto supone una tarea laboriosa y su resultado es difícil de prever; no obstante, hay que señalar que el proceso de reintegración se verá

¹⁷ Las lámparas fluorescentes presentan relativamente, un débil espectro continuo del que emerge una fuerte radiación en ciertos puntos o bandas del espectro. Thomson (1986:54), describe algunas lámparas fluorescentes que presentan un buen rendimiento de color.

¹⁸ Por lo general, se obtiene un buen rendimiento de color usando una combinación de distintas lámparas fluorescentes, de manera que se compense los posibles carencias de emisión que tienen por separado (Kühn, 1986:146).

¹⁹ Staniforth (1985:102), pone como ejemplo una obra reintegrada en un estudio bajo una iluminación de luz día y vista después con iluminación de tungsteno. Los posibles colores metámeros existentes presentarán diferentes emisiones en las longitudes de onda largas (roja) del espectro. Esto es debido a que la luz de tungsteno emite relativamente en mayor grado en las longitudes de onda largas que la luz día y, por lo tanto, destacara más esta zona espectral de radiación. Así, una igualación metamérica realizada bajo luz día con una reflectancia en las longitudes de onda largas mayor que la pintura original, parecerá más rojiza bajo una iluminación de tungsteno.

favorecido según el dominio que el restaurador tenga de los fundamentos del color.

Por lo general, la ejecución de las técnicas de reintegración se basan en síntesis o mezclas cromáticas, como son las mezcla sustractiva y óptica.

*Leyes de
mezcla
cromática*

La *mezcla sustractiva*²⁰ tiene lugar cuando coinciden o se superponen dos o más colores aplicados en forma de trazos, puntos, o veladuras; el color resultante de la síntesis es distinto a los de partida. Este proceso se desarrolla en función de la transparencia de los colores utilizados, ya que en la medida que los colores empleados sean menos transparentes, surgen fenómenos de difusión además de absorción²¹; en este segundo caso, el proceso se conoce como mezcla sustractiva compleja (Billmeyer, 1981:139-141), cuyos resultados son más difíciles de predecir.

*Mezcla
sustractiva*

*Mezcla
sustractiva
compleja*

La *mezcla óptica*²², también llamada mezcla espacial, es una ilusión cromática que se produce en el ojo del observador, al contemplar a una cierta distancia la reintegración efectuada con trazos o puntos. Este proceso se fundamenta en la combinación y fusión en un nuevo color, de los puntos o trazos de diferentes colores que son percibidos simultáneamente; este fenómeno es debido a que los códigos de puntos o trazos realizados, son áreas estímulares demasiado pequeñas para ser resueltas individualmente por el mosaico de células receptoras en la retina. Este efecto óptico, de mezcla de los colores en nuestra percepción, ya fue utilizado en el siglo pasado por los neoimpresionistas y, particularmente, por los puntillistas (Lacomme,

Mezcla óptica

²⁰ Este apartado se desarrolla de forma más explícita en el cap. II, ap. II.2.1.1.2. *Mezcla sustractiva*, pág. 125.

²¹ Véase cap. II, pág. 85.

²² Este apartado se desarrolla de forma más explícita en el cap. II, ap. II.2.1.1.3. *Mezcla óptica*, pág. 135.

1993:42); asimismo, también es empleado para producir efectos de sombras en aguafuertes y dibujo, en los que se logra este efecto mediante trazos más o menos próximos (Agoston, 1987:208; Arnheim, 1994:399).

*Asimilación
o contraste
invertido*

Cuando se observa la reintegración, a una distancia lo suficientemente próxima para ver la estructura de trazos o puntos individuales, se produce el efecto cromático de *asimilación*, también conocido por los términos de efecto de *difusión de Bezold* o *contraste invertido*. En base a este efecto, los colores de los trazos o puntos que se perciben parecen aproximarse entre sí y cambiar de un color a otro. Según la teoría fisiológica propuesta por Jamenson y Hurvich (1975:125-131), la explicación a este fenómeno se debe a que los campos receptores de la retina son de tamaño variable; los más estrechos tendrán la suficiente capacidad de resolución para diferenciar los puntos o trazos de diferentes colores, mientras que los más anchos abarcarán diferentes trazos o puntos. Como consecuencia de lo anterior, se producen simultáneamente dos efectos: por un lado una buena resolución de los trazos o puntos de colores y por otro una mezcla promedio de los mismos (Agoston, 1987:208-209; Arnheim, 1994:398-399).

*Contraste
simultáneo*

Otro efecto cromático es el denominado *contraste simultáneo*, que tiene lugar cuando se observa de forma global la reintegración efectuada en relación a los colores limítrofes originales; tiene especial importancia en las reintegraciones unitarias o generales (tinta neutra y abstracción cromática). Este efecto es responsable de que una misma tonalidad neutra, bajo unas condiciones de iluminación y contemplación, se aprecie cromáticamente distinta en cuanto a luminosidad y tono según sea el color adyacente; así, una determinada tonalidad sobre un fondo neutro parecerá más intensa, mientras que sobre un fondo de color aparecerá más neutral, o bien un color podrá parecer claro sobre un fondo oscuro y este mismo color, sobre un fondo claro, parecer más oscuro. Este efecto cromático es el motivo por el cual

no se consigue obtener resultados satisfactorios en las reintegraciones unitarias (tinta neutra y abstracción cromática).

En resumen, los distintos efectos cromáticos que pueden tener lugar, según la distancia de observación de una reintegración en una obra, serán los siguientes: a una distancia normal se produce la mezcla óptica de los trazos, o puntos de las áreas reintegradas; a esta misma distancia también puede producirse el fenómeno de contraste simultáneo entre el área reintegrada y el color adyacente; por último una aproximación a la obra que permita observar los detalles de la reintegración (puntos, trazos) hará posible experimentar el fenómeno de asimilación.

En los párrafos anteriores se han expuesto los efectos cromáticos que interaccionan en las sensaciones de color y que están influenciados por los colores limítrofes, sin embargo, según una serie de razones fisiológicas complejas, los estímulos cromáticos se experimentan con referencia a un mundo conocido, producto de una serie de asociaciones. Esto hace que en ocasiones un color se perciba como si avanzase y otro como si retrocediese, o bien parezca que *pese* más o menos que otro, incluso que tenga dinamismo o inmovilidad²³.

*Asociaciones
subjetivas*

El criterio dinámico de avance o retroceso en la percepción óptica del color, generalmente, se corresponde con la temperatura cromática del mismo, que establece como próximos a los colores cálidos y como lejanos a los colores fríos; no obstante, este criterio está en función del contexto en el que estén situados. De acuerdo a esta característica subjetiva, puede ocurrir que una incorrecta reintegración cromática de una laguna, visualmente parezca que está en un plano distinto al de la capa pictórica limítrofe.

²³ En relación a las características subjetivas del color, véase cap. II, ap. II.1.2.1, págs. 106, 107.

Técnicamente, la dificultad de llevar los tonos cálidos a fríos y los oscuros a claros hace recomendable iniciar la reintegración con colores fríos y claros.

Los efectos cromáticos tales como colores complementarios, contraste simultáneo y similares, que en general refuerzan la función de los colores, así como el acabado de la estructura de la superficie cobran especial importancia en la expresión plástica de la obra pictórica contemporánea (Althöfer, 1991:85). Por esta razón en estos casos es necesario efectuar un grado de reintegración más elevado, con el fin de poder hacer una correcta lectura de la obra. En este tipo de obras se acusa particularmente los defectos cromáticos que aparecen en la reintegración de estructuras matéricas no reproducibles (metales, tejidos, etc.); a esto hay que añadir la problemática general de su restauración, debido fundamentalmente a la falta de costumbre en la realización de una correcta lectura de la obra de arte contemporánea, así como al insuficiente conocimiento de los materiales utilizados por el artista (Scicolone, 1993:111-112).

II. FUNDAMENTOS DEL SISTEMA DE REINTEGRACIÓN QUE SE PROPONE

Sumario: II.1.- Principios teóricos del color. II.1.1.- Estímulos de color-sensación cromática. II.1.1.1.- Luz. II.1.1.2.- Interacción luz-materia. II.1.1.2.1.- Reflexión. II.1.1.2.2.- Refracción. II.1.1.2.3.- Transmisión. II.1.1.2.4.- Dispersión. II.1.1.2.5.- Absorción. II.1.1.2.6.- Difracción. II.1.1.3.- Percepción luz-color. II.1.2.- Características y especificación del color. II.1.2.1.- Características subjetivas del color. II.1.2.2.- Características objetivas del color. II.1.2.3.- Especificación del color. II.1.2.3.1.- Cubo de Hicethier. II.1.2.3.2.- Sistema CIE. II.2.- Reproducción del color. II.2.1.- Principios básicos de la reproducción del color. II.2.1.1.- Leyes de mezcla cromática. II.2.1.1.1.- Mezcla aditiva. II.2.1.1.2.- Mezcla sustractiva. II.2.1.1.3.- Mezcla óptica. II.2.2.- Aspectos técnicos. II.2.2.1.- Función del soporte. II.2.2.2.- Función de los pigmentos. II.2.2.3.- Función de los puntos de medio tono. II.2.2.3.1.- Forma de los puntos. II.2.2.3.2.- Tamaño de los puntos. II.2.2.3.3.- Espaciado entre los puntos. II.2.2.3.4.- Distribución de los puntos. II.2.2.3.5.- Orientación de los puntos. II.2.2.3.6.- Percepción cromática de un diseño de puntos. II.2.2.3.7.- Fondos Tramados Transferibles (FTT).

II

Fundamentos del sistema de reintegración que se propone

Las bases teóricas del Sistema de Reintegración Cromática Asistido por Medios Transferibles (SIRECRAMT) se establecen, con carácter general, de acuerdo con los fundamentos utilizados en la reproducción del color en el campo de las artes gráficas y, más concretamente, en la reproducción del color por tricromía. Básicamente consiste en analizar el color a reproducir en base a unos colores determinados, para su posterior restitución por mezcla óptica en el órgano visual del observador; en cierto modo puede relacionarse con el principio de la pintura neo-impressionista²⁴.

*Fundamentos
generales*

Tanto los principios teóricos del SIRECRAMT como su finalidad, son básicamente los mismos que los correspondientes a los

²⁴ Señalar que en la técnica de los impresionistas básicamente se pretende obtener una impresión cromática visual a partir de la mezcla aditiva de las radiaciones luminosas emitidas por distintos toques de colores puros yuxtapuestos (Carson, 1944:5), sin embargo, en la reproducción del color en las artes gráficas además de la mezcla aditiva se produce también, en el área de la imagen donde los puntos de color se superponen, una mezcla sustractiva del color.

sistemas de reintegración visible²⁵ (*trateggio* o *rigattino*, puntillismo), si bien difiere en los medios utilizados para su desarrollo y en su metodología de aplicación.

Puesto que los fundamentos de este sistema giran en torno al color, como materia susceptible de ser reproducida, es necesario considerar en primer lugar los aspectos cromáticos que delimitan esta finalidad, así como los principios teóricos por los que se rige.

II.1.- PRINCIPIOS TEÓRICOS DEL COLOR

El conocimiento de ciertas consideraciones básicas de los aspectos físicos y fisiológicos del color, permiten disponer de una teoría útil aplicable en su reproducción; por esta razón en el presente apartado serán analizadas estas cuestiones. Sin embargo, puesto que el estudio del color en sí mismo es un tema muy complejo, y por otro lado no es objetivo principal de esta investigación, en esta Memoria únicamente se considerarán aquellos aspectos fundamentales de la teoría del color, que permitan entender su reproducción en relación al SIRECRAMT.

*Color:
sensación*

El color no es algo constante ni objetivamente tangible. Por principio, el color no es más que una sensación experimentada a través del órgano visual del observador. Asimismo, los colores de los objetos, también denominados *colores materiales*, están sometidos a constantes cambios: cambian de aspecto según la luz de cada momento y según su situación con respecto a la del observador; este comportamiento es debido a que el órgano de la vista posee una sorprendente capacidad de adaptación a los cambios de iluminación y a las condiciones de observación.

El color, en sentido estricto, es única y exclusivamente una *sensación* de color, producida por el órgano de la vista. Teniendo en

²⁵ Véase cap. I, ap. I.2.2. *Reintegración visible*, págs. 42, 43.

cuenta que las sensaciones no son objetivamente cuantificables, la ciencia ha optado por referirse a un aspecto físico: los llamados *estímulos de color*, que son definidos por los rayos luminosos²⁶ o, más concretamente, por las longitudes de onda del espectro, como transmisores o portadores de información; señalar que únicamente después de que el órgano visual haya efectuado la transformación correspondiente puede aparecer la información propiamente dicha de sensación de color. Según esto y como menciona Küppers (1992:22, 24), resultaría imposible querer deducir las relaciones entre la reproducción del color y las leyes de la mezcla de los colores sólo por medio del estudio del estímulo de color, es decir, sólo por el estudio de la radiación electromagnética visible que incide en la retina.

*Estímulos de color:
transmisores de información*

II.1.1.- Estímulos de color - Sensación cromática

En primer lugar, para hablar del color se deben considerar por un lado, acciones físicas, tales como la producción de estímulos en forma de luz y, por otra parte, resultados subjetivos, como es el hecho de recibir e interpretar ese estímulo en el órgano visual y en el cerebro; por ello se dice que el color existe solamente en la mente del observador.

Desde un punto de vista físico, para que el color se produzca es necesario la existencia de tres elementos: una fuente de luz, un objeto iluminado y la conjunción del ojo y del cerebro para su percepción (Billmeyer y Saltzman, 1981:2; Palazzi, 1995:30). La deducción de estos tres componentes principales surgieron, de manera evolutiva, según los planteamientos de los tres pioneros de la teoría del color. Newton, en la segunda mitad del siglo XVII, describió los colores como producto de las propiedades de los rayos que componen las fuentes luminosas. Un siglo después, Goethe introdujo las condiciones exteriores a la luz como factores responsables de la producción de

*Fuente de luz,
objeto y
observador*

Newton

Goethe

²⁶ Rayo luminoso es la trayectoria (línea geométrica) que sigue la luz al ir de un foco luminoso a un receptor, su dirección coincide con la de propagación de la energía radiante.

Schopenhauer

fenómenos cromáticos; estableció la aportación de los medios y superficies materiales que encuentra la luz en su recorrido desde su fuente de origen hasta el órgano visual del observador. Finalmente, Schopenhauer, discípulo de Goethe, propuso una tesis²⁷ sobre la función de las respuestas retinianas del órgano visual en la creación de la experiencia cromática (Arnheim, 1994:371-372).

II.1.1.1.- Luz

Propagación

La luz se define como una forma de energía radiante electromagnética. Los fenómenos de propagación de la luz se explican por la teoría ondulatoria, mientras los fenómenos de absorción y emisión de la luz, que aparecen como consecuencia de su interacción con la materia, encuentran su mejor explicación dentro de la teoría corpuscular.. Los rayos de luz transportan energía en pequeñas unidades, denominadas *cuantos* o *fotones*²⁸. Así pues, se dice que la luz es una radiación energética que puede ser considerada unas veces bajo su aspecto vibratorio y otras bajo su aspecto corpuscular, lo uno común a lo otro y estrictamente indisociable.

La propagación de la luz como movimiento ondulatorio (Fig. II.1), se caracteriza por dos aspectos: la longitud de onda²⁹ (λ) y la frecuencia³⁰ (ν). Las ondas se diferencian entre sí por su longitud de onda definida esta magnitud como la distancia existente entre dos puntos de la onda que están en concordancia de fase.

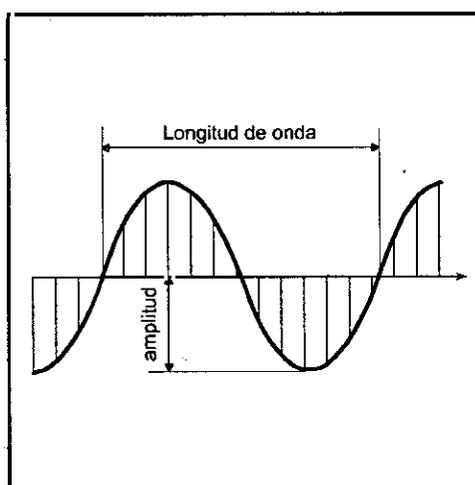
²⁷ Esta tesis de Schopenhauer encontró su desarrollo científico con Hermann Helmholtz en su cromatología fisiológica, que estudia los procesos fotoquímicos que se dan en las células de la retina.

²⁸ Un fotón es, por definición, la mínima cantidad de energía transmitida por una radiación electromagnética de una longitud de onda dada.

²⁹ La longitud de onda (λ) es la distancia entre dos puntos de onda que estén en concordancia de fase, es decir, representa la distancia recorrida por la radiación para que vuelva exactamente al mismo estado energético; esta magnitud caracteriza todo movimiento vibratorio.

³⁰ La frecuencia (ν) corresponde al número de vibraciones producidas por la onda electromagnética en la unidad de tiempo, es decir, el número de ondas que pasan por un punto en un segundo: $\nu = n^\circ$ de ondas / s. La unidad de frecuencia es el *hertz* (Hz).

Fig. II.1. Forma de la onda de luz. Longitud de onda: color dominante. Amplitud: intensidad luminosa.



La velocidad de propagación de la onda (c) está determinada por su longitud de onda y su frecuencia, según la ecuación:

Velocidad de propagación

$$c = \lambda \nu \quad (\text{II.1})$$

La experiencia demuestra que la velocidad (c) de una energía radiante varía según el medio en el que se propaga. En el vacío, la velocidad de la luz es una constante universal (c_0) cuyo valor es $2,997\,925 \times 10^8$ m/s, mientras que en un medio material disminuye, lo que implica que, teniendo en cuenta la ecuación II.1, disminuirá la longitud de onda de la luz, su frecuencia o ambas.

Ya que la longitud de onda se puede medir más fácilmente que la frecuencia, se ha convenido en recurrir a la longitud de onda medida en el vacío para identificar una determinada radiación luminosa.

El color dominante de una radiación está determinado por su longitud de onda, mientras que la intensidad luminosa es directamente proporcional a la amplitud, es decir, a la altura de la onda (Fig. II.1).

Color e intensidad de la radiación

Unidades

Como se acaba de señalar, cada uno de los colores puede ser aislado o reconocido por su longitud de onda, la cual puede expresarse en milimicrones ($m\mu$), nanómetros (nm) o bien Angström³¹ (Å). Los nanómetros o milimicrones son las unidades de uso más común para describir la longitud de onda dentro del espectro de radiación visible y ultravioleta (Skoog y West, 1989:99), y serán las utilizadas en esta Memoria.

*Espectro
electromag-
nético*

El espectro electromagnético está formado por el conjunto de todas las ondas conocidas que se extienden por el universo, pudiendo variar desde los rayos gamma, de cortísima longitud de onda: $\lambda = 10^3$ nm, a las ondas hertzianas, de una longitud de onda de decenas de kilómetros ($\lambda = 10^{13}$ nm).

*Espectro
visible*

La relativa sensibilidad del órgano visual humano limita la parte visible del espectro electromagnético a una banda de longitudes de onda comprendidas entre 380 y 750 nm, (Billmeyer y Saltzman, 1981:4; Kaiser y Boynton, 1996:61), si bien, otros autores establecen estos valores entre 400 y 700 nm (Astrua, 1982:115; Burden, 1978:57; Nassau, 1997:5).

El sector visible del espectro electromagnético va precedido en sus extremos por las radiaciones ultravioletas y por las infrarrojas; ambas, al ser invisibles, no deben ser designadas bajo el término de *luz*.

Por tanto, la luz puede definirse como la clase de energía radiante -aspecto objetivo o físico- visible al ojo humano -aspecto subjetivo o psíquico-, por consiguiente puede considerarse como un fenómeno psico-físico.

Cuando todas las longitudes de onda desde los 400 a 700 nm, es decir, las ondas electromagnéticas ópticas o visibles, estimulan

³¹ Tanto un milimicrón ($m\mu$) como un nanómetro (nm) equivalen ambos a 10^{-6} mm, y un Anström (Å) a 10^{-7} mm.

simultáneamente y con la misma intensidad el ojo humano, se percibe la luz "blanca" o incolora, si bien en la práctica tales luces no existen exactamente (Palazzi, 1995:15). Este espectro, en el que ninguna frecuencia o longitud de onda predomina por su intensidad, recibe también el nombre de radiación de espectro o espectro equienergético (Küppers, 1992:128).

*Espectro
equienergético*

Sin embargo, cuando el ojo recibe solamente una parte del espectro visible, es decir, unas determinadas longitudes de onda, entonces surge la sensación de luz coloreada. En el caso de que todas las ondas simples que componen la luz tengan la misma frecuencia o longitud de onda, se denominará monocromática.

Luz cromática

La composición espectral de la luz blanca puede comprobarse experimentalmente, como ya lo hiciera Newton a comienzos del siglo XVIII, descomponiendo un rayo de luz (400-700 nm) en los distintos colores (longitudes de onda) del espectro visible³².

A partir de la observación de los colores componentes del espectro visible, se puede considerar la existencia de tres regiones principales: azul (por debajo de los 480 nm), verde (entre 480 y 560 nm) y roja (longitudes de onda mayores de 630 nm) (Billmeyer y Saltzman, 1981:4); según otros autores, los valores de longitud de onda que delimitan estas tres regiones varían dentro de otro intervalo³³. Señalar que esta división únicamente se tiene en cuenta al objeto de disponer de una nomenclatura práctica, al existir un número indefinido de colores en el espectro.

*Regiones
espectrales
principales:
azul, verde y
roja*

³² Este procedimiento consiste en incidir con un rayo de luz con un ángulo agudo sobre un prisma equilátero de cristal, el cual provoca la dispersión del rayo emergente en diferentes colores (longitudes de onda) desde el rojo oscuro al azul violeta, fusionándose cada color imperceptiblemente con el siguiente. Este experimento se convirtió en la forma clásica de producir un espectro (colores visibles).

³³ Astrua (1982:116) sitúa los valores entre 400 y 500 nm para la luz azul; entre 500 y 600 nm para la luz verde y entre 600 y 700 nm para la luz roja. Por otra parte, Hunt (1957:36) distribuye estas tres partes en: longitudes de onda por encima de 580 nm correspondientes a toda la parte roja; longitudes de onda comprendidas entre 490 y 580 nm, que contiene la parte verde y las longitudes de onda menores de 490 nm, para la parte azul.

Energía de radiación La cantidad de energía (E) de un cuanto o fotón es directamente proporcional a la frecuencia (ν) e inversamente proporcional a la longitud de onda (λ), como se deduce a partir de la formula:³⁴

$$E = h \nu = h c / \lambda \quad (\text{II.2})$$

Por tanto las tres regiones en que se puede dividir el espectro visible, presentarán distinto contenido energético; concretamente la luz azul, con su corta longitud de onda, contiene más energía que la luz roja.

Por otra parte, volviendo a la triada formulada para la generación de un color: fuente de luz, objeto y observador, señalar la trascendencia del primer elemento. Para la definición de un color determinado, tiene una importancia decisiva la especificación exacta de la iluminación bajo la que es observado, ya que un material puede adquirir diferentes aspectos según sean las características de la fuente de iluminación utilizada.

Rendimiento cromático En este sentido, para especificar la fuente de iluminación se habla de su *rendimiento cromático*³⁵, que relaciona la apariencia cromática provocada por ésta sobre un objeto, respecto a la obtenida con una fuente de iluminación patrón.

Naturaleza e intensidad de la luz La propiedad del rendimiento de color de una fuente de iluminación no se puede predecir por la simple inspección visual de la fuente o por el conocimiento de su color, sino que es necesario un conocimiento de la distribución espectral de la luz emitida; por ejemplo, cuando una luz se define como blanca, no se esta informando sobre la calidad de su composición espectral. Por tanto, para especificar una

³⁴ Energía (E) [erg], Constante de Planck (h) [h= 6,626 x 10⁻³⁴ J.s], Velocidad de la luz (c) [2,997 x 10⁸ m.s⁻¹], Longitud de onda (λ), Frecuencia (ν).

³⁵ Para poder describir el rendimiento cromático de una fuente de iluminación, se utiliza el término "apariencia de color", que expresa el tono cromático que toma una superficie blanca cuando es iluminada por dicha fuente (Casas, González y Puente, 1991:81-82).

fente de luz se debe considerar, por un lado, *la naturaleza de la luz* emitida -cualidad- y, por otro, su *intensidad luminosa* -cantidad-.

- a) *La naturaleza de la luz* emitida viene determinada por dos factores: la distribución espectral³⁶ y la temperatura del color³⁷.

Ciertas fuentes de luz, tales como el Sol y algunas especies químicas incandescentes emiten luz blanca o próxima a ella. La naturaleza de la luz emitida por una fuente luminosa puede ser descrita a partir de su potencia relativa³⁸, la representación gráfica de la variación de esta potencia en función de la longitud de onda, tiene como resultado la curva de distribución espectral de la fuente de luz (Billmeyer y Saltzman, 1981:4). De esta manera, es posible conocer las zonas del espectro en las que la lámpara irradia y si el espectro formado es continuo, es decir, si todos los colores son adyacentes y emergen imperceptiblemente uno de otro (Fig. II.2). En el caso de que en la representación aparezcan una serie de bandas estrechas en forma de líneas paralelas cercanas y sólo en ciertas zonas, se trataría de un espectro discontinuo (Burden, 1978:65-66; Gerritsen, 1976:32-33). Siendo necesario para la reproducción del color fuentes de luz que produzcan espectros continuos, en los que la distribución cromática sea lo más uniforme posible.

*Espectro
continuo*

*Espectro
discontinuo*

³⁶ La norma UNE 54-002-73 define la distribución espectral como la variación de una determinada magnitud radiométrica en función de la longitud de onda. También se denomina *función de distribución espectral*.

³⁷ Según define la norma UNE 54-002-73, la temperatura de color es la identificación de la distribución espectral de la radiación visible emitida por un cuerpo negro cuando alcanza su temperatura absoluta.

³⁸ La potencia relativa expresa la intensidad de luz emitida en cada longitud de onda que compone el espectro visible. En inglés la potencia de distribución espectral (*spectral power distribution*) de una fuente de luz se corresponde con las siglas (SPD).

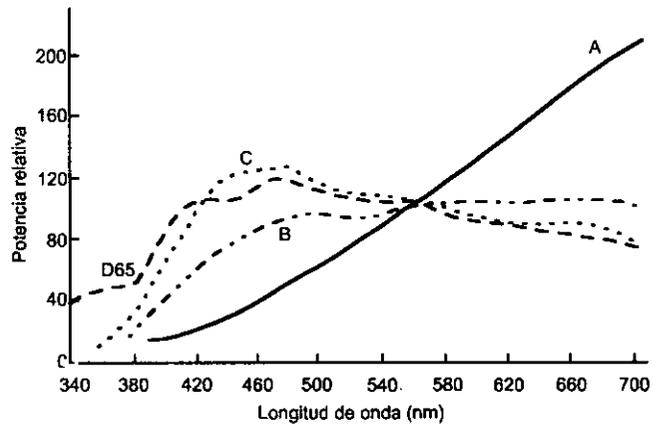


Fig. II.2. Distribución espectral de energía de los iluminantes CIE A, B, C y D65.

Temperatura de color

El concepto de temperatura de color de cualquier fuente de luz se basa en el tratamiento teórico de la radiación de un cuerpo negro³⁹. Se trata de un cuerpo que no refleja la luz que incide en su superficie, sino que absorbe todas las radiaciones que recibe y que emite radiaciones cuando es calentado hasta la incandescencia. La temperatura de color de una fuente luminosa se define como la luz que emite un cuerpo ópticamente negro cuando se calienta hasta alcanzar la temperatura necesaria para llegar a dicha emisión⁴⁰; esta temperatura se expresa en grados absolutos⁴¹. Aquellas fuentes que pueden definirse a partir de su temperatura de color producen espectros continuos (Astrua, 1982:131; Billmeyer y Saltzman, 1981:5; Burden, 1978:66).

³⁹ También denominado radiador integral o radiador planckiano.

⁴⁰ La temperatura de color tiene relación con la apariencia cromática de la fuente luminosa, no con su distribución espectral. Así, se dice que una fuente luminosa es "cálida" cuando su temperatura de color es inferior a los 3.000 °K, "fría" si su temperatura de color es superior a los 5.000 °K, y "neutra" si su temperatura está comprendida entre dichos valores (Casas, González, y Puente, 1991:82); si bien, en ningún caso se está especificando que distribución espectral tiene en las distintas longitudes de onda.

⁴¹ Se expresa en grados Kelvin, equivalentes al número de grados centígrados (°C) más 273.

- b) La *intensidad luminosa* de la luz emitida (I) viene especificada por la amplitud o altura de la onda de propagación y se expresa en candelas (cd).

En lo que respecta a su espectro de emisión, se puede considerar que la fuente luminosa más óptima para la reproducción del color es el Sol. Sin embargo, la luz solar no es "normalizada"; su distribución espectral varía dependiendo de las condiciones ambientales (partículas en suspensión)⁴², geográficas (latitud) y horarias (amanecer, atardecer). No obstante, las fuentes de luz artificial muy raramente se aproximan a su distribución espectral. La luz que emiten está compuesta solamente de algunas radiaciones visibles, o bien, de todas, pero no en la misma medida.

Para realizar una clasificación de las fuentes de luz artificial conviene dividir las en dos categorías principales (Astrua, 1982:128-131; Burden, 1978:65; Casas, González y Puente, 1991:83; Sproson, 1983:23-26; Thomson, 1986:7-10):

*Fuentes de luz artificial:
clasificación*

- a) *Fuentes luminosas incandescentes*⁴³. La emisión de luz es el resultado de calentar mediante una corriente eléctrica hasta la incandescencia, una determinada sustancia como, por ejemplo, tungsteno. Este efecto se consigue mediante la aplicación de una corriente eléctrica; a medida que la corriente se incrementa también lo hace la temperatura de la sustancia y la luz que irradia se hace cada vez más blanca e intensa. Una variación de este tipo de fuentes luminosas son las de tungsteno-halógeno.
- b) *Fuentes de descarga eléctrica*. Esta clase de iluminantes suelen consistir en un tubo de vidrio que contiene un gas inerte y un

⁴² Las partículas en suspensión (polvo, sales, polen, vapor de agua, contaminantes, etc.) producen fenómenos de reflexión, difracción y dispersión de la luz.

⁴³ También denominadas *radiadores térmicos sólidos*.

electrodo en cada extremo. La corriente eléctrica pasa a través del gas y produce luz visible o rayos ultravioleta; esta emisión de radiación se produce directamente o bien por excitación de una capa de sustancia fosforescente que recubre la pared interior del tubo de vidrio (Halstead, 1978:100-104). Dentro de este tipo, algunas lámparas fluorescentes tienen un buen rendimiento de color y presentan una mayor eficacia que las fuentes incandescentes de tungsteno (Thomson, 1986:8-9, 173).

CIE Respecto a los distintos tipos de fuentes de iluminación existentes la Comisión Internacional de Iluminación (CIE)⁴⁴, definió varios iluminantes estándar para su aplicación en relación a la valoración del color (Fig. II.2). El iluminante A, presenta una distribución espectral similar a la de una lámpara de filamento de tungsteno de una temperatura de color de 2.854° K. El iluminante B (4.800° K) y C (6.800° K), derivan del iluminante A, y son el resultado de pasar la luz a través de un filtro líquido; el iluminante B simula una temperatura de color semejante a la luz del Sol de mediodía y la fuente C, simula una temperatura de color semejante a la media de la luz día. Los iluminantes luz-día *D65* son los más utilizados; están definidos por su correspondiente distribución espectral; semejante al promedio de la luz diurna y luz del Sol, de una temperatura de color de 6.500° K (Billmeyer y Saltzman, 1981:7-8, 35; Soriano y Alcón, 1993:39).

II.1.1.2.- Interacción luz-materia

Una vez definida la radiación lumínica, el siguiente paso es considerar los fenómenos que pueden tener lugar en su desplazamiento, al ser interceptada su trayectoria por otros medios que, a su vez, van a

⁴⁴ Commission Internationale de l'Éclairage.

ser los responsables del color. Ya Goethe (1992:269) a principios del siglo XIX, consideró en su obra *Teoría de los colores*⁴⁵, que:

[...] el color es determinado a la vez por la luz y por lo que se opone a ella.

Básicamente, los cuerpos físicos se pueden dividir en luminosos o no luminosos. Los cuerpos luminosos son aquellos que emiten su propia luz que los hace visibles, mientras que los cuerpos no luminosos sólo se hacen visibles reflejando o devolviendo la luz que reciben de una fuente luminosa. El trabajo que se recoge en esta Memoria se refiere a estos últimos, y en este sentido, será necesario considerar los distintos fenómenos que pueden tener lugar, cuando la luz interacciona con este tipo de materiales; interacciones que, como ya se ha señalado, son responsables de que sean visibles.

*Cuerpos
luminosos y no
luminosos*

En geometría óptica, la luz emitida por una fuente luminosa, o rayo luminoso, se representa por un vector que indica el sentido de propagación. El estudio de la luz está basado principalmente en las desviaciones que los rayos experimentan en su dirección al variar el medio de propagación (Fig. II.3). Para definir los distintos efectos es necesario considerar que los fotones incidentes no se comportan como ondas sino como partículas y que todo material posee una capacidad de remisión de la radiación individual específica, que depende de su estructura molecular⁴⁶. De manera general se puede establecer que la luz puede ser transmitida, reflejada, absorbida, refractada, dispersada o difractada por un medio (Kaiser y Boynton, 1996:70-77; Nassau, 1997:8, 24-26). Estos fenómenos se describen a continuación:

*Fenómenos de
interacción*

⁴⁵ Corresponde al título original *Farbenlehre*, obra que redactó Goethe entre 1799 y 1810, y a la que posteriormente acompaño de trabajos complementarios sobre fenómenos cromáticos.

⁴⁶ A nivel más fundamental estos procesos pueden entenderse en términos de excitación electrónica de la materia.

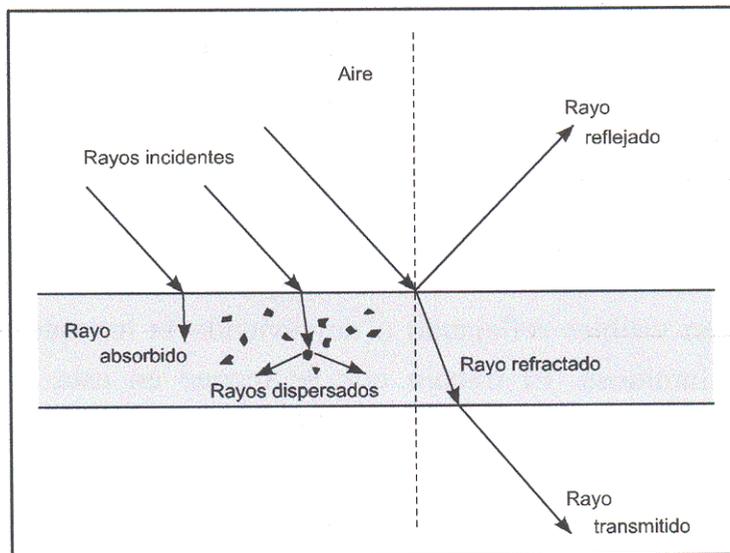


Fig. II.3. Distintas formas en que los rayos de luz interaccionan cuando encuentran un medio transparente como, por ejemplo, un cristal (Kaiser y Boynton, 1996:71).

II.1.1.2.1.- Reflexión

Mayoritariamente, los objetos son visibles debido a la capacidad que presenta su superficie para reflejar la luz. El grado en que se produce este efecto varía bastante; así un cuerpo negro refleja muy poca luz mientras que un cuerpo blanco refleja la mayor parte de la luz que incide sobre él. Asimismo, y atendiendo a sus características superficiales, una superficie plana pulimentada refleja la mayor parte de la luz de forma regular o especular, con el mismo ángulo incidente y sin ningún cambio de color; este comportamiento corresponde al de una superficie brillante. Por el contrario, las superficies mates presentan ligeras imperfecciones, responsables de que la reflexión se produzca de forma irregular o difusa y, además, tienen la capacidad para cambiar el color (Fig. II.4, II.5 y II.6).

*Reflexión
especular*

*Reflexión
difusa*

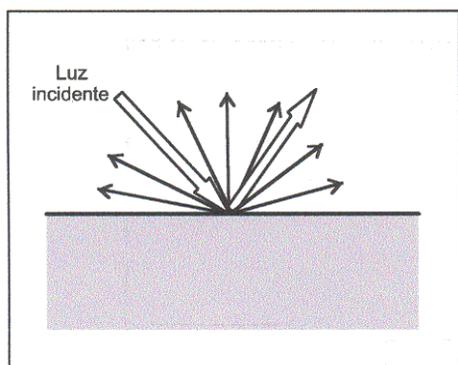


Fig. II. 4. Combinación de luz difusa y especular.

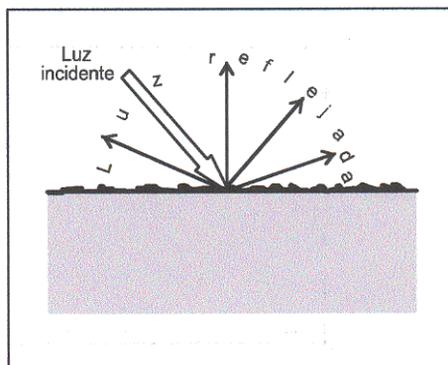


Fig. II. 5. Reflexión difusa. La luz es reflejada se produce en distintas direcciones.

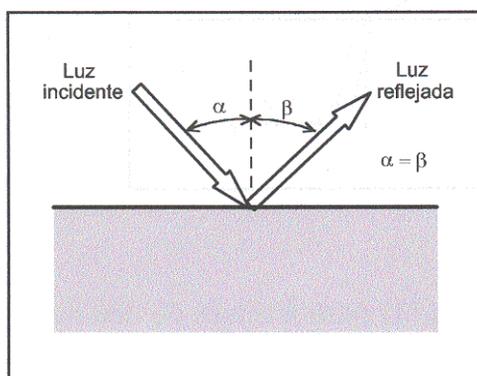


Fig. II. 6. En la reflexión especular toda la luz es reflejada en una dirección, de tal forma que los ángulos formados por el rayo de luz incidente y el reflejado con respecto a la normal a la superficie son iguales.

II.1.1.2.2.- Refracción

Este fenómeno se produce cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro de distinta densidad; el rayo de luz es desviado o refractado⁴⁷, acercándose a la normal de la superficie si pasa de un

⁴⁷ La refracción permite formar las imágenes en el ojo, concretamente en la retina.

medio menos denso a otro más denso (Fig. II.7), o alejándose, en el caso contrario. El mayor o menor grado en que se produce este efecto está determinado por el índice de refracción del medio⁴⁸ a través del cual pasa la radiación; a su vez, el índice de refracción viene definido por la relación entre la velocidad de propagación de la luz en el vacío y en el medio.

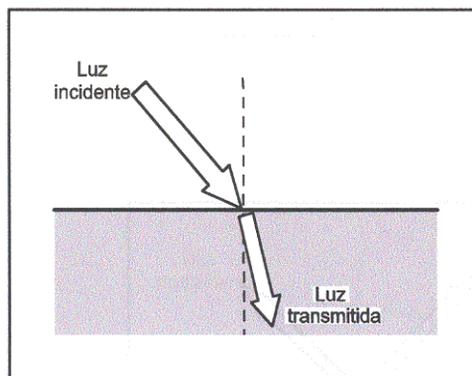


Fig. II.7. Refracción. Cuando un rayo de luz pasa de un medio a otro más denso, por ejemplo del aire al cristal, se desvía acercándose a la normal.

Así, cuando la luz pasa a través de dos materiales diferentes sufre un cambio en su velocidad, que tiene como resultado un cambio en la dirección de la luz. Por otra parte, el índice de refracción cambia con la longitud de onda de la luz, por lo que luces de diferente color modifican su dirección de distinta forma a su paso a través de un prisma⁴⁹.

II.1.1.2.3.- Transmisión

La propagación de la luz siempre se produce a través de algún medio; si este proceso tiene lugar sin modificaciones apreciables de las

⁴⁸ El índice de refracción se representa por la letra griega η ; este valor indica el grado de desviación que el rayo de la luz experimenta con respecto a la trayectoria original. Su expresión analítica es: $\eta = c / v_1$

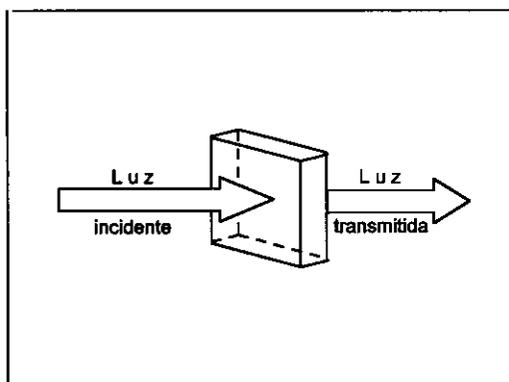
⁴⁹ Descomposición de la luz blanca a su paso a través de un prisma en las distintas longitudes de onda.

características iniciales de la luz, se dice que ésta se ha transmitido a través del medio, que a su vez se define como transparente (Fig. II.8).

Sin embargo, los medios considerados como transparentes desarrollan cierto tipo de efectos sobre la luz, ya que contienen átomos que interaccionan con los fotones; así, algunos absorben fotones, otros cambian su trayectoria de propagación, mientras que otros, no interceptan los fotones que han penetrado en el medio y en consecuencia estos no experimentan cambios en su dirección y pasan a constituir los rayos formadores de imagen; éstos son, en la mayoría de los casos, los que son importantes para la visión.

Si el medio no tiene color, toda la luz es transmitida excepto una pequeña cantidad que es reflejada por la superficie del objeto. Cuando existan cambios en el índice de refracción, además de la transmisión, se producirán fenómenos de refracción y dispersión.

Fig. II.8. Transmisión de la luz a través de un objeto transparente.



II.1.1.2.4.- *Dispersión*⁵⁰

Cuando la luz pasa a través de un medio que no es completamente transparente puede experimentar el fenómeno de

⁵⁰ Este fenómeno de dispersión puede entenderse como sinónimo de difusión, si bien, debe diferenciarse de la refracción dispersiva por la que la luz blanca puede descomponerse en las distintas longitudes de onda que la constituyen.

dispersión; este efecto se produce cuando existen pequeñas partículas que presentan un índice de refracción diferente al del medio de propagación. En estas condiciones, una parte de la luz que incide sobre el material es absorbida y otra parte es remitida con la misma longitud de onda, si bien en este caso la luz es propagada en diferentes direcciones; estos rayos de luz dispersados pueden llegar a perturbar la visión espacial.

Cuando las partículas dispersantes son grandes⁵¹, la dispersión producida es independiente de la longitud de onda de la luz incidente y además está concentrada en una determinada dirección de emisión; tal es el caso de las nubes y nieblas que por esta razón vemos blancas. Sin embargo, cuando las partículas son pequeñas⁵², las radiaciones de longitud de onda corta experimentan el fenómeno de dispersión en mayor medida que las de longitud de onda larga; esta situación es la que responde a la atmósfera de un día claro y es la explicación física por la que se ve azul el cielo (Nassau, 1997:25, 27; Skoog y West, 1989:111).

*Tamaño de
partícula*

La cantidad de luz que es dispersada depende de la diferencia entre los índices de refracción de los dos medios a través de los cuales se propaga la luz; cuando ambos tienen el mismo índice de refracción, no se produce dispersión de la luz. Asimismo, como ya se ha señalado, este fenómeno está determinado por el tamaño de la partícula dispersante; a este respecto, las partículas muy pequeñas dispersan muy poca luz. Por el contrario, este efecto se incrementa con el aumento del tamaño de las partículas, hasta que éstas son aproximadamente del mismo tamaño que la longitud de onda de la luz (Billmeyer y Saltzman, 1981:11).

*Poder
cubriente*

El poder cubriente de un pigmento está íntimamente relacionado con la cantidad de luz que dispersa. Un pigmento será cubriente cuando

⁵¹ Mayores que la longitud de onda de la luz visible.

⁵² Menores que la longitud de onda de la luz visible.

su índice de refracción sea muy diferente al del medio en el que se encuentra y, además, cuando el diámetro de sus partículas sea del mismo orden que la longitud de onda de la luz. Cuando los pigmentos tienen un tamaño de partícula muy pequeño y el mismo índice de refracción que el del medio utilizado, dispersan muy poca cantidad de luz dando la sensación de ser transparentes. Por tanto, si se disminuye la diferencia entre el índice de refracción del pigmento y el del medio en el que va a ser utilizado, se pueden obtener superficies transparentes trabajando con pigmentos cuyo tamaño de partículas sea muy pequeño (Billmeyer y Saltzman, 1981:12).

Cuando parte de la luz que pasa a través de un material es dispersada y otra parte es transmitida, se dice que dicho material es translúcido (Fig. II.9); si la dispersión es tan intensa que la luz no pasa a través del material (y además va acompañada del fenómeno de absorción) se dice entonces que el material es opaco (Fig. II.10).

*Material
translucido y
opaco*

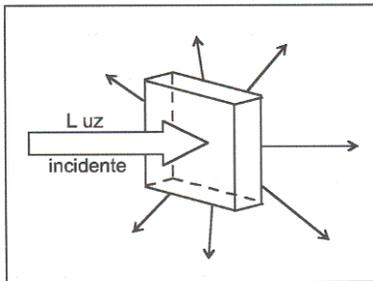


Fig. II.9. Material translúcido. Una parte de la luz es transmitida y otra parte es reflejada de forma difusa por dispersión.

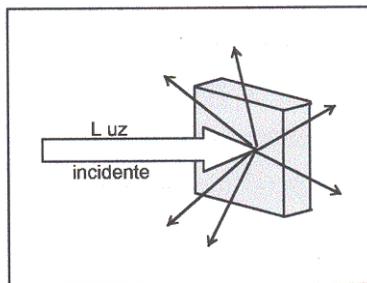


Fig. II.10. Material opaco. La luz no es transmitida, sino que es reflejada de forma difusa por dispersión.

II.1.1.2.5.- Absorción

Cuando la luz penetra en un medio, como por ejemplo un cristal oscuro, no toda ella es transmitida; una parte es dispersada, y otra absorbida por los átomos contenidos en el medio que la transforman en

energía calorífica. Lógicamente, cuanto más transparente es el medio menos absorción se produce.

*Absorción
selectiva*

La absorción que tiene lugar por parte de un material, depende de la longitud de onda de la radiación incidente, es decir, los medios son capaces de realizar una absorción selectiva: absorben los fotones de determinadas longitudes de onda⁵³. Un ejemplo que muestra este efecto consiste en proyectar una luz monocromática de 470 nm (azul) y observarla a través de un filtro, cuya máxima transmitancia⁵⁴ espectral sea de 470 nm; en estas condiciones la luz pasará a su través produciéndose una mínima absorción. Por el contrario, si el filtro utilizado tiene un máximo de transmitancia de 650 nm (rojo), la mayor parte de las longitudes de onda corta (azul) serán absorbidas.

Volviendo al ejemplo de la coloración de la bóveda celeste, la presencia de agentes contaminantes en la atmósfera hace que se produzca absorción de la radiación solar, principalmente de las radiaciones cortas (azules y violetas), por lo que la luz resultante tiende a ser más rojiza. Este mismo efecto de absorción, explica los tonos de amaneceres y puestas de Sol, en los que los rayos solares recorren mayores espesores de atmósfera que los rayos solares del mediodía, por lo que se produce un mayor grado de absorción en su espectro.

Los pigmentos son especies químicas que tienen la propiedad de absorber selectivamente determinadas longitudes de onda de la luz incidente y reflejar las restantes; son éstas las que percibe nuestro órgano visual como sensación coloreada. Los pigmentos que constituyen o recubren los cuerpos, permiten clasificarlos en dos grandes grupos: opacos y transparentes. Los primeros reflejan y los

*Cuerpos
opacos y
transparentes*

⁵³ Una definición más específica del fenómeno de absorción relacionado con los grupos funcionales de las especies químicas, puede encontrarse en el libro de D. A. Skoog y D. M. West, *Análisis instrumental*, 1989, págs. 179-190.

⁵⁴ Transmitancia de un material transparente es la fracción o porcentaje de la luz incidente que pasa completamente a través del material. Por lo general la transmitancia se expresa como porcentaje.

segundos transmiten determinadas longitudes de onda, que a su vez son percibidas por el órgano visual, y responsables del color. En ambos casos, habrá a su vez ciertas longitudes de onda que han sido absorbidas. Señalar que si todas las longitudes de onda de la luz incidente son absorbidas por el cuerpo, se dice que es opaco y de color negro.

Son dos las leyes que rigen los fenómenos de absorción de luz: la ley de Lambert y la ley de Beer.

Según la ley de Lambert la cantidad de radiación absorbida es la misma cuando la luz pasa a través de materiales de igual grosor (Fig. II.11); esta ley se cumplirá siempre que no se produzca dispersión de la luz.

Ley de Lambert

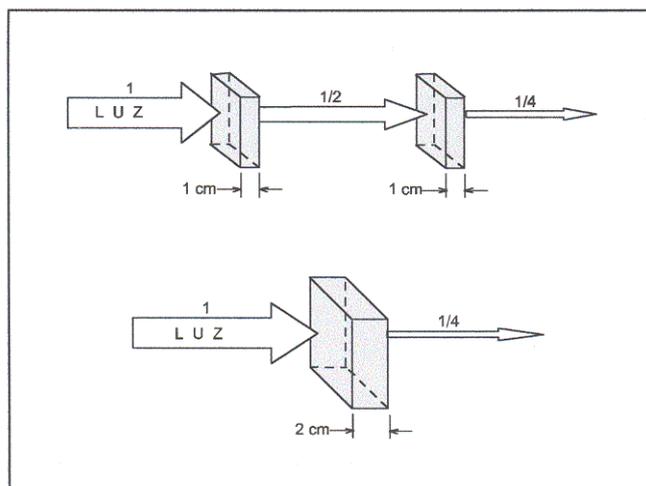


Fig. II.11. Absorción en función del grosor del material absorbente.

A su vez, la ley de Beer establece que la cantidad de radiación absorbida es la misma cuando la luz pasa a través de igual cantidad de material absorbente (Fig. II.12).

Ley de Beer

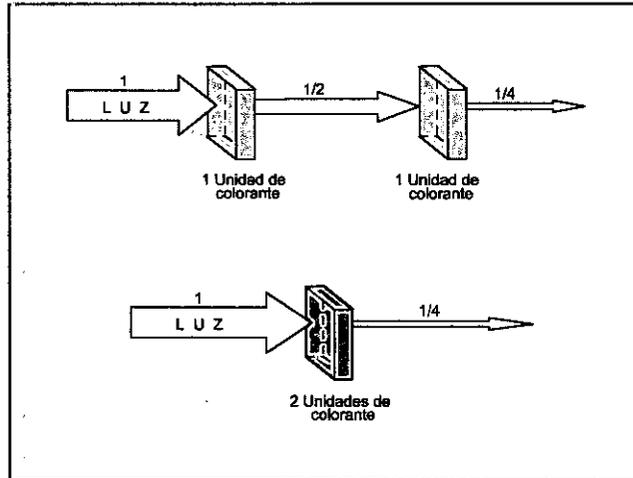


Fig. II.12. Absorción dependiendo de la cantidad de material absorbente.

*Material
cromático y
acromático*

El color del material depende tanto de la magnitud como de la clase de dispersión y absorción presentes: si no hay absorción selectiva y la dispersión se produce en la misma cantidad para cada longitud de onda, el material parecerá acromático; en el caso contrario parecerá cromático.

II.1.1.2.6.- Difracción

Cuando la luz se propaga en un medio homogéneo los rayos luminosos son líneas rectas que parten del foco emisor; sin embargo, en determinadas condiciones, también pueden observarse que se producen desviaciones respecto de la propagación rectilínea. Así, cuando una emisión de luz, considerada en su movimiento ondulatorio, llega a una superficie rígida con un orificio de apertura muy pequeña (del orden de la longitud de onda), se verifica que, a partir del orificio, se propagan ondulaciones idénticas a la incidente y en todas las direcciones (Fig. II.13).

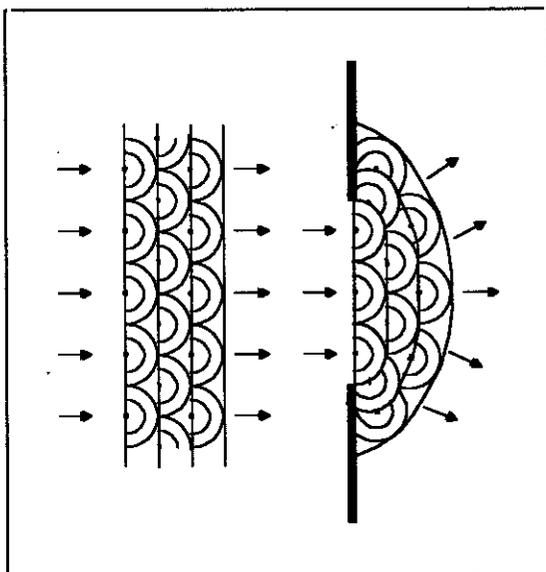


Fig. II.13. Difracción producida cuando un frente de onda encuentra un borde opaco.

Este fenómeno tiene su explicación al considerar la luz como una serie de frentes de onda que se mueven a lo largo de una trayectoria, y en la que cada punto del mismo frente de onda actúa a su vez como una nueva fuente de onda esférica. La difracción determina la capacidad de algunos sistemas ópticos, como el órgano visual, para representar un punto como tal.

II.1.1.3.- Percepción luz-color

Los rayos luminosos remitidos o transmitidos por el material, y que corresponden a la fracción de luz que no ha sido absorbida por éste, constituyen lo que se conoce como *estímulos de color*. Estos estímulos no son propiamente color, sino tan sólo los portadores de la información que llega a nuestro órgano visual y le permiten establecer la diferencia entre la luz que procede del material y la composición espectral de la iluminación general.

Estímulos de color

Composición

Curva
espectral

La composición espectral de un estímulo de color puede reducirse a dos parámetros: su intervalo de longitudes de onda y la intensidad de la correspondiente radiación. Su representación gráfica corresponde a una curva espectral, que se denomina de transmitancia o reflectancia^{55,56}, según se trate de un material transparente u opaco respectivamente. Como se verá más adelante⁵⁷, estas curvas espectrales permiten relacionar en cierto modo, el color procedente de un objeto con el color percibido, y en consecuencia medirlo físicamente (Kaiser y Boynton, 1996:36).

De igual forma que una determinada fuente de luz queda definida a partir de su correspondiente curva de distribución espectral, las curvas espectrales de reflectancia o transmitancia describen el color de un objeto.

Es importante señalar que la composición espectral del estímulo de color de un material siempre dependerá de la iluminación bajo la que se observa; así, por ejemplo, si un material potencialmente tuviese la capacidad de remitir determinadas longitudes de onda, dicho efecto no podría tener lugar si estas longitudes de onda no estuviesen presentes en la fuente de iluminación⁵⁸. Este comportamiento permite confirmar que los estímulos de color no tienen color o no son portadores de color en sí mismos, sino que actúan como meros transmisores de información que responden a una realidad física objetivamente mensurable.

⁵⁵ Reflectancia de un objeto o superficie, denominada también factor de reflexión o coeficiente de reflexión, es la capacidad física de un material para absorber o reflejar la luz que recibe; es una propiedad constante de toda superficie.

⁵⁶ La curva espectral de reflectancia corresponde a la representación gráfica de la reflectancia de un objeto a cada longitud de onda en el espectro visible. En inglés, la superficie de reflectancia espectral de un objeto (*surface spectral reflectance*), se representa por las siglas SSR.

⁵⁷ Véase cap. II, ap. II.1.2.3.2. *Sistema CIE*, págs. 112, 113; cuando se determina la obtención de los valores triestímulo X, Y y Z.

⁵⁸ La luz que incide en el órgano visual remitida por un cuerpo no luminoso es el resultado del producto de la reflectancia espectral del objeto y de la potencia de distribución espectral de la luz que incide sobre el mismo (MacAdam, 1997:41-42).

El detector más importante de los estímulos de color es el sistema compuesto por el ojo, el sistema nervioso y el cerebro. Según Küppers (1992:23), el detector visual funciona como un sistema de computadora:

Procesado de los estímulos de color

[...] donde el ojo actúa como unidad de alimentación y el cerebro hace las veces de centro de cálculo. La sensación de color es el producto de salida.

No se conoce exactamente como trabaja, pero todos los demás sistemas de detección y reproducción del color intentan duplicar sus resultados de una forma u otra.

No obstante, y aún simplificando el proceso, es importante dar una idea general de como trabaja el órgano de visión, puesto que su conocimiento permitirá entender los mecanismos que hacen posible la reproducción del color en el SIRECRAMT, sistema de reintegración que se desarrolla en esta investigación.

Sistema visual

Estableciendo un símil, se puede considerar que básicamente una cámara fotográfica actúa de forma semejante al ojo (Gerritsen, 1976:48-49), donde el objetivo estaría constituido por la córnea y el cristalino, ambos separados por el humor acuoso; la retina sería la placa sensible donde se forma la imagen y el iris el diafragma de apertura (Fig. II.14).

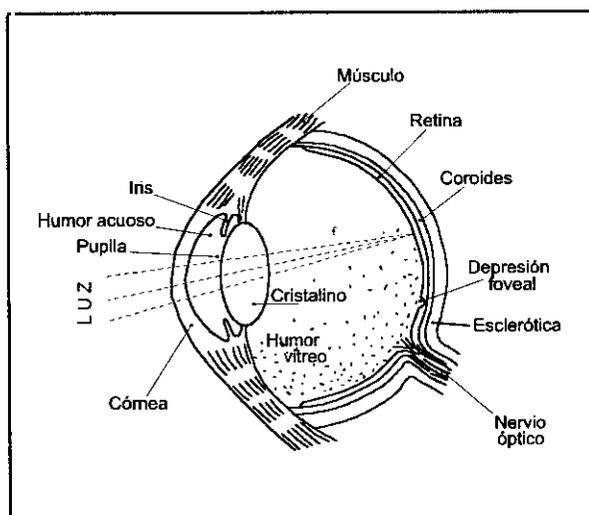


Fig. II.14. Esquema de la estructura del ojo.

Asimismo, en ambos casos existe la posibilidad de adaptación a las características de la fuente luminosa: intensidad de la luz y longitudes de onda dominantes; en la cámara fotográfica este efecto se logra mediante la utilización de películas de distintos grados de sensibilidad y películas para luz día o luz artificial, y en el sistema óptico, mediante el proceso de adaptación de la retina a la claridad y al color de la luz.

El estímulo de color, o rayo lumínico remitido por la estructura molecular de la materia es proyectado a través del cristalino⁵⁹ sobre la retina; en su proyección, el estímulo de color pasa a través de la córnea, la cámara anterior o humor acuoso, la abertura de la pupila, el cristalino y el humor vítreo. El iris, dilatando más o menos la pupila, permite regular la cantidad de luz que entra en el globo ocular, mientras que el cristalino variando su curvatura por medio de los músculos ciliares, hace posible que la imagen del objeto observado pueda verse con nitidez.

Todo este proceso hace posible que la información del estímulo de color llegue a la retina; la etapa siguiente será el análisis de dicha información.

*Estímulo -
sensación*

Se puede considerar que es en la retina donde comienza la selección y el análisis de la información transmitida por los estímulos luminosos; éstos son registrados por minúsculas células fotorreceptoras⁶⁰ situadas en la retina y provocan reacciones fotoquímicas las cuales, a su vez, producen impulsos eléctricos que se transmiten a través del sistema nervioso hasta el cerebro. Estos impulsos alcanzan la corteza del lóbulo occipital del cerebro, donde son analizados, elaborados y conservados como sensaciones de luz y color; de igual forma, el cerebro recibe los impulsos provenientes de los otros órganos sensoriales. En el cerebro se interpretan y registran, se memorizan y relacionan, de manera que la percepción del mensaje de

⁵⁹ El cristalino es un cuerpo gelatinoso que actúa como una verdadera lente convergente.

⁶⁰ También denominadas *células fotosensibles*.

uno de los órganos sensoriales puede evocar una relación con una percepción adquirida a través de otro órgano. Esta cadena estímulo-sensación constituye el proceso visual sobre el que todavía quedan muchos estudios por realizar (Gerritsen, 1976:50-51, 60-61; Gibson, 1974:31; González, 1982:34; Grandis, 1985:81-83).

De lo expuesto se deduce que el comportamiento de la retina ante los estímulos luminosos marca el umbral entre la realidad física y la fisiológica (Sanz, 1996:142) al detectar estímulos luminosos y producir impulsos nerviosos. Por ello, una descripción más detallada de la retina resulta fundamental para una mejor comprensión de la teoría de los colores.

Retina

Volviendo de nuevo al símil entre la cámara fotográfica y el ojo, se puede considerar que la retina es el equivalente a la placa sensible donde se forma la imagen. No obstante, un estudio más detallado de ambas áreas de registro de la imagen, muestran significativas diferencias. El tamaño del grano de los haluros de plata que forman la capa sensible de una película fotográfica presenta una estructura y distribución similares en toda la superficie de la película. Comparativamente las células fotorreceptoras de la retina no están uniformemente repartidas en toda su superficie; concretamente, en el área denominada *fóvea* o *zona amarilla*^{61,62} las células fotorreceptoras son muy finas y están más próximas o agrupadas (Kaiser y Boynton, 1996:114). En esta zona, cada célula fotorreceptora envía su propio mensaje al cerebro (Gerritsen, 1976:51; Lindsay y Norman, 1986:91), es decir, cada célula bipolar conecta con una ganglionar⁶³. Por el contrario, en el exterior de la fóvea las células fotorreceptoras siguen una distribución menos estructurada y la distancia entre ellas aumenta

Estructura

⁶¹ También denominada *foseta* o *mancha amarilla*.

⁶² La fóvea corresponde a una superficie de sólo unos 2,5 mm de diámetro (Casas, González y Puente, 1991:43)

⁶³ Las células bipolares y ganglionares son células nerviosas encargadas de transmitir la actividad eléctrica convertida por los bastones y conos, después de haber absorbido la luz.

progresivamente. En estas áreas la capacidad de cada célula fotorreceptora de enviar la información de forma aislada se reduce progresivamente; así, la información recogida por un grupo de células bipolares convergen en una sola célula ganglionar que, a través del nervio óptico, envía su información al cerebro. La explicación de este fenómeno estriba en el hecho de que en el ojo humano existen alrededor de 130 millones de células fotorreceptoras, mientras que el nervio óptico transmisor de la información de las mismas está formado por unas 400.000 fibras nerviosas (Grandis, 1985:72,74; Valldeperas, 1995b:31).

*Área de mayor
resolución*

Por lo tanto, la mayor resolución de una imagen óptica detallada tiene lugar en el área de la fovea, debido a su alta densidad de células fotorreceptoras; asimismo, esta capacidad de resolución se ve favorecida ya que su forma en depresión reduce la luz dispersada (Kaiser y Boynton, 1996:114).

*Conos y
bastones*

La retina tiene un grosor de tan sólo 0,4 mm (González, 1982:32) y está compuesta por una serie de estratos, del orden de diez (Grandis, 1985:72; Kaiser y Boynton, 1996:101-105), entre los que se encuentran las células fotorreceptoras de los conos y los bastones, responsables de la transducción electromagnética-electroquímica que generan a partir de los estímulos luminosos.

Morfología

La retina contiene aproximadamente 6 millones de conos y unos 120 millones de bastones (Frisby, 1987:165; González, 1982:32; Lindsay y Norman, 1986:89). Ambos fotorreceptores, conos y bastones, difieren morfológica y funcionalmente. En cuanto a su aspecto morfológico, los primeros tienen la forma que indica su nombre, son cortos y gruesos, mientras que los bastones son más largos y cilíndricos.

Distribución

Un análisis pormenorizado de su distribución en la retina pone de manifiesto diferencias significativas. No existen conos y bastones en la zona donde desemboca el nervio óptico (punto ciego) y la fovea contiene únicamente conos. Fuera de la fovea, los conos y bastones se

alternan de modos diversos: a medida que se van alejando de ella los conos disminuyen en número, mientras que los bastones se hacen cada vez más abundantes hasta ser las únicas células fotorreceptoras en las zonas periféricas de la retina (Kaiser y Boynton, 1996:114-115).

Por otro lado, los segmentos exteriores de las células fotorreceptoras contienen sustancias fotoquímicas sensibles a las diversas longitudes de onda de la luz visible; estas sustancias fotoquímicas se denominan *pigmentos fotosensibles* (Grandis, 1985:72-73; Kaiser y Boynton, 1996:107, 109). Sus moléculas son capaces de absorber luz, excitándose y modificando su estructura, proceso que va acompañado de un cambio de color y la liberación de un transmisor químico (González, 1982:32). Con este mecanismo se inicia la transmisión de impulsos eléctricos desde los conos y los bastones, hasta el cerebro. Finalizada la transmisión, estos pigmentos fotosensibles vuelven a su estado inicial mediante unos mecanismos bioquímicos especiales (Kaiser y Boynton, 1996:208).

*Sustancias
fotoquímicas*

Ante un estímulo luminoso, los bastones registran solamente si hay más o menos energía, determinando el grado de luminosidad, pero no discernen el color. Su sensibilidad determina la adaptación a la oscuridad en entornos de escasa iluminación. De acuerdo a su distribución en la retina, se deduce una mayor sensibilidad ante la luz y una mejor adaptación a la visión nocturna en la periferia de la misma.

*Bastones:
acromáticos*

Cuando la intensidad de luz alcanza el nivel suficiente para estimular los conos, éstos se hacen cargo de las funciones visuales, y relevan a los bastones. Los conos son células fotorreceptoras que registran las longitudes de onda del estímulo luminoso recibido y, consiguientemente, perciben las diferencias cualitativas y cuantitativas del mismo. Atendiendo a su distribución en la retina, se deduce que el centro de ésta presenta una mayor sensibilidad para ver y distinguir el color, y esta aptitud disminuye hacia las partes externas.

*Conos:
cromáticos*

*Visión
tricromática*

En 1801 el físico Thomas Young y más tarde Hermann von Helmholtz, sugirieron que probablemente la retina contenía tres clases diferentes de sustancias sensibles a la luz, cada una de las cuales presentaba una máxima sensibilidad en una determinada región del espectro (Kaiser y Boynton, 1996:18; McLaren, 1983:63-64; MacNichol, 1964:48). Posteriormente, la hipótesis de los tres fotorreceptores de Young-Helmholtz fue confirmada mediante mediciones microespectrofotométricas efectuadas en las células individuales de los conos en la retina. Las curvas de sensibilidad espectral de cada uno de los tres conos muestran un determinado máximo de absorción en λ_{max} 420, 534 y 563 nm (Bowmaker y Dartnall, 1980:505)⁶⁴, y se encuentran dentro de los intervalos de las longitudes de onda cortas, medias y largas, respectivamente, que permiten definir la teoría tricromática de la visión del color⁶⁵.

Según se muestra en la figura II.15, las curvas espectrales de absorción de cada uno de los tres conos, presentan una superposición considerable en amplios intervalos del espectro visible.

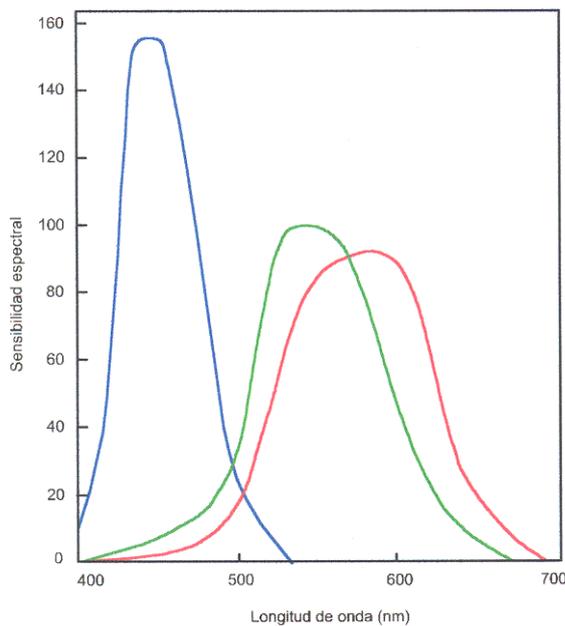


Fig. II.15. Las curvas muestran la amplitud de sensibilidad de los respectivos tipos de conos y el solapamiento con los adyacentes. En cada amplitud de recepción existe un máximo de sensibilidad, que va decreciendo hacia ambos lados de acuerdo con la trayectoria de la curva (MacLaren, 1983:69).

⁶⁴ El parámetro λ_{max} expresa la longitud de onda a la que se produce la máxima absorción.

⁶⁵ Estos valores de máxima sensibilidad varían según unos u otros autores consultados en el orden de aproximadamente 15 nm (Gerritsen, 1976:53; González, 1982:32; MacLaren, 1983:72; MacNichol, 1964:56; Thornton, 1978:284-285; Valldeperas, 1995a:32).

El proceso de visión del color puede dividirse en dos etapas (Kaiser y Boynton, 1996:24-25; MacNichol, 1964:56; Valdeperas, 1995b:35). De acuerdo con la teoría tricromática de Young-Helmhotz, en una primera etapa, el órgano de la vista es estimulado por la información suministrada por el estímulo de color y la transforma en tres tipos de códigos o señales, que a su vez son transmitidos a través de impulsos nerviosos. En una segunda etapa, y según la teoría de los procesos opuestos⁶⁶ de Hering (De Valois y De Valois, 1997:97-115; Hurvich, 1978:33-61; Jameson y Hurvich, 1975:128; Kaiser y Boynton, 1996:250-253), se procesan los datos recibidos en forma de impulsos nerviosos, transmitiéndolos a través del sistema nervioso hasta el cerebro, donde se produce la correspondiente sensación de color.

*Teoría
tricromática*

*Teoría de los
procesos
opuestos*

Cabe señalar, que a las tres clases de conos se les ha denominado rojo, verde y azul, asumiendo que estos términos se refieren a la percepción de la luz monocromática cuya máxima excitación corresponde a cada uno de estos colores; si bien, los conos rojos son una excepción, ya que su curva tiene su punto máximo de excitación en la región amarilla del espectro aunque su campo se extiende suficientemente dentro del rojo para ser sensible también a este último. No obstante, y aunque lo más correcto sería definir las diferentes sensibilidades por su correspondiente longitud de onda, la terminología más comúnmente utilizada es rojo, verde y azul (McLaen, 1983:73).

Como consecuencia de que cada una de las tres clases de conos poseen un amplio espectro de absorción (Fig. II.15), se deduce que el

⁶⁶ La idea fundamental de esta teoría es que la apariencia de color se genera por medio de tres procesos o canales neurales independientes, dos canales cromáticos opuestos (rojo-verde y amarillo-azul), y un canal acromático (blanco-negro). Cada miembro de un par de opuestos inhibe al otro; así los dos canales cromáticos opuestos pueden tomar valores positivos, negativos o cero. Cuando, por ejemplo, el canal amarillo-azul es positivo, el resultado es un color amarillo, y si es negativo, el resultado es un color azul. Tal incompatibilidad de amarillo y azul se explica por el hecho de que el canal amarillo-azul nunca tiene simultáneamente valores positivos y negativos; así, nunca veremos un color amarillo-azulado o azul-amarillento, y si veremos la influencia del otro canal cromático, amarillo-rojizo, amarillo-verdoso, azul-verdoso o azul-rojizo.

ojo, como totalidad de los tres conos, será sensible a una gama de longitudes de onda mucho más amplia.

Sin luz no hay color

Máximos y mínimos

Como ya se ha definido, el color es una sensación que corresponde a la interpretación que da el cerebro de una "señal" luminosa que llega a la retina, es decir, se trata de una relación entre un estímulo físico y lo que es experimentado subjetivamente, y por lo tanto, sin luz no hay color. Cuando el órgano visual está adaptado a la oscuridad, la mínima intensidad luminosa que debe tener una fuente de radiación para producir sensación de luz, es a lo que se conoce como *umbral absoluto*, si bien, es necesario una intensidad mayor para que se pueda producir sensación de color. En niveles bajos de iluminación, correspondientes a la *visión escotópica* o *crepuscular*, trabajan principalmente los bastones, y en la *visión fotópica* o *diurna* actúan únicamente los conos (Kaiser y Boynton, 1996:107). El umbral máximo para los conos sería el *deslumbramiento* y la mínima intensidad que produce la sensación de color es el *umbral cromático*.

Visión fotópica

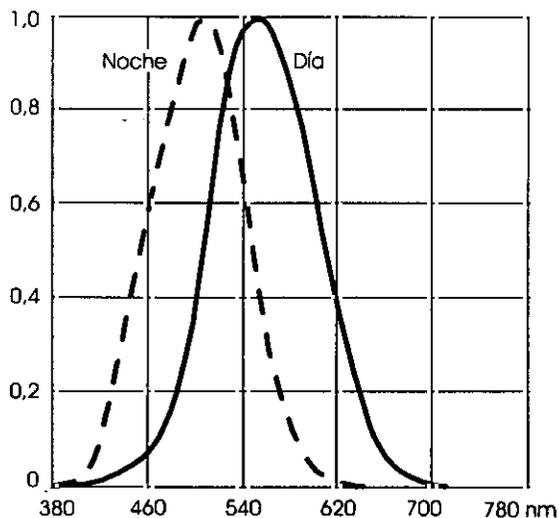
Visión escotópica

Como muestra la figura II.16, la sensibilidad espectral del ojo varía de un tipo de visión a otro. En visión diurna o fotópica, la sensibilidad del ojo es mayor para longitudes de onda de aproximadamente 555 nm (luz amarilla) (Grandis, 1985:74; Kaiser y Boynton, 1996:140); esto es debido a que los conos que predominan en la retina son rojos y verdes, y al ser estimulados conjuntamente por igual, generan la sensación de amarillo. En visión escotópica o crepuscular la sensibilidad es máxima a 505 nm (Grandis, 1985:74; Kaiser y Boynton, 1996:140), ya que las células fotorreceptoras de los bastones son más sensibles a la luz verde azulada (González, 1982:32)⁶⁷. Por esta razón, de noche puede ser más eficaz una luz verde

⁶⁷ La transición entre ambas curvas de sensibilidad del ojo humano según se trate de la visión fotópica o crepuscular, que da lugar al *efecto Purkinje*, explica cómo al atardecer se tiene una impresión azulada de un paisaje lejano, mientras que a plena luz del día puede tener sus propios tonos claramente rojizos o verdosos.

azulada que una amarilla, mientras que de día, suele ser más eficaz una luz amarilla-rojiza.

Fig. II.16. Curvas de sensibilidad espectral de visión fotópica y escotópica (Casas, González y Puente, 1991:43).



Por otra parte, el órgano de la vista posee la capacidad de *adaptación* en cada momento a la cantidad y composición⁶⁸ de la iluminación de contemplación, lo que permite la mejor posibilidad de reconocimiento. Es decir, este mecanismo de adaptación a la nueva situación luminosa, le permite establecer las diferenciaciones adecuadas, tanto en lo que respecta a una mayor claridad como a una mayor oscuridad, así como reconocer las diferencias de color (Gerritsen, 1976:53-54; Kaiser y Boynton, 1996:198, 204; Küppers, 1992:15-17).

Adaptación visual

La percepción del color varía mucho según el observador, tal como se deduce de las estimaciones que se hacen de los colores y sus diferencias. Para definir un ojo normal a la visión del color se utiliza un criterio puramente estadístico, teniendo en cuenta que existe un pequeño

⁶⁸ La acomodación visual a las variaciones espectrales de iluminación, permite que el color percibido de un objeto bajo diferentes iluminaciones, no suponga unos cambios apreciables. Así, la constancia o permanencia de color es esta estabilidad del color percibido a pesar de las alteraciones de las características del iluminante. Estudios prácticos y teóricos sobre la naturaleza de los mecanismos de la constancia del color han sido desarrollados por Land (1997:144-159), Wandell (1997:161-175) y Jameson y Hurvich (1997:178-198).



número de personas que tienen deficiencias notorias en la visión del color.

Anomalias
visuales

Estas anomalías del órgano visual, más frecuentemente congénitas que adquiridas, son las bases que confirman la teoría tricromática de la visión del color (Kaiser y Boynton, 1996:20). El *anómalo tricromático* es el individuo que tiene las tres clases de conos, pero no ve el color como un observador con visión considerada normal. Los individuos *dicromáticos*, son ciegos a uno de los colores: rojo, verde o azul⁶⁹, al estar privados de uno de los tres conos fotorreceptores de la visión coloreada, aunque con los dos restantes reproducen todos los colores posibles (Hsia y Graham, 1997:200-216; Kaiser y Boynton, 1996:415); esta anomalía visual es la más frecuente y se denomina *daltonismo*. (Billmeyer y Saltzman, 1981:15-16; Grandis, 1985:79). Se consideran ciegos al color las personas que no son capaces de distinguir un color de otro (como monocromáticos); la causa de este comportamiento tiene su origen en que la retina presenta bastones y una sola clase de conos fotorreceptores. Igualmente, también son ciegos al color las personas que ven solamente con los bastones (acromáticos), al no tener en la retina ningún cono fotorreceptor (Hsia y Graham, 1997:200, 216-217; Kaiser y Boynton, 1996:415). Señalar que si bien las anomalías citadas están consideradas a nivel de los fotorreceptores, también pueden ser debidas a su transmisión neural⁷⁰ (Hurvich, 1978:44-50).

Con objeto de evitar ambigüedades, a continuación se recuerda la convención de términos usados: los tonos cromáticos (rojo, verde, azul, etc.) se refieren a las sensaciones o percepciones de color; los estímulos de color o luminosos se utilizan para especificar longitudes de onda

⁶⁹ Las formas de dicromatismo que ocurren más frecuentemente son la *protanopia* (ciegos al color rojo), *deuteranopia* (ciegos al color verde) y *tritanopia* (ciegos al color azul); si bien esta última deficiencia ocurre con menos frecuencia que las otras dos (Hsia y Graham, 1997:200-216).

⁷⁰ Determinados estudios al respecto han sido realizados por Geschwind y Fusillo (1997:261-275), Rizzo, Smith, Pokorny y Damasio (1997:277-289), y Heywood, Cowey y Newcombe (1997:291-308).

concretas (e. g. 420 nm), o bien para intervalos de longitud de onda en el caso de estímulos no específicos (estímulos de longitudes de onda media, estímulos de longitudes de onda corta, estímulos de longitudes de onda larga); y finalmente cuando se hace referencia a la sensibilidad espectral de los conos fotorreceptores, se utilizan los términos: azul, verde y rojo⁷¹.

Las tres sensibilidades espectrales de nuestro sistema visual, cuando son expuestas a los estímulos de longitudes de ondas cortas, medias, y largas del espectro, producen, respectivamente, las sensaciones de color: azul, verde y rojo, siempre y cuando sean activadas por separado. Sin embargo, estas sensibilidades a los estímulos de color pueden ser activadas en mayor o menor medida, y sus posibles combinaciones mutuas son infinitamente variadas; en consecuencia, el sistema visual humano puede distinguir un gran número de colores.

Estas tres sensibilidades del ojo que generan la sensación de color azul, rojo y verde, se consideran como sensibilidades primarias. Ahora bien, cuando dos de estas sensibilidades primarias son simultáneamente activadas y en las mismas proporciones, se producen otras sensaciones de color secundarias (Fig. II.17) denominadas amarillo, magenta y cian (Gerritsen, 1976:68):

*Sensaciones
cromáticas
primarias y
secundarias*

Rojo + Verde: sensación de color amarillo

Rojo + Azul: sensación de color magenta

Verde +Azul: sensación de color cian

Asimismo, si las tres sensibilidades al color son simultáneamente activadas y en su máxima intensidad, se percibe la sensación de color blanco. Cuando se disminuye la intensidad de la activación de las tres

*Sensaciones
acromáticas*

⁷¹ Aunque la forma más correcta quizás sea la de definir las diferentes sensibilidades por su longitud de onda, se ha optado por ésta para facilitar la agilidad o comprensión del desarrollo posterior.

sensibilidades al color, y se mantiene su equilibrio mutuo, sin que ninguna de ellas domine sobre las restantes, se obtiene una sensación acromática correspondiente a los colores neutros. Como muestra la figura II.18, ésta sensación acromática puede variar dentro del rango blanco-negro pasando por diferentes gamas de grises.

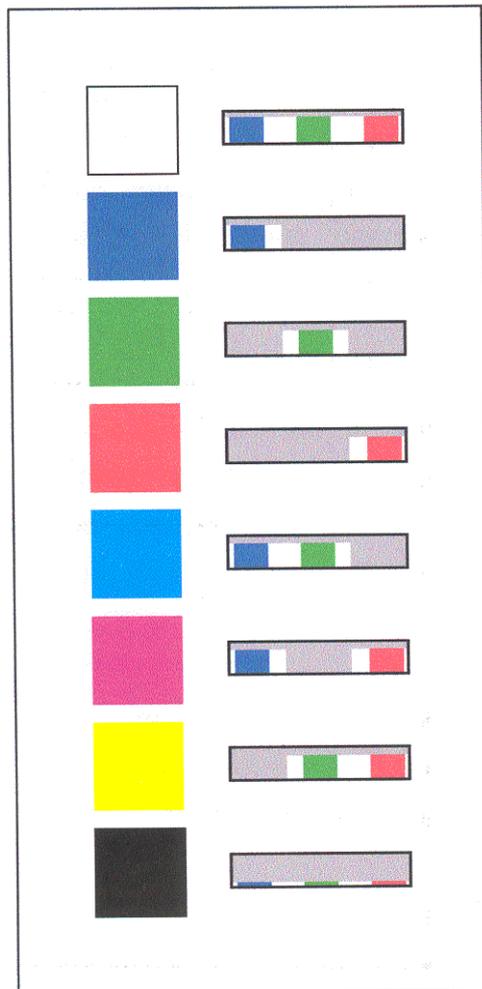
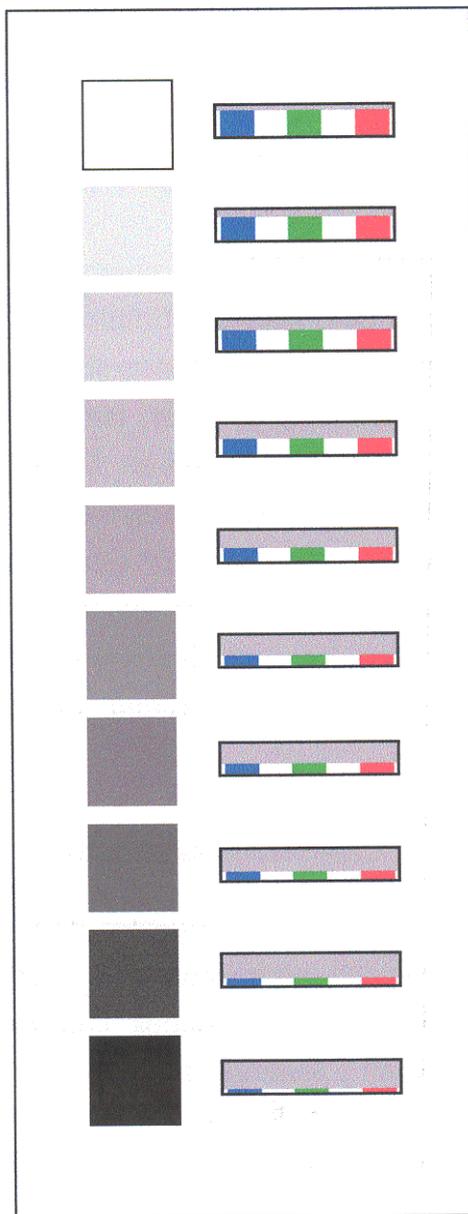


Fig. II.17. Esquemas de percepción según las ocho posiciones extremas de activación de las tres sensibilidades espectrales del ojo a las longitudes de ondas cortas, medias y largas.

Fig. II.18. Colores neutros y sus correspondientes esquemas de percepción. Los esquemas de percepción muestran como las tres sensibilidades espectrales del sistema visual son activadas por igual manteniendo un equilibrio mutuo.



II.1.2.- Características y especificación del color

Como resultado de la interacción de la luz con la materia surgen los estímulos luminosos los cuales, al ser detectados por el órgano visual, generan la sensación de color, responsable del aspecto cromático de dicha materia. Estos materiales reciben el nombre de *cuerpos de color* (Küppers, 1992:151; Moreno, 1996:97); su aspecto está relacionado con los rayos luminosos remitidos o transmitidos de forma selectiva por la materia y no por los absorbidos.

Cuerpos de color

El color de un cuerpo es una experiencia subjetiva, pero la longitud de onda del estímulo luminoso que provoca dicha sensación es una magnitud física mensurable objetivamente. Si bien la cuestión ideal sería considerar el color, tanto en su aspecto psicológico como en su aspecto físico, esto no es factible de forma exacta al no existir una relación cuantificable directa y constante entre el estímulo y la sensación producida. Por esta razón se pueden establecer dos criterios para definir el color: el subjetivo, que estudia el color tal y como lo ve un observador, y el objetivo, basado en la medición de las propiedades físicas de la radiación (Hunt, 1978:321-322).

Color: aspecto psico-físico

II.1.2.1. Características subjetivas del color

Los diversos aspectos de la modulación de un estímulo de color se expresan comúnmente, a partir de tres parámetros o atributos⁷² psicológicos relacionados con nuestras sensaciones de color: tono, saturación y luminosidad (Astrua, 1982:122-123; Billmeyer y Saltzman, 1981:17-19, 186-187; Fabris y Germani, 1987:56-58; Gerritsen, 1976:95-99; Hunt, 1957:78; Kaiser y Boynton, 1996:42-43, Palazzi, 1995:24).

Parámetros psicológicos

⁷² Quizás el término más correcto sea el de atributos, ya que éstos describen sensaciones y no el objeto visto ni los estímulos físicos que llegan al órgano visual.

- a) *Tono*. Se refiere al aspecto cualitativo de un color. Cuando se identifica algo como rojo, verde o amarillo, se está describiendo un tono. Es la sensación principal de color y, en su aspecto físico, está directamente relacionada con su longitud de onda dominante dentro del espectro luminoso. Los tonos se presentan bajo una amplia variedad, ya que las longitudes de onda pueden combinarse de un modo casi infinito.

En los diversos sistemas de representación de los colores, se parte de varios tonos base. Algunos tonos se describen como primarios debido a que todos los demás colores pueden ser obtenidos mediante su mezcla adecuada. Un órgano visual normal tiene la facultad de percibir una diferencia de tonos entre radiaciones que difieren de 2 a 4 nm en su longitud de onda (Clerc, 1975:888), esto significa que, dentro de la banda espectro visible, son visibles más de cien tonalidades distintas.

- b) *Saturación*. Se refiere al aspecto cuantitativo de un color. Cuando un color tiene su máxima pureza o fuerza, en su aspecto físico, le corresponde una única y determinada longitud de onda dentro del espectro visible; se dice entonces que tiene la máxima saturación y se relaciona con una escala de intensidad relativa.

La saturación varía en relación con la cantidad de blanco añadida al tono. Un color se considera más saturado cuanto menos blanco contenga.

- c) *Luminosidad*. Este parámetro se refiere a la capacidad de reflexión de un color, es decir, a la relación entre la cantidad de luz que recibe y la que refleja o transmite. Todo color pigmento, esté o no saturado, tiene una determinada capacidad

de reflejar la luz blanca que incide sobre él; esta capacidad se denomina luminosidad de un tono en términos subjetivos, y luminancia⁷³ en términos objetivos.

Colores sucios

En colores pigmento, la luminosidad varía al añadir un color negro a un tono ya que el negro resta luz al color; a su vez, a este color negro se le puede añadir simultáneamente blanco, lo que equivale a añadir gris a un tono. Señalar que la adición de gris influye de forma especial ya que siempre produce colores *sucios* o *turbios*; es decir, con tendencia acromática, con pérdida de saturación y luminosidad. En ciertos casos, esta adición puede variar incluso el mismo tono del color: como en el caso del amarillo que, al añadirle gris o negro, se vuelve verdoso; el rojo se vuelve marrón, etc.

Valor

Por tanto, añadiendo gris a un color variará su saturación, su luminosidad y, a veces, también el tono. La saturación variará en razón de la cantidad de blanco contenida en el gris y la luminosidad, en razón del negro contenido en el gris. Para indicar tanto la variación de la saturación como la correspondiente a la luminosidad se utiliza el término *valor*.

*Otros aspectos
subjetivos*

Por otra parte, existen otras características subjetivas referentes al color, que son el resultado del proceso de distintas asociaciones establecidas en el cerebro durante la percepción visual (Fabris y Germani, 1987:84-85, 91-94; Gerritsen, 1976:167-168). La valoración de colores como *calientes* y *fríos* no depende de la diferencia efectiva de radiaciones, sino de una relación de sensaciones⁷⁴. Generalmente, se acostumbra a considerar como calientes los colores asociados, por

⁷³ Luminancia es el término técnico que se refiere a la intensidad por unidad de área de luz que viene desde una superficie al ojo. Se expresa en candelas por metro cuadrado (cd/m²); esta unidad es llamada a veces *nit*.

⁷⁴ Véase cap. II, ap. II.1.1.3. *Percepción luz-color*, págs. 92, 93.

ejemplo, con la idea de Sol, fuego, y asociar el color blanco de la nieve, o azul del cielo con la idea de frío.

La sensación de movimiento es otra característica subjetiva de los colores; en particular se observa cómo los colores claros y fríos ensanchan, elevan, alejan, creando una amplitud espacial y, por el contrario, los colores oscuros y calientes bajan, pesan, cierran, generando una sensación de proximidad.

II.1.2.2.- Características objetivas del color

Trasladar la medida subjetiva de una sensación cromática en términos objetivos, requiere una laboriosa interpretación de los mecanismos visual y psicológico, que transforman los estímulos luminosos en sensaciones de color. La dificultad del sistema visual humano y de las leyes por las que se rige su funcionamiento, no del todo conocidas, es responsable de que la métrica del color se centre más en los parámetros que caracterizan los estímulos luminosos de color, que en la propia sensación de color producida en el observador (Astrua, 1982:123-124; Billmeyer y Saltzman, 1981:17-19, 187-188). Los estímulos luminosos se pueden medir gracias a medios espectrofotométricos, en los que se relaciona el estímulo luminoso remitido por una superficie blanca estándar, con el estímulo luminoso del color que se mide.

*Métrica del
color*

Estos sistemas permiten definir la curva de absorción espectral de diferentes superficies de color, y en consecuencia, determinar los distintos porcentajes de absorción (a los que corresponden los porcentajes inversos de transmisión o reflexión) de todas las longitudes de onda del espectro visible. De este modo, cualquier color puede ser representado gráficamente en un sistema de coordenadas (Fig. II.19); en las abscisas las longitudes de onda y en las ordenadas los distintos porcentajes de absorción, o bien, de reflexión o transmisión.

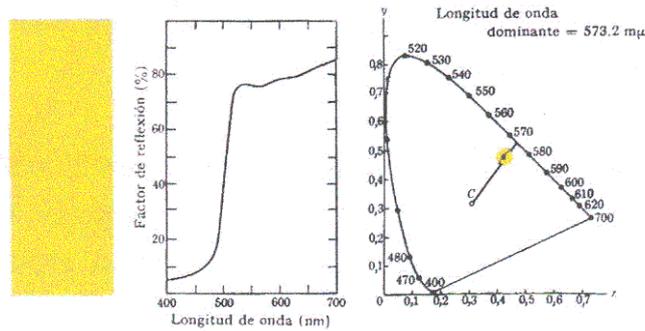


Fig. II.19. Curva de absorción espectral correspondiente a un color amarillo, y representación del mismo en el diagrama CIE.

II.1.2.3.- Especificación del color

Un objeto puede ser caracterizado a partir de una serie de propiedades, como son la forma, el peso y el color. La forma y el peso pueden ser definidos físicamente mediante reglas y escalas, y el juicio sobre los mismos puede realizarse táctil o visualmente. Sin embargo, el juicio o discernimiento del color está limitado exclusivamente al sentido visual, por lo que no existe la posibilidad de establecer una asociación con la información aportada por otros sentidos; situación que impide poder realizar una identificación más exacta (Kaiser y Boynton, 1996:36).

No obstante, la descripción ordenada y específica del color es una cuestión esencial a la hora de hablar de esta propiedad. Inicialmente, el término *color* fue utilizado en el arte mucho antes que en la ciencia, por lo que el lenguaje del color es más poético que real. Científicamente resulta insuficiente especificar los colores sólo por su tono, como vulgarmente se hace utilizando simplemente una palabra o grupo de palabras: azul cielo, rosa pálido, etc. A cada uno de los colores se le ha de poder asignar una denominación concreta que permita reproducirlo inequívocamente y con exactitud.

*Determinación
concreta*

Como ya se ha señalado, el color de un determinado cuerpo depende, además del observador, de la composición espectral de la luz con que se ilumina; así, por ejemplo, el color de una superficie que bajo la luz del día se clasifica como rojo saturado, bajo la luz crepuscular sería de un rojo oscuro no saturado y bajo la luz de la luna sería prácticamente gris. Por lo tanto, no es aconsejable tratar de especificar el color si previamente no se define la luz con que se va a iluminar.

Existen distintos sistemas que permiten ordenar y relacionar sistemáticamente todas las gamas de colores, mediante figuras o cuerpos geométricos denominados *espacios* o *sólidos de color* (Fabris y Germani, 1987:58; Küppers, 1992:58). Una parte de estos sistemas están basados en una colección de patrones de color previamente establecidos como, por ejemplo, el sistema Ostwald, el sistema Munsell, el cubo de Hicethier, el romboedro de Küppers, entre otros.

*Algunos
sistemas de
ordenación*

Asimismo, la obtención de un catálogo de colores a partir de un sólido de color, por subdivisión de sus escalas (tono, saturación y luminosidad), debe permitir que cualquiera de sus colores pueda ser reproducido por mezclas exactas de colorantes de composición química específica o bien, por mezcla aditiva de determinadas luces de color, según el sistema. De esta manera, cuando se quiera especificar un color bastará comparar la muestra con los colores estándar del catálogo y asignarle las coordenadas correspondientes. Estos sistemas están sujetos a la elaboración de un catálogo con el mayor número de colores diferentes posibles que puede discernir un observador normal.

Por otra parte, existen otros sistemas, como es el sistema CIE, que no están basados en muestras o patrones reales sino en la especificación del color a partir de valores de absorción espectral.

Teniendo en cuenta el proceso experimental seguido en el desarrollo y posterior aplicación práctica del SIRECRAMT, como

sistema de reproducción del color, dentro de los sistemas de especificación cromática citados en esta Memoria, únicamente se definirán los correspondientes al cubo de Hickethier y al sistema CIE.

II.1.2.3.1.- Cubo de Hickethier

Para asignar a cada color una determinada posición en un sistema que coordine el tono con su saturación y su luminosidad, es necesario representar los colores por medio de un sólido tridimensional; en este sentido el hexaedro es la figura geométrica que mejor se adapta para la representación gráfica de los sistemas o procedimientos tricromáticos (Grandis, 1985:44; Hickethier, s.a.:19; Küppers, 1992:78; Küppers, 1994:149).

Se parte del hecho de que el órgano visual cuenta con tres tipos de células fotorreceptoras, que a su vez generan tres clases diferentes de códigos correspondientes a los colores azul, verde y rojo. Para representar gráficamente las leyes de la visión en este sistema, se consideran los colores azul, verde y rojo como vectores que forman entre sí un ángulo de 90° (Küppers, 1992:57-60). Esta distribución espacial permite la obtención de una figura geométrica correspondiente a un hexaedro (Figs. II.20 y II.21). Este hexaedro regular o cubo se apoya en uno de sus vértices, donde se sitúa el color negro. La diagonal que une este vértice con su opuesto, corresponde a la escala acromática con el blanco arriba y el negro abajo. Las aristas que parten del vértice inferior, corresponden a los colores azul, verde y rojo; y las del vértice superior, corresponden a los colores amarillo, magenta y cian⁷⁵.

⁷⁵ El término *cian*, no está recogido en el Diccionario de la lengua española de la Real Academia en su vigésima primera edición, si bien, en algunos diccionarios técnicos como el de Beigbeder (1988), aparece expresado de la forma descrita, y es el que se utiliza en esta Memoria. En textos de habla inglesa así como por la Comisión Internacional de Iluminación, CIE, el término utilizado es *cyan*; traducciones de estos textos extranjeros al castellano aparece, por lo general, expresado en los mismos términos que en el idioma original.

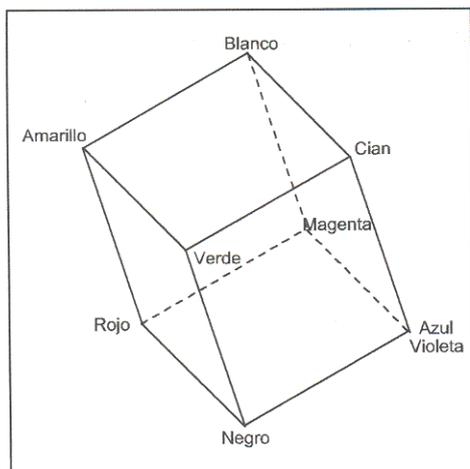


Fig. II.20. Representación esquemática en el cubo de Hickethier de la ubicación de los colores correspondientes a las ocho sensaciones extremas del órgano visual, seis cromáticos: amarillo, magenta, cian, rojo, verde y azul; y dos acromáticos: blanco y negro.

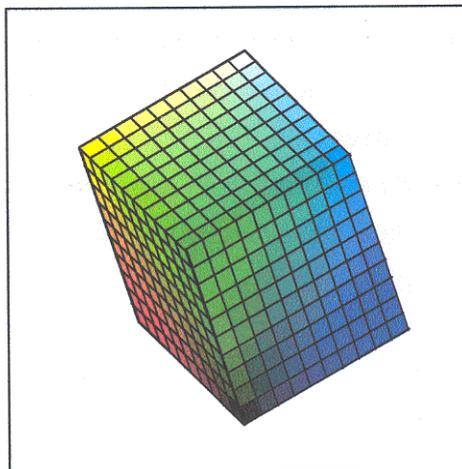


Fig. II.21. Cubo de los colores de Hickethier con subdivisiones de diez partes en cada una de las aristas, lo que permite representar un total de mil modulaciones distintas de color.

Cada arista está dividida en diez subdivisiones dispuestas perpendicularmente y numeradas; de esta manera el sólido de color se configura en mil subdivisiones iguales, que suponen mil modulaciones distintas de color (Grandis, 1985:45-46; Hickethier, s.a.:18; Küppers, 1994:122-123). Cada modulación de color queda especificada por tres cifras correspondientes a cada uno de los colores base (amarillo, magenta y cian) que lo componen, como se verá posteriormente.

Para su aplicación práctica se utilizan las diez partes o planos paralelos en que se secciona el sólido; de esta forma se obtienen diez tablas cuadradas (Küppers, 1992:76). Cada una de ellas está subdividida en cien cuadrados que corresponden a distintas modulaciones de color; a su vez cada modulación está especificada por las tres cifras mencionadas (Fabris y Germani, 1987:61-62; Hickethier, s.a.:18; Moreno, 1996:52-53).

*Adaptación a
los sistemas
tricromáticos*

Las tablas de colores de superficie cuadrada resultan muy comprensibles y explícitas a la hora de referirse de forma cuantitativa a los colores de partida, pero no ofrecen ventaja alguna en cuanto a la presentación de las gamas de color en lo que a sus características cualitativas se refiere. No obstante, la representación de los colores basada en una forma geométrica cúbica resulta adecuada para mostrar la realidad, ya que este espacio de color es especialmente gráfico para los sistemas tricromáticos de reproducción del color, como son, además del sistema de reintegración que se desarrolla en esta Memoria, la fotografía en color, los sistemas de impresión, la televisión en color y el sistema RGB, utilizado en los ordenadores (Robinson *et al.*, 1987:176-177).

II.1.2.3.2.- Sistema CIE

Este sistema permite obtener una medida objetiva del color, directamente derivada de su posición en el espectro electromagnético de luz blanca (Billmeyer y Saltzman, 1981:34-51). El diseño y desarrollo de este sistema se basa en medidas experimentales del color y tratamiento matemático de los datos obtenidos; para las medidas de color se parte de las características físicas de la luz.

El sistema CIE, propuesto por la Comisión Internacional de Iluminación, parte de la premisa de que el estímulo de color es el resultado de la combinación de tres factores: una fuente de iluminación, la interacción de la luz con la materia y el órgano visual del observador. Las medidas colorimétricas se realizan bajo unos estándares de fuentes de iluminación y de observador.

El sistema CIE especifica el color, según la teoría tricromática de visión, por medio de tres valores numéricos denominados *valores triestímulo* X, Y, y Z. Los instrumentos denominados colorímetros miden directamente los valores triestímulo por medio de lecturas por

reflexión filtradas, relacionadas con la respuesta espectral del ojo humano.

Otro método para determinar los valores triestímulo es mediante un espectrofotómetro, aparato que registra las lecturas por transmisión o reflexión del color a determinados intervalos de longitudes de onda, y da como resultado una curva espectrofotométrica (Gerritsen, 1976:165). Cada lectura resulta del producto de los siguientes parámetros: la potencia del iluminante estándar, la reflectancia o transmitancia del objeto, y las denominadas *valencias primarias*⁷⁶ del observador estándar; la suma de los productos de estos tres parámetros, correspondientes a todas las longitudes de onda dentro del espectro visible, proporciona los valores triestímulo. Estos valores representan los tres estímulos hipotéticos del color, que serían necesarios en una mezcla aditiva para igualar un determinado estímulo de color. Señalar que dichos valores triestímulo de colores están referidos a un tipo de iluminante concreto normalizado, así como a un observador estándar que también es necesario especificar.

La representación gráfica de los colores así obtenidos se realiza en un diagrama cromático, denominado diagrama CIE (Fig. II.22). El diagrama es trazado con el sistema de *coordenadas cromáticas*⁷⁷ x e y , obtenidas a partir de los valores triestímulo.

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{X}{X+Y+Z} & y &= \frac{Y}{X+Y+Z} & z &= \frac{Z}{X+Y+Z} \\
 & & & & & \text{(II.3)} \\
 & & x + y + z &= 1 & &
 \end{aligned}$$

⁷⁶ Las valencias primarias corresponden a tres luces de color, relacionadas con los tres campos de recepción de los tres tipos de conos.

⁷⁷ Las coordenadas cromáticas, también denominadas coordenadas o coeficientes tricromáticos, son y , x y z , si bien, la coordenada z no tiene representación en el diagrama cartesiano de dos dimensiones.

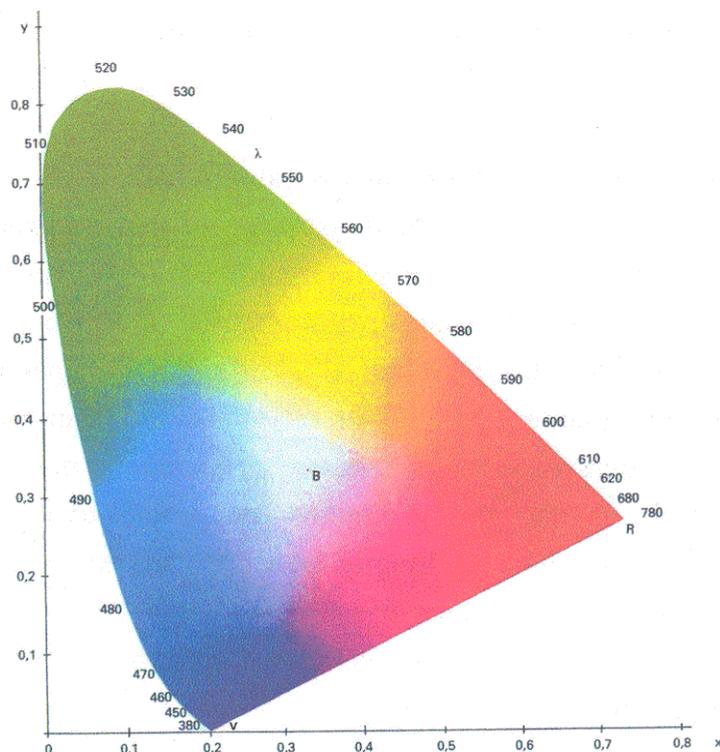


Fig. II.22. Diagrama CIE. En la periferia de la curva se representan los colores *puros, saturados o monocromáticos*; la línea VR que une los violetas y los rojos, corresponde a los colores púrpuras o magentas de máxima saturación; y el punto B representa al color blanco formado por el espectro continuo de todas las radiaciones monocromáticas con el mismo valor energético.

En cualquier caso, es conveniente observar que este diagrama bidimensional no define un espacio homogéneo; es decir, la distancia entre dos puntos no representa realmente la diferencia perceptiva visible (Palazzi, 1995:46).

No define un espacio homogéneo

El diagrama cromático no es recomendado para representar superficies o cuerpos de color, sino más bien luces de color, ya que está basado en las características aditivas de la luz y no en las sustractivas de los pigmentos (Yule, 1967:173).

Aplicación

El sistema CIE no coincide de forma congruente con la forma de trabajo del órgano de la vista, ya que éste parece trabajar con mayor exactitud en la métrica de los colores (Küppers, 1992:24, 140-141). El problema estriba en la dificultad de establecer una relación entre los valores obtenidos y las sensaciones generadas, pues la composición espectral del estímulo luminoso de color no posee ninguna relación fija con la sensación de color (Casas, González y Puente, 1991:78). Este sistema se suele aplicar en la detección de igualdad o desigualdad de los estímulos de color generados por distintas muestras. No obstante, la increíble sensibilidad del ojo para detectar pequeñas diferencias de color todavía no ha sido igualada por sistemas artificiales (Kaiser y Boynton, 1996:314; Robinson *et al.*, 1987:173).

II.2.- REPRODUCCIÓN DEL COLOR

En términos generales, la reproducción del color debe entenderse como el proceso que permite reproducir o duplicar una sensación cromática generada por un objeto en el sistema visual, mediante la combinación de ciertos colores en determinadas proporciones. Concretamente tiene como objetivo el reproducir los estímulos de color originales, aunque no necesariamente los colores originales.

*Duplicar una
sensación
cromática*

Dos estímulos de color, uno correspondiente al color patrón y otro al color reproducido, son iguales cuando las longitudes de onda remitidas al ojo por cada uno de ellos son absorbidas de la misma forma por las tres clases de conos fotorreceptores (Kaiser y Boynton, 1996:163).

En relación al SIRECRAMT, la reproducción del color está dirigida a reproducir el estímulo de color original de la obra⁷⁸, en las áreas de pérdida o lagunas de la capa pictórica, tomando como

⁷⁸ Dentro, por supuesto, de los límites establecidos por las exigencias técnicas de reintegración. Véase cap. I, ap. I.3. *Exigencias técnicas*, págs. 53, 54.

referencia el color original de la pintura adyacente, es decir, se pretende establecer una igualación cromática.

*Igualación
cromática
invariable*

Condicionantes

La igualación cromática puede ser de dos tipos: invariable y condicional (Billmeyer y Saltzman, 1981:142-145). Una igualación cromática invariable es aquella en la que el color original y el reproducido presentan la misma apariencia ante todos los observadores y bajo distintas fuentes de iluminación. Este tipo de igualación no se lleva a cabo en el SIRECRAMT, ya que sería necesario cumplir una serie de condicionantes, ciertamente utópicos, como son: usar los mismos pigmentos y en las mismas proporciones que los empleados en la ejecución del color original⁷⁹, utilizar la misma técnica y procedimiento pictórico, y además que la zona reintegrada presentara las mismas modificaciones que el original ha experimentado como consecuencia de su envejecimiento; si se cumplieran estas condiciones, la curva espectrofotométrica del color original y de la reproducción serían exactamente iguales. Sin embargo, además de la dificultad que entrañaría llevar a cabo una igualación cromática de este tipo, habría que considerar que el proceso de reintegración desarrollado de esta forma supondría efectuar una falsificación matérica de los componentes de la obra, contraria a las exigencias técnicas marcadas por los criterios de reintegración⁸⁰, por estas circunstancias, esta metodología es totalmente descartada.

Generalmente, los colores que se utilizan en el proceso de reproducción del color se reducen a un número muy limitado, y comúnmente, presentan distinta composición que los colores que se usaron para realizar el color patrón original. Este aspecto condiciona la igualación del color original con el color de la reproducción (Kaiser y Boynton, 1996:314), y en realidad, este proceso se limita a una

⁷⁹ Esto supondría tener que disponer de un amplio número de pigmentos que cubriesen las posibilidades existentes de cualquier tipo de color a reproducir.

⁸⁰ Véase cap. I, ap. I.3. *Exigencias técnicas*, págs. 53, 54.

aproximación de los mismos bajo unas condiciones determinadas. A este tipo de igualación cromática, Billmeyer y Saltzman (1981:144) la denominan *condicional*.

*Igualación
cromática
condicional*

En este tipo de igualación cromática pueden tener lugar fenómenos de metamerismo, ya que para la obtención del color reproducido se utilizan pigmentos diferentes a los empleados en el original, si bien su mezcla adecuada permite conseguir un mismo estímulo de color bajo una determinada fuente de iluminación. Sin embargo, en realidad ambos estímulos de color -el original y el reproducido- presentarán distintas curvas de distribución espectral, ya que éstas son generadas por pigmentos distintos, cada uno de los cuales tiene una absorción de luz característica. Teniendo en cuenta que el estímulo de color está determinado no sólo por el pigmento, sino también por la fuente de iluminación, si ésta varía podrán percibirse diferencias entre el color original y el color reproducido (Agoston, 1987:40-41, 94-95; Gerritsen, 1976:154; Staniforth, 1985:101).

Metamerismo

Tanto en el SIRECRAMT que se propone, como en las técnicas ya existentes de reintegración y la mayor parte de los sistemas de reproducción del color: fotografía en color, impresión en color, se realiza una igualación cromática condicional (Küppers, 1992:136).

Para una mejor comprensión del proceso de reproducción del color, es conveniente recordar los tres factores que determinan un color, o más concretamente una sensación de color: fuente luminosa, objeto y observador. Hay que señalar que la posibilidad de actuación sobre estos factores es limitada; así, en muy pocas ocasiones es posible modificar la curva de distribución espectral de la fuente luminosa bajo la que se observa un objeto; por otra parte, la sensibilidad espectral del órgano visual del observador no se puede alterar. Así pues, sólo queda poder modificar la curva espectral de transmitancia o reflectancia del objeto, lo que sí es posible mediante la utilización de pigmentos. Los pigmentos son por tanto, la clave que permite modificar la apariencia de color de

*Fuente
luminosa,
objeto y
observador*

un objeto material y, en consecuencia, lograr una reproducción del color.

*Determinación
de la fuente
luminosa*

Teniendo en cuenta que la curva espectral de transmitancia o reflectancia del color de un objeto depende en parte de la naturaleza espectral de la fuente luminosa (Grandis, 1985:53), ésta deberá ser establecida como etapa previa al proceso de reproducción del color. En todo caso, para la reproducción del color en el SIRECRAMT, la fuente luminosa debe considerarse un emisor de espectro equienergético⁸¹, la representación simplificada de este espectro, puede ser considerada como una mezcla de tres componentes: luz roja, verde y azul (Burden, 1978:285; Yule, 1967:14), relacionadas con las sensibilidades de los tres conos fotorreceptores; este proceso permitirá hablar de forma esquemática de luz reflejada o transmitida, en lugar de curva espectral de transmitancia o reflectancia.

*Luz blanca =
luz azul +
verde +
roja*

*Combinaciones
de luz azul,
verde y roja.*

Según las consideraciones establecidas de acuerdo a la teoría tricromática de visión del color, la sensación cromática se basa en un sistema de tres estímulos. Esto supone que, técnicamente, sea posible reproducir cualquier color visible por una mezcla adecuada de luces, roja, verde y azul, como ya lo hiciera experimentalmente Maxwell en 1860 (Hunt, 1957:24, 80). Es en este principio elemental en el que se basa el SIRECRAMT, al igual que la mayoría de los procedimientos prácticos de reproducción del color.

*Etapas
reproducción
del color*

Con carácter general, la reproducción de un color por medio del sistema de reintegración que se desarrolla puede considerarse un proceso dividido en dos etapas:

- a) *Etapa de separación del color.* De acuerdo al principio tricromático de reproducción del color, se realizan tres

⁸¹ Se considera un emisor de espectro equienergético al formado por el espectro continuo de todas las radiaciones monocromáticas, todas ellas del mismo valor energético; equivalente a una luz blanca.

registros que modulen los estímulos luminosos primarios: azul, verde y rojo, correspondientes a las tres sensibilidades espectrales del órgano visual.

- b) *Etapa de síntesis.* Se realiza una combinación de los tres registros definidos en la etapa anterior, a fin de poder generar la sensación del color objeto de la reproducción.

II.2.1.- Principios básicos de la reproducción del color

Los principios básicos de los sistemas de reproducción del color, incluido el SIRECRAMT, son establecidos en función de la percepción del color por el órgano visual (James, 1977:561; Kowaliski, 1978:129). Como ya se ha mencionado, el órgano visual presenta tres sensibilidades espectrales conocidas, que corresponden a las bandas de longitudes de ondas cortas, medias, y largas del espectro, y que producen, respectivamente, las sensaciones de color azul, verde y rojo. De acuerdo al grado de absorción de luz experimentada por cada uno de los tres conos fotorreceptores, un estímulo luminoso, se puede especificar en función de tres valores (Kaiser y Boynton, 1996:145); a su vez, sus diferentes combinaciones son suficientes para obtener todos los colores visibles. En la práctica, la mayoría de los procesos de reproducción del color utilizan esta ventaja de su simplificación.

*Reproducción
del color en
función de su
percepción
tricromática*

Según lo anterior, la reproducción del color trata de generar y modular estímulos luminosos relacionados con las tres sensibilidades espectrales que presenta el órgano visual, azul, verde y rojo (Kowaliski, 1978:129; Yule, 1967:29). Con esta finalidad, en el SIRECRAMT, al igual que en la fotografía en color y sistemas de impresión, se emplean tres capas, filtros o registros de color, cuyas curvas espectrales de absorbancia o transmitancia permiten la obtención de los tres estímulos luminosos acordes a las tres sensibilidades espectrales del órgano visual (Burden, 1978:290).

Asimismo, cada una de las capas, filtros o registros de color, permiten controlar de forma individual y selectiva cada una de las tres sensibilidades espectrales que presenta el órgano visual. En el transcurso de la explicación se deducirán los colores concretos de cada uno de dichos registros.

*Número
reducido de
colores*

El SIRECRAMT, al igual que todos los demás procedimientos prácticos para la reproducción del color, fotografía en color, televisión o sistemas de impresión, parte del principio tricromático de la visión, que consiste en obtener un número suficientemente elevado de colores, a partir de la combinación un número reducido de ellos, en concreto tres (Arnheim, 1994:373; James, 1977:561). La cuestión es equilibrar economía y calidad de igual modo que el mecanismo natural del sistema visual.

*Leyes de
mezcla
cromática*

La combinación de este reducido número de colores se realiza teniendo en cuenta una serie de leyes de síntesis o mezcla cromática, las cuales constituyen una propuesta técnica dirigida a simular o interpretar la forma de trabajo del órgano de la vista (Küppers, 1992:151). Estas leyes son unas ideas sistemáticas que tienen por objeto que el órgano visual produzca las sensaciones de color deseadas. El propósito de la mezcla cromática experimental es especificar los estímulos arbitrarios de una muestra de color en términos de una mezcla de tres componentes, generalmente llamados primarios. Esto hace posible la materialización de la reproducción del color en el SIRECRAMT.

Las leyes de mezcla cromáticas establecen tanto las bases cualitativas para la mezcla tradicional del color, desarrolladas en base a la experiencia, como las bases cuantitativas para las técnicas de cálculo (Billmeyer y Saltzman, 1981:134); estas leyes permiten obtener un amplio espacio de colores. Una explicación de las mismas facilitará la comprensión posterior de los aspectos con los que se relacionan.

Sin embargo, antes de proceder a esta explicación es conveniente aclarar dos conceptos: luces de color u cuerpos de color. Las radiaciones que inciden en el ojo de forma directa, o bien indirectamente como resultado de un proceso de reflexión sobre una pantalla o superficie blanca, reciben el nombre de *luces de color* o, en el caso de no ser cromáticas, *luz*. Sin embargo, como se ha definido anteriormente⁸², cuando los colores percibidos son el resultado de la absorción de energía de radiación visible por una materia, se denominan técnicamente *cuerpos de color*; se diferencian de las primeras, en que pueden presentar diversos aspectos, como por ejemplo el ser transparentes u opacos⁸³.

Conceptos

Luces de color

Cuerpos de color

II.2.1.1.- Leyes de mezcla cromática

Según Küppers (1992:177) existen por los menos once leyes de mezcla cromática, aunque sólo tres de ellas tienen una relación directa con el SIRECRAMT; estas leyes cromáticas son: la mezcla aditiva, la mezcla sustractiva y la mezcla óptica, y se explican en los apartados siguientes.

Diferentes leyes

II.2.1.1.1.- Mezcla aditiva

La mezcla aditiva es propia de los procesos de emisión y transmisión de luces de color (Sanz, 1996:164); es el resultado de la actuación conjunta de estímulos luminosos sobre la retina, es decir, se trata de una suma de radiaciones de diversas longitudes de onda⁸⁴ (Küppers, 1992:145). El proceso aditivo se puede realizar de diferentes formas (Gerritsen, 1976:116-118; Hunt, 1957:29); una alternativa consiste en proyectar sobre una pantalla algunas longitudes de onda de

Propia de las luces de color

Distintas formas de mezcla aditiva

⁸² Véase cap. II, ap. II.1.2. *Características y especificación del color*, pág. 104.

⁸³ Véase cap. II, ap. II.1.1.2.5. *Absorción*, págs. 86, 87.

⁸⁴ La lineal aditividad de las luces de color se rige por las leyes de Grassmann.

forma que se superpongan parcialmente. Las zonas donde los haces luminosos se superponen son percibidas por el sistema visual como un color distinto y de más luminosidad que los proyectados individualmente. De igual forma, se produce un proceso de mezcla aditiva en el órgano visual, cuando inciden simultáneamente sobre la retina un conjunto de longitudes de onda del espectro visible; la sensación de color producida se acercará tanto más al blanco cuanto mayor sea el número de radiaciones recibidas.

*Sistema visual:
mezcla aditiva*

Por tanto, los colores percibidos por el sentido de la vista son el resultado de un proceso aditivo, ya que las tres clases de fotorreceptores cromáticos, colocados unos junto a otros en la zona central de la retina, unen los estímulos que reciben. Así, las longitudes de onda que estimulen las tres clases de fotorreceptores en la debida proporción, causarán la sensación acromática de blanco.

*Activación
selectiva de los
conos*

La mezcla aditiva, considerada como un intento técnico para simular el modo de funcionamiento del sistema visual, parte de tres luces de color que, espectralmente, están dispuestas de forma que cada una de ellas active un potencial máximo de sensación en un campo de recepción de conos, y un potencial mínimo en los otros dos; cuestión ciertamente compleja debido al solapamiento de las curvas de sensibilidad de los tres tipos de conos (Véase Fig. II.14), principalmente en la zona espectral de sensibilidad de longitudes de onda media.

*Luces de color
primarias*

Según Wright (1969:104) las tres luces primarias espectrales requeridas⁸⁵ para igualar el resto de los colores espectrales, corresponden a tres longitudes de onda determinadas^{86,87}: λ_A 460, λ_V 530

⁸⁵ La elección de las tres luces primarias la realizó principalmente en base a los datos aportados por personas dicromáticas, a quienes les falta uno u otro tipo de conos.

⁸⁶ Otros autores como Yule (1967:29) en su obra: *Principles of color reproduction*, define estos valores como una banda amplia de longitudes de onda centradas en λ_A 440, λ_V 540 y λ_R 620 nm para las luces azul, verde y roja respectivamente.

⁸⁷ Para la mezcla aditiva en televisión, se toman como valores de longitudes de onda λ_A 470, λ_V 535 y λ_R 610 nm (Burbano, Burbano y Gracia, 1993:758).

y λ_R 650 nm, que convencionalmente se denominan: azul, verde y roja. Según los autores, estos tres estímulos o luces de color son denominados de distintas maneras: primarios aditivos (Agoston, 1987:44; Burden, 1978:35-36; Robinson *et al.*, 1987:166), primarios generativos (Arnheim, 1994:373), colores elementales aditivos (Küppers, 1992:147) y también colores un tercio, debido a que cada uno de ellos corresponde a una tercera parte del espectro (Moreno, 1996:98). Independientemente del término que se utilice hay que tener siempre presente que se trata de luces de color. Por esta razón y con objeto de no cometer interpretaciones erróneas, la referencia que se haga a las tres longitudes de onda: azul, verde y roja, será como luces de color primarias o colores-luz primarios (Astrua, 1982:116-117; Fabris y Germani, 1987:17-23; Martín, 1975:104).

*Distinta
nomenclatura*

Un requerimiento básico de las tres luces primarias consiste en que la combinación de dos de ellas no debe producir la tercera (Burbano, Burbano y Gracia, 1993:758). Por particular utilidad práctica, se añade que las tres luces de color primarias deben permitir obtener, por medio de su mezcla aditiva, una amplia gama de colores, mayor que con la elección de otras luces. La mezcla aditiva constituye el fundamento de la televisión en color.

*Exigencias
técnicas*

Volviendo al ejemplo del proyector y considerando que éste emitiese sobre un fondo negro, con cada una de las tres luces de color primarias: azul, verde y roja, tal y como se muestra en la figura II.23, la suma parcial de las áreas donde se superponen las tres luces correspondería a la luz blanca. En las zonas en las que se superponen de forma binaria las luces de color primarias se conseguirá la aproximación a la luz blanca, pero sin alcanzarla, y los colores obtenidos presentarán mayor luminosidad que los primarios de partida. La luz azul y la verde producen la luz cian (C), la verde y la roja generan la luz amarilla (Am), y la roja y la azul dan la luz magenta (M).

*Mezcla aditiva
de las luces de
color primarias*

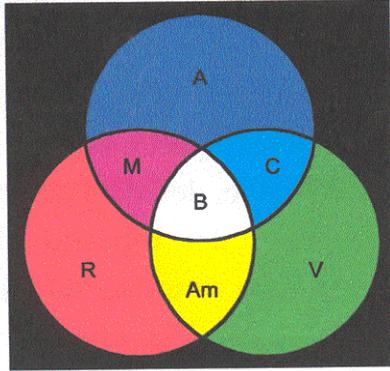


Fig. II.23. La superposición binaria de la proyección en pantalla de los haces luminosos azul, verde y rojo, produce las luces de color amarillo, magenta y cian.

Tanto la luz cian como la luz amarilla son visibles en el espectro electromagnético, sin embargo, la luz magenta, nombre adoptado internacionalmente para indicar un color púrpura, no se encuentra en el espectro de la luz blanca ya que resulta de la mezcla o superposición de las luces de los extremos del espectro: azul y roja (Fabris y Germani, 1987:21; Küppers, 1992:106-107).

Magenta

Una observación detallada de la figura II.23, muestra cómo la luz blanca, puede reconstruirse, además de por superposición de las tres luces de color primarias, superponiendo una luz de color primaria, por ejemplo, la luz verde, sobre una luz binaria, tal como la luz magenta, que a su vez resulta de la suma de las otras dos luces de color primarias, roja y azul. Esta luz de color binaria, magenta, se denomina luz de color complementaria de la luz de color primaria verde. Es decir, dos luces son complementarias cuando mezcladas en una cierta proporción, igualan la luz acromática blanca (Fabris y Germani, 1987:117; Gerritsen, 1976:106; Küppers, 1992:127). Por tanto, la luz amarilla es complementaria de la luz azul, la luz cian es complementaria de la luz roja, la luz magenta es complementaria de la luz verde y, en cualquiera de los casos, de manera inversa. Como muestra la figura II.24, dichas luces de color complementarias ocupan, una posición diametralmente opuesta en el diagrama cromático CIE.

Luces complementarias

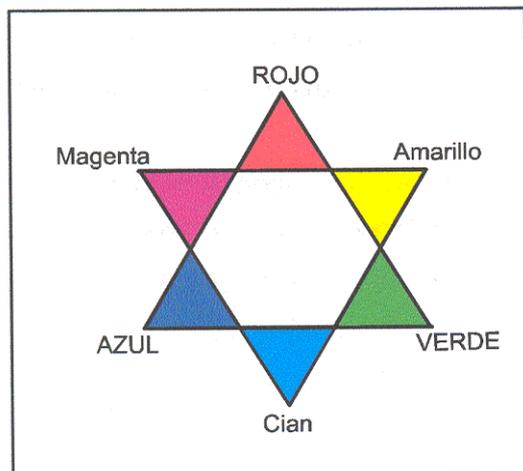


Fig. II.24. Luces complementarias representadas de forma diametralmente opuesta en el diagrama cromático.

II.2.1.1.2.- Mezcla sustractiva

La mezcla sustractiva es propia de los procesos de absorción y transmisión de los cuerpos de color (Sanz, 1996:164). Anteriormente y respecto al fenómeno de absorción⁸⁸, se indicó que diversas sustancias químicas, conocidas como pigmentos, constituyen o recubren los cuerpos de color. Estas sustancias tienen el poder de absorber determinados intervalos de longitud de onda del espectro emitido por una fuente de luz cuando incide sobre las mismas. El poder selectivo del campo de absorción de los cuerpos de color es, potencialmente, mayor en la medida que la fuente luminosa emita un espectro equienergético, o luz blanca.

Propia de los cuerpos de color

Absorción selectiva de los pigmentos

Cada pigmento tiene un poder selectivo característico, responsable de que absorba una o varias radiaciones luminosas. Así

⁸⁸ Véase cap. II, ap. II.1.1.2.5. *Absorción*, págs. 86, 87.

pues, mezclando dos pigmentos con distinto poder selectivo de absorción se obtiene una sustracción mayor de radiaciones y, en ciertas combinaciones, se puede llegar hasta la absorción total correspondiente a la ausencia de radiaciones, es decir, al color acromático negro.

*Mezcla aditiva
complementaria
de la mezcla
sustractiva*

La mezcla sustractiva se puede considerar complementaria de la mezcla aditiva (Küppers, 1992:148-149). Así, en la mezcla sustractiva, a partir de una luz blanca se puede llegar al color negro por sustracción de longitudes de onda de radiación, mientras que en la mezcla aditiva partiendo del color negro se llega a la luz blanca por adición de longitudes de onda de radiación. La formación del color en la mezcla sustractiva parte del color acromático blanco.

Tanto los cuerpos de color opacos como los transparentes son sustancias con poder selectivo, esto es, capaces de absorber ciertas longitudes de onda; si bien, en el primer caso reflejan las restantes, y en el segundo caso -cuerpos transparentes- las transmiten. Ambas radiaciones -reflejadas y transmitidas- son las percibidas por el órgano visual (Astrua, 1982:118; Fabris y Germani, 1987:27; Grandis, 1985:53-54).

*Mezcla
sustractiva:
cuerpos de
color
transparentes*

Es de gran importancia subrayar que, en el desarrollo de esta explicación, se identificará la mezcla sustractiva sólo en relación a la mezcla de varios cuerpos de color transparentes, ya que la mezcla de cuerpos de color opacos se rigen por otras leyes, como son la de mezcla cromática e integrada (Küppers, 1992:153, 157); en este sentido, la referencia que se haga de los cuerpos de color opacos, será para mostrar que la absorción selectiva de las longitudes de onda se produce de la misma forma para dos colores iguales, independientemente de que sean opacos o transparentes, pero nunca se debe entender que la mezcla de los colores opacos tiene relación explícita con la ley sustractiva que se define.

En relación a los cuerpos de color transparentes se utilizará el término de filtros o capas de color ya que, por su propia definición, y más concretamente el primer término, parecen estar más relacionados con su función selectiva de absorción espectral.

*Filtros o capas
de color*

En la mezcla sustractiva, la capacidad de absorción de tres capas o filtros de color previamente seleccionados, con respecto a un espectro equienergético, permite obtener una amplia diversidad del espacio de colores mediante combinaciones binarias o ternarias de los mismos (Küppers, 1992:148).

La elección de estos tres colores no es arbitraria ya que al igual que se hiciera en las luces primarias de la mezcla aditiva, cada uno de los colores base no proviene de la combinación de los otros dos; además, estos colores deben ser neutros entre sí, de forma que ninguno de los tres tenga trazas de los otros dos, aunque sí una intensidad igual (Hickethier, s.a.:11).

*Exigencias
técnicas*

Los tres colores de las capas o filtros corresponden a los colores amarillo, magenta y cian. La referencia a los mismos se hace mediante diferentes términos: colores base (Astrua, 1982:119; Fabris y Germani, 1987:33; Martín, 1975:109), colores elementales por sustracción (Küppers, 1992:148) o colores primarios sustractivos (Palazzi, 1995:18); siendo este último, el término utilizado por la mayoría de los autores.

*Colores
primarios
sustractivos*

Cada uno de estos tres colores: amarillo, magenta y cian, tienen por objeto absorber el campo de radiaciones al que es sensible cada tipo de conos fotorreceptores presentes en la retina (Küppers, 1992:148-149).

Para determinar el poder selectivo de absorción de los cuerpos de color opacos o transparentes, se parte de una fuente luminosa de espectro equienergético, cuya representación esquemática se

corresponde con tres zonas espectrales: azul, verde y roja, relacionadas con los tres campos de sensibilidad espectral de los conos fotorreceptores.

Activación selectiva de los conos fotorreceptores

Cada uno de los tres colores base sustractivos absorbe una parte de las longitudes de onda del espectro equienergético que incide sobre los mismos, tal y como se muestra en las figuras II.25 y II.26. El color

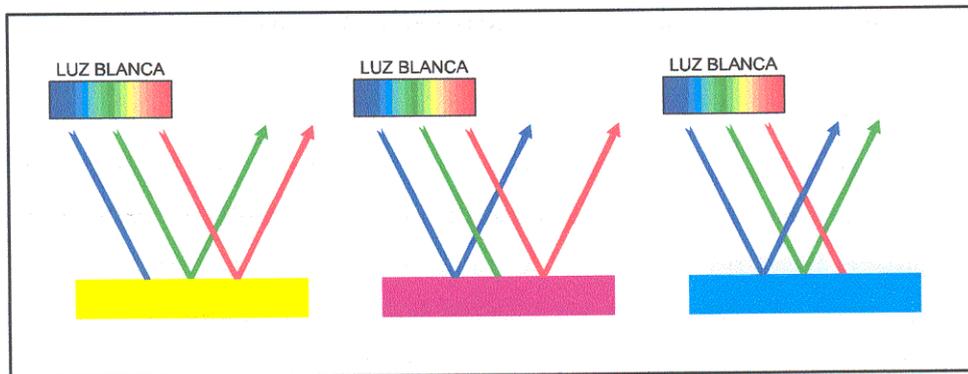


Fig. II.25. Absorción y reflexión de longitudes de onda de la luz blanca en cada uno de los tres colores base sustractivos considerados como cuerpos de color opacos. El color base amarillo absorbe la radiación azul y refleja la radiación roja y verde; el color base magenta absorbe la radiación verde y refleja la radiación azul y roja, y el color base cian absorbe la radiación roja y refleja la radiación verde y azul.

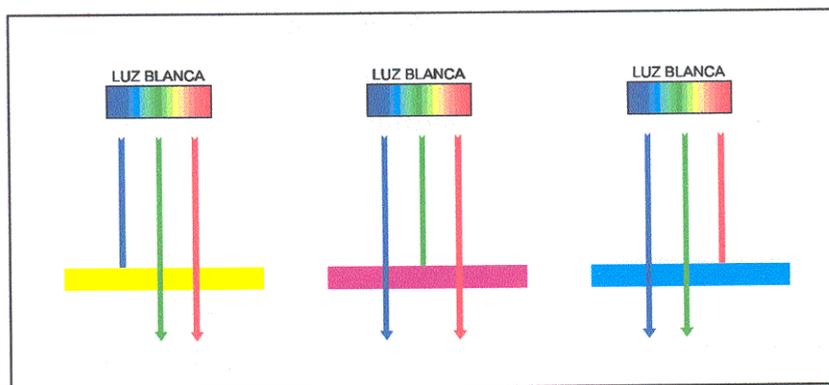


Fig. II.26. Absorción y transmisión de longitudes de onda de la luz blanca en cada uno de los tres colores base sustractivos considerados como cuerpos de color transparentes (filtros). El color base amarillo absorbe la radiación azul y transmite la radiación roja y verde; el color base magenta absorbe la radiación verde y transmite la radiación azul y roja, y el color base cian absorbe la radiación roja y transmite la radiación verde y azul.

base amarillo absorbe la radiación de longitudes de onda cortas, de tal forma que el campo de recepción correspondiente a los conos sensibles al azul -longitudes de onda cortas- no reciba estímulo de color y, por consiguiente, tampoco active ningún potencial de sensación; el color magenta absorbe las longitudes de onda medias, de manera que el campo de recepción correspondiente a los conos sensibles al verde -longitudes de onda medias- no reciba el correspondiente estímulo de color; por último, el color cian absorbe las longitudes de onda largas, de forma que el campo de recepción correspondiente a los conos sensibles al rojo -longitudes de onda largas- no reciba, tampoco, estímulo de color. De acuerdo a esto, como define Wright (1969:200), puede resultar más fácilmente comprensible referirse a los colores amarillo, magenta y cian, en relación a los tres estímulos de mezcla tricromática aditiva, como menos azul, menos verde y menos rojo.

A efectos prácticos se puede considerar que cada uno de los colores base: amarillo, magenta y cian, transmiten o reflejan dos tercios de las longitudes de onda del espectro (azul, verde y roja) y absorben el resto, es decir, un tercio (Tabla II.1). El color amarillo transmite o refleja las longitudes de onda medias y largas -zona espectral verde y roja-, y absorbe las longitudes de onda cortas -zona espectral azul-; el color cian transmite o refleja las longitudes de onda cortas y medias -zona espectral azul y verde- y absorbe las longitudes de onda largas -zona espectral roja-; el color magenta transmite o refleja las longitudes de onda cortas y largas -zona espectral azul y roja- y absorbe las longitudes de onda medias -zona espectral verde-.

Tabla II.1. *Absorción selectiva de los tres colores base*

	<i>LUZ ABSORBIDA</i>	<i>LUZ TRANSMITIDA O REFLEJADA</i>
Cian = Luz verde + Luz azul	ROJA	VERDE + AZUL
Magenta = Luz roja + Luz azul	VERDE	ROJA + AZUL
Amarillo = Luz roja + Luz verde	AZUL	ROJA + VERDE

Suma aditiva de las radiaciones transmitidas o reflejadas

A su vez, ante el conjunto de radiaciones transmitidas -cuerpos de color transparentes- o reflejadas -cuerpos de color opacos- por cada uno de los colores base, el órgano visual aprecia una sensación de color única, correspondiente a la suma aditiva de las mismas. Así, la suma aditiva de las longitudes de onda cortas y medias -zona espectral azul y verde- genera una sensación de color cian, como ya se indicó en el apartado correspondiente a la mezcla aditiva⁸⁹.

En sí misma, la mezcla sustractiva corresponde a las combinaciones binarias o ternarias (Figs. II.27 y II.28) de los filtros de colores base sustractivos, amarillo, magenta y cian, los cuales permiten obtener diferentes colores de acuerdo a las proporciones de las longitudes de onda transmitidas o reflejadas simultáneamente.

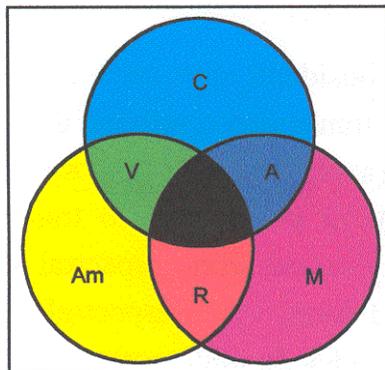


Fig. II.27. La mezcla binaria de los tres colores base sustractivos amarillo, magenta y cian, produce los colores azul, verde y rojo, y la mezcla ternaria, el color acromático negro, correspondiente a la absorción total de la luz incidente.

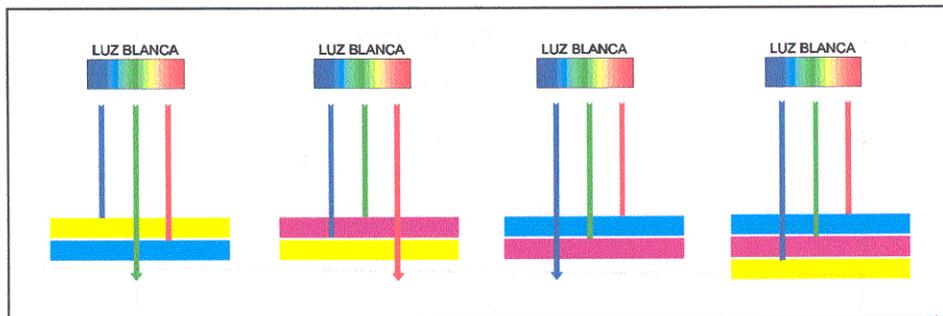


Fig. II.28. Absorción y transmisión de longitudes de onda de la luz blanca correspondientes a las combinaciones de los tres colores base sustractivos, considerados como cuerpos de color transparentes (filtros).

⁸⁹ Véase cap. II, ap. II.2.1.1.1. *Mezcla aditiva*, pág. 123.

Desde un punto de vista teórico, el valor acromático de un matiz de color está compuesto por cantidades parciales de los colores acromáticos blanco y negro. En la mezcla sustractiva, las cantidades parciales del negro no se forman con un pigmento o colorante negro, sino a partir de las correspondientes cantidades proporcionales de los tres colores base sustractivos: amarillo, magenta y cian.

*Valor
acromático*

La mezcla sustractiva solamente es referida a los filtros de color -cuerpos de color transparentes-, y no a los cuerpos de color opacos ya que, como es obvio, varios cuerpos de color opacos superpuestos no actuarían conjuntamente en su capacidad de absorción al realizar la mezcla sustractiva; como se muestra en la figura II.29, en este caso únicamente sería la última capa de color aplicada la que absorbiese y reflejase selectivamente la luz incidente, no interviniendo el estrato de color subyacente. Es por ello que el desarrollo completo de la mezcla sustractiva cuando participan varios estratos de color, se debe entender en referencia a cuerpos de color transparentes -filtros de color-.

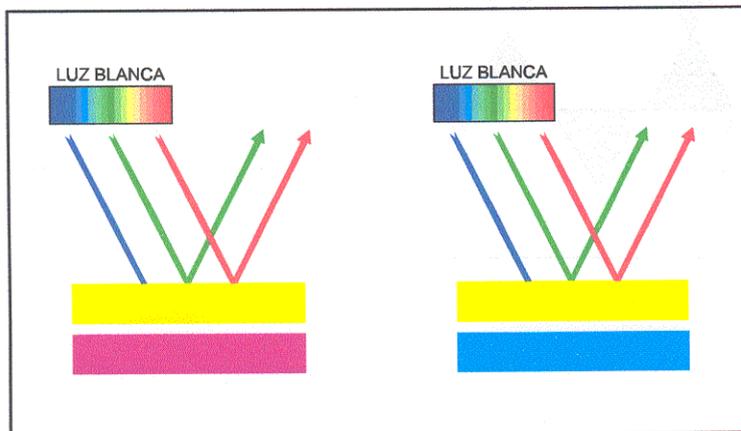


Fig. II.29. En las capas de colores opacos superpuestos, las longitudes de onda absorbidas y reflejadas siempre corresponderán a la última capa de color aplicada; en el caso que muestra la figura, a la capa de color amarillo.

Colores complementarios

La parte correspondiente a las longitudes de onda absorbida por los colores base es siempre complementaria a la parte de las longitudes de onda transmitidas o reflejadas, ya que su suma aditiva da como resultado la luz blanca o espectro equienergético que antes existía (Gerritsen, 1976:106; Moreno, 1996:99). Si bien, también se puede entender que dos colores son complementarios entre sí cuando, al superponerse en mezcla sustractiva, dan lugar al color acromático negro. Así, por ejemplo, el color base magenta tiene como complementario el color verde, ya que superpuestos en mezcla sustractiva, el color magenta absorbería la longitud de onda verde, y el color verde (cian + amarillo) las longitudes de onda roja y azul. Como se muestra en la figura II.30, la representación en el círculo cromático de los colores base y de sus respectivos colores complementarios corresponde a posiciones diametralmente opuestas.

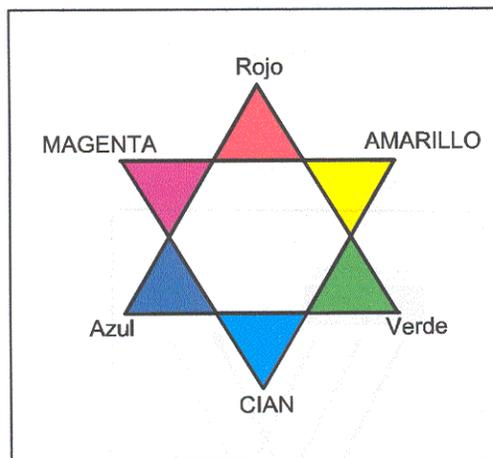


Fig. II.30. Colores base amarillo, magenta y cian, con sus respectivos complementarios, representados diametralmente opuestos en el círculo cromático. La mezcla sustractiva de un color base con su respectivo color complementario da lugar al color acromático negro.

Resultado de la mezcla : menor intensidad

El color resultante de la mezcla sustractiva presenta siempre una intensidad relativa menor que cada uno de los colores que forman parte de ella (Albers, 1985:40; Gerritsen, 1976:71; Sanz, 1996:166); así por ejemplo, el color verde, resultado de la sustracción de un filtro de color amarillo y otro cian, presenta menor intensidad relativa que el color amarillo y que el color cian (Fig. II.27).

En cada uno de los filtros de color, el volumen de absorción corresponde a la cantidad de color existente. Cuanto mayor sea la cantidad de color, más radiación será absorbida y menos transmitida. Según lo expuesto en el apartado sobre la interacción luz-materia⁹⁰, y de acuerdo a la ley de Beer, la cantidad de radiación absorbida resulta igual cuando la luz pasa a través de la misma cantidad de material absorbente; por otro lado, la ley de Lambert establece que a igual grosor de material se produce igual cantidad de absorción. Posteriormente se mostrará cómo algunos fenómenos internos de reflexión de luz así como ciertas impurezas del color (opacidad), limitan el cumplimiento exacto de estas leyes, por lo que son estrictamente ciertas para luz monocromática y para fenómenos de transmisión, y no así en el caso de procesos de reflexión con supuestos colores ideales (Yule, 1967:206).

Capacidad de absorción

Ley de Beer

Ley de Lambert

La expresión matemática que recoge ambas leyes se conoce como ley de Lambert-Beer y se muestra en la siguiente ecuación:

$$A = \log 1/T = a \cdot b \cdot c \quad (\text{II.4})$$

donde A es la absorbancia y T la transmitancia. La absorbancia (A) se define como el producto de la absorción característica del colorante a la longitud de onda específica (a)⁹¹, por el grosor de la muestra (b) y por la concentración del colorante (c).

Absorbancia

En el supuesto de la superposición de tres filtros de color en mezcla sustractiva se aplica una segunda parte de esta ley, por la que se establece que la suma de las absorciones correspondientes a cada filtro de color añadido es igual a la absorbancia total de la muestra.

$$A = A_1 + A_2 + A_3 = a_1 \cdot b_1 \cdot c_1 + a_2 \cdot b_2 \cdot c_2 + a_3 \cdot b_3 \cdot c_3 \quad (\text{II.5})$$

⁹⁰ Véase cap. II, ap. II.1.1.2.5. *Absorción*, págs. 87, 88.

⁹¹ La magnitud a se denomina *absortividad*, y es una constante de proporcionalidad.

Transmitancia

A su vez, la transmitancia (T) a la longitud de onda específica, es obtenida a partir de la absorbancia (A):

$$T = 1 / \text{anti log } A \quad (\text{II.6})$$

Los valores de transmitancia obtenidos dentro del intervalo de longitudes de onda del espectro visible, correspondientes a una mezcla de los filtros de color, permiten determinar los valores triestímulo X, Y y Z, y a partir de éstos medir objetivamente el color⁹².

Lógicamente, la curva de transmitancia espectral de cada uno de los filtros de colores base sustractivos, tiene una influencia importante en el color resultante de su mezcla sustractiva.

*Mezcla
sustractiva
compleja*

Aunque hasta este punto se ha definido la mezcla sustractiva de forma que la porción de radiación sustraída se relaciona exclusivamente con fenómenos de absorción, habitualmente ocurre que los colorantes⁹³ utilizados en la elaboración de los filtros de color absorben y dispersan la luz simultáneamente, especialmente en los cuerpos de color opacos. Esta mezcla sustractiva, en la que se producen fenómenos de absorción y dispersión, es denominada por Billmeyer y Saltzman (1981:139-140) como *mezcla sustractiva compleja*.

*Ecuaciones de
Kubelka y
Münk*

Para un uso práctico, las ecuaciones más utilizadas en la mezcla sustractiva compleja son las establecidas por Kubelka y Münk (Kubelka, 1948:455; Kubelka, 1954:332). Constituyen las bases del cálculo virtual de todos los colores mezclados en sistemas opacos. Los cálculos se realizan a partir de los coeficientes de absorción (k) y de dispersión (s) de cada uno de los pigmentos a unas determinadas longitudes de onda.

⁹² Véase cap. II, ap. II.1.2.3.2. *Sistema CIE*, pág. 113.

⁹³ Se utiliza el término colorante en su sentido más sencillo de sustancia que da color a algo; de forma que este término engloba tanto a tintes como a pigmentos.

La ley de mezcla sustractiva descrita permite la reproducción del color a partir de los tres colores base sustractivos (tricromía) en el SIRECRAMT, así como en la industria de las artes gráficas y en la fotografía en color.

II.2.1.1.3.- Mezcla óptica

Cuando se mira un texto de una página impresa en letras negras a una cierta distancia se percibe una mancha gris, debido a que los detalles de las letras son demasiados pequeños para ser resueltos por el mosaico de células fotorreceptoras de la retina. Igualmente, este efecto tiene lugar cuando puntos yuxtapuestos de tres colores diferentes son vistos en una pantalla de televisión o en una impresión policroma sobre papel. Los artistas también hacen uso de este comportamiento del ojo cuando generan áreas de sombra por medio de rayas más o menos próximas en aguafuerte y dibujos. Asimismo, también ocurre en las pinturas ejecutadas con la técnica del puntillismo cuando son observadas a una distancia tal que los trazos de pintura de diferentes colores no se aprecien individualmente. En todos los ejemplos citados, la mezcla de color percibida no existe materialmente, sino que es fruto de una ilusión óptica, concretamente del resultado de la mezcla óptica de los colores componentes.

Ejemplos de mezcla óptica

Ilusión óptica

En la mezcla óptica, las emisiones de luz de diferentes estímulos de color son combinadas en el proceso visual cuando inciden sobre la misma porción de la retina, pero sin superponerse (Agoston, 1987:43; Albers, 1985:47); esto sucede cuando la capacidad de resolución de la retina no permite resolver los detalles de la imagen individualmente (Agoston, 1987:43; Jamenson y Hurvich, 1975:129; Küppers, 1992:178; Moreno, 1996:108).

Resolución de la retina

Existen diferentes términos para definir la mezcla óptica o visual, como son: mezcla de color por promedio (Agoston, 1987:44), mezcla

Nomenclatura

mixta (Fabris y Germani, 1987:34) o mezcla partitiva (Gerritsen, 1976:71).

*Diferencia
entre mezcla
aditiva y
mezcla óptica*

Ante la posibilidad de que pueda surgir una cierta confusión entre la mezcla aditiva y la mezcla óptica, es necesario aclarar que la combinación de las diferentes longitudes de onda en la mezcla aditiva se produce antes de que llegue al ojo, mientras que en la mezcla óptica esta combinación tiene lugar en el propio órgano visual (Agoston, 1987:43). Por otra parte, como define Agoston (1987:44), la energía de dos radiaciones combinadas en la mezcla cromática aditiva es el resultado de la suma de energía de las dos radiaciones iniciales, siendo la luminosidad generalmente incrementada. En la mezcla óptica o promedio, el resultado de la energía de las radiaciones combinadas en el órgano visual es un valor promedio de las mismas, produciéndose generalmente un tono y luminosidad medio (Gerritsen, 1976:123).

II.2.2.- Aspectos técnicos

Una vez definidas las leyes fundamentales de mezcla cromática que afectan directamente a la reproducción del color en relación al SIRECRAMT, en este apartado se describen los aspectos técnicos que, realmente, hacen posible la reproducción cromática.

Como ya se ha indicado⁹⁴, la reproducción del color en el SIRECRAMT debe considerarse como una duplicación de la sensación cromática del color a reproducir. De la triada de elementos partícipes en la generación de una sensación cromática -fuente luminosa, objeto y observador-, se ha podido observar cómo, en la mayoría de los casos, las posibilidades de actuación sobre alguno de ellos se limitaba al objeto⁹⁵, puesto que su curva espectral de transmitancia o reflectancia

⁹⁴ Véase cap. II, ap. II.2. *Reproducción del color*, pág. 115.

⁹⁵ Véase cap. II, ap. II.2. *Reproducción del color*, pág. 117.

puede ser modificada. En el SIRECRAMT, el objeto es considerado como la conjunción de tres elementos: soporte, pigmentos y puntos de medio tono; la actuación sobre estos elementos permite poder modificar la curva espectral generada y, por lo tanto, estar en condiciones de poder duplicar la curva espectral del color original a reproducir.

*Soporte,
pigmentos y
puntos de
medio tono*

La comprensión de la reproducción del color así planteada se hará evidente a medida que se vaya explicando la función que tiene cada uno de estos elementos: soporte, pigmentos y puntos de medio tono. No obstante, se puede adelantar que, básicamente, la cuestión se resume en las posibilidades de control de los tres colores base mediante la utilización de puntos de diferentes tamaños; de este modo se pueden duplicar con mucha aproximación las luces roja, verde y azul que componen el color original a reproducir.

II.2.2.1.- Función del soporte

Al igual que en las artes gráficas y en la fotografía en color, para la reproducción del color por tricromía en el SIRECRAMT, se parte de los colores base sustractivos, amarillo, magenta y cian, utilizados como capas transparentes o filtros de colores; lógicamente, y en la medida que las posibilidades técnicas lo permitan, estos tres colores base deben ser *transparentes*.

Según se muestra en la figura II.31a, la percepción cromática de un filtro de color se realiza a partir de la radiación transmitida por dicho filtro, siendo necesario que el observador y la fuente luminosa estén situados a ambos lados del filtro de color y en puntos opuestos. Esta misma situación es la que corresponde cuando se observa, por ejemplo, una diapositiva.

*Observación
del color*

Sin embargo, son mucho más habituales las situaciones en las que el observador percibe el color por reflexión de la radiación sobre

una superficie, tal como ocurre al leer un libro o al observar una imagen pictórica. Concretamente, y en relación con esta investigación, si la percepción de una obra pictórica objeto de reintegración se hace por reflexión, el color reproducido por el sistema que se desarrolla, deberá ser percibido igualmente por reflexión.

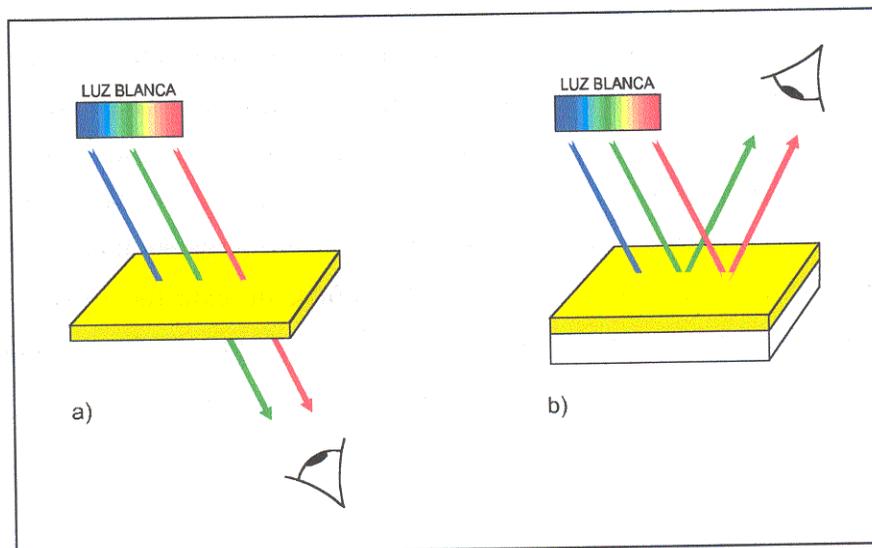


Fig. II.31. Esquema de observación de un filtro de color base amarillo: a) la radiación luminosa es transmitida selectivamente y observada a través del filtro; b) en la parte inferior del filtro se ha colocado un soporte blanco, el cual remite al mismo plano de incidencia la radiación transmitida por el filtro.

Por lo tanto, si en la reproducción del color se parte de filtros o capas de los colores base sustractivos transparentes, es necesario modificar la radiación transmitida por los mismos, de forma que sea reflejada y pueda ser observada en las mismas condiciones que el color original a reproducir (Fig. III.31b). Para ello es necesario situar al observador y a la fuente luminosa en el mismo plano, concretamente, a un lado de la superficie del filtro de color; asimismo, el desarrollo del fenómeno de reflexión se consigue mediante la utilización de una base o soporte opaco de color blanco, que remita difusamente y hacia la superficie, la radiación transmitida por el filtro de color (Yule, 1967:151). Siguiendo con el ejemplo fotográfico, en una fotografía en color esta superficie correspondería al soporte de papel (blanco) y en el SIRECRAMT a las áreas estucadas de color blanco.

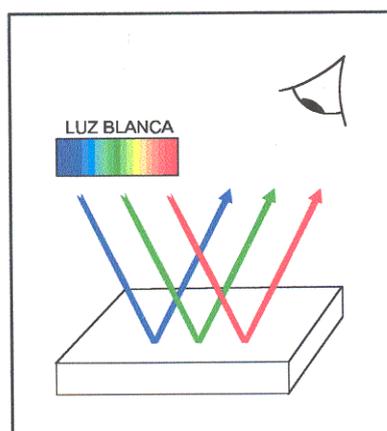
*Soporte blanco
reflector*

Por tanto, para la reproducción del color por mezcla sustractiva en el SIRECRAMT, al igual que en la fotografía y en la reproducción impresa, es necesario partir de una base o soporte de color acromático blanco, con el fin de poder observar el color reproducido por reflexión.

En relación a lo expuesto sobre la función del soporte, se puede considerar que, además de su función implícita como soporte material de los estratos de color, actúa como un reflector de la radiación que incide sobre su superficie (Kodak, 1980:2). Concretamente, todas las longitudes de onda emitidas por una fuente luminosa (espectro equienergético), que incidan sobre ésta, deben ser reflejadas de forma difusa y uniforme en su totalidad, sin que ninguna de ellas sea absorbida selectivamente. De esta forma, el observador percibirá una sensación única de color blanco, correspondiente a la suma aditiva de las longitudes de onda reflejadas (Fig. II.32).

Función

Fig. II.32. Soporte blanco como reflector de todas las longitudes de onda emitidas por una fuente luminosa.



Como se indicó al tratar el tema de superficies opacas de color (Véase Fig. II.29), si el soporte reflector fuese coloreado limitaría la luz reflejada a un campo espectral restringido, es decir, determinadas longitudes de onda serían absorbidas. Por esta razón, la composición espectral de la luz remitida por la superficie del soporte de partida es decisiva en la calidad de la reproducción del color (Küppers, 1994:147).

Limitaciones

El supuesto ideal del soporte blanco definido correspondería a un blanco absoluto, que reflejase el cien por cien de la luz que incide sobre él; no obstante, la realidad muestra que no existen tales soportes o superficies ideales⁹⁶ (Grandis, 1985:54). Así, los soportes pueden presentar distintos tonos de blanco en relación a su poder de reflexión; para su especificación se considera que el color blanco es una combinación de la luminancia y neutralidad del mismo, propiedades que pueden ser evaluadas mediante normas concretas (UNE 40-399-88).

Características
Aspectos negativos

Como características que debe presentar todo soporte se pueden establecer por un lado la de ser blanco con un alto poder de reflexión, opaco, uniforme y que reduzca lo más posible el fenómeno de dispersión, y por otro lado, la de no generar brillo, fluorescencia u otro fenómeno de apariencia que modifique el color.

Fluorescencia

La posible fluorescencia que pudiese presentar un soporte de color blanco, interferirá en la reproducción del color, al ocasionar una pérdida de saturación, principalmente de los colores amarillos claros, asimismo, también interferirá en la medida del color.

Amarilleamiento

Otro aspecto que interfiere en el color es la degradación del propio soporte, que tiene una relación directa con la alteración cromática del color que sustenta. En el proceso de reintegración, el soporte se corresponde con el estuco utilizado para nivelar la superficie de las lagunas con la capa pictórica. La alteración del estuco, como soporte reflector, está relacionada con el amarilleamiento del aglutinante utilizado en su elaboración. Este amarilleamiento es provocado por la absorción que ciertos grupos cromóforos ejercen sobre la radiación azul del espectro (Staniforth, 1985:104-105). Como consecuencia de esta alteración, el soporte pierde su función de reflector

⁹⁶ Un *cuerpo blanco perfecto* corresponde a aquel que al recibir radiaciones visibles, las refleja en todas las direcciones, sin absorber energía radiante; su factor de reflexión es la unidad para todas las longitudes de onda del espectro visible. Sin embargo, un *cuerpo blanco real*, será aquel que tiene el mismo factor de reflexión, muy cercano a la unidad, para todas las longitudes de onda visibles (Burbano, Burbano y Gracia, 1993:757-758).

neutral de luz al absorber parte del espectro, interfiriendo en el color final de la reproducción (Yule, 1967:187).

Como resumen de todo lo anterior, señalar los siguientes puntos:

- Para la reproducción del color en el SIRECRAMT se parte de un soporte reflector de color blanco que básicamente refleje las tres luces fundamentales del espectro: azul, verde y roja (se considera una fuente lumínica que presenta un espectro equienergético).
- En la medida en que se puedan controlar selectivamente las longitudes de onda reflejadas por el soporte blanco se está en condiciones de reproducir el color.
- El control selectivo de las longitudes de onda reflejadas se efectúa a través de los pigmentos con los que se elaboran los filtros de color.

II.2.2.2.- Función de los pigmentos

Todos los procedimientos prácticos para la reproducción del color, parten del principio de que se puede producir un elevado número de colores por combinación de un reducido número; en el sistema de reintegración que se desarrolla en esta investigación, son los tres colores base sustractivos: amarillo, magenta y cian.

*Amarillo,
magenta y cian*

Como se indicó en relación a la mezcla sustractiva, tanto en la fotografía en color como en la reproducción por tricromía que nos ocupa, los colores base sustractivos actúan como capas filtrantes de la radiación. Cada una de ellas absorbe un determinado campo espectral de

*Absorción
espectral
selectiva*

la luz blanca, y cuando se superponen, actúan conjuntamente en su capacidad selectiva de absorción.

Por lo tanto, para controlar selectivamente las longitudes de onda reflejadas por el soporte blanco, se utilizan estas capas de colores base, cada una de las cuales absorbe un determinado campo espectral de la luz (azul, verde y roja) que el ojo recibe. Así, la capa filtrante del amarillo absorbe la luz de onda corta, la correspondiente al magenta, la luz de onda media, y la del cian, la luz de onda larga dentro del espectro visible; es decir, el campo de sensibilidad del ojo a la radiación azul es controlado por el color base amarillo, el campo de sensibilidad a la radiación verde es controlado por el color base magenta, y el campo de sensibilidad a la radiación roja por el color base cian. En consecuencia, sobre los tres registros de sensibilidad de nuestro ojo se efectúa un control individual por medio de los tres colores base sustractivos.

*Color: luz
restante*

En el apartado de la mezcla sustractiva⁹⁷, se explicó la forma en que cada una de las capas filtrantes sustrae de la luz existente un campo parcial del espectro y deja pasar el resto. En consecuencia, los matices de color surgen como luz restante; solo la parte restante, que no ha sido absorbida por una de las tres capas filtrantes, es la que puede incidir sobre el ojo del observador y provocar una sensación de color.

*Combinación
de los tres
colores base*

Como se muestra en la figura II.33, la combinación cualitativa de los tres colores base sustractivos da lugar a la percepción de seis colores cromáticos: amarillo, magenta, cian, verde, rojo y azul, y a dos colores acromáticos: blanco y negro. Estos colores corresponden, según lo explicado en la percepción del color, a las ocho posiciones extremas de sensibilidad del órgano de la vista⁹⁸.

⁹⁷ Véase cap. II, ap. II.2.1.1.2. *Mezcla sustractiva*, pág. 128.

⁹⁸ Véase cap. II, ap. II.1.1.3. *Percepción luz-color*, pág. 102.

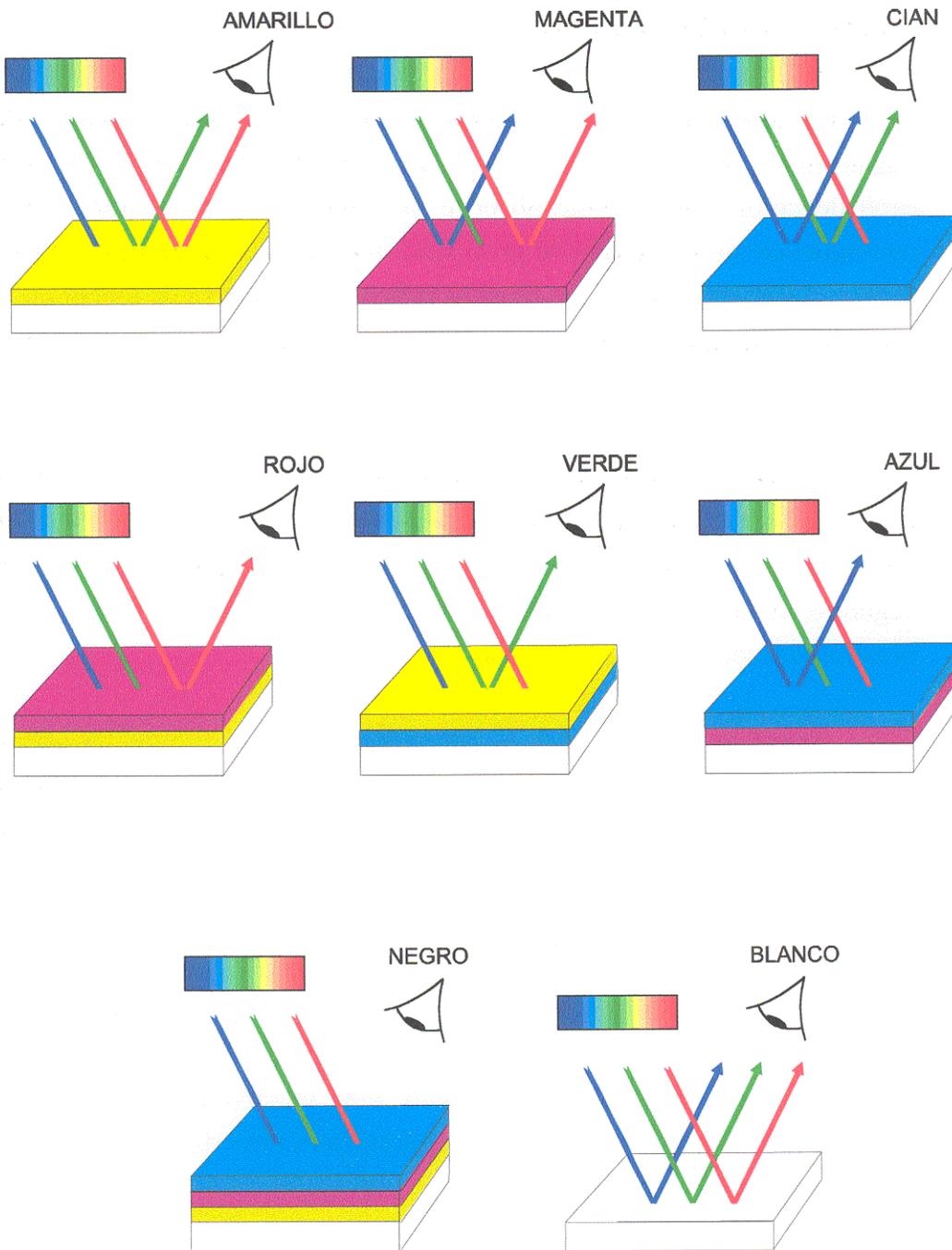


Fig. II.33. Absorción selectiva de la radiación espectral de acuerdo a las diferentes combinaciones posibles de los tres colores base sustractivos. La mezcla aditiva de las radiaciones de luz no absorbidas produce la sensación correspondiente de color en el observador.

Trayectoria de propagación de la luz a través de las capas

En la figura II.33, se puede observar que la propagación de la luz a través de las capas o filtros de color se produce en dos etapas, una de entrada y otra de salida (Yule, 1967:15). Por ejemplo, si se considera la capa de color cian sobre el soporte blanco, la luz azul y verde será transmitida, y la luz roja absorbida; la luz incidente pasa a través de la capa de color cian, el cual absorbe la mayor parte de la luz roja, y continua con su trayectoria de propagación hasta incidir sobre el soporte blanco donde toda la luz que llega es reflejada; ésta pasa de nuevo en su trayectoria de salida a través de la capa de cian, donde de nuevo es absorbida más luz roja.

Valores acromáticos

En la mezcla sustractiva de los tres colores base, los valores extremos acromáticos negro y blanco surgen, el primero, a partir de la coincidencia total en la superposición de las tres capas filtrantes y, el segundo, de la ausencia de las tres capas filtrantes, con lo que se obtiene el color acromático blanco del soporte.

El color negro obtenido no es absoluto

Según lo anterior, para la obtención del color acromático negro, las tres capas de color base deben absorber conjuntamente toda la radiación espectral incidente; por tanto, es necesario que los tres colores base absorban en la misma proporción sus respectivas radiaciones: color base amarillo, radiación azul; color base magenta, radiación verde, y color base cian, radiación roja. Si esta condición no se cumple, no existirá equilibrio entre los tres colores base y el color negro obtenido no será neutro, sino que tendrá una cierta tonalidad correspondiente a la radiación absorbida en menor cantidad. Este inconveniente se da en la práctica debido a la imperfección de los colores base disponibles (Hunt, 1957:39; Küppers, 1994:152).

En base a lo expuesto, se puede decir que en la mezcla sustractiva por tricromía se cuenta realmente con la presencia de cuatro colores, ya que junto a los tres colores base sustractivos -amarillo, magenta y cian-, en forma de capas filtrantes, se encuentra el color acromático blanco

correspondiente al soporte, del cual no se puede prescindir (Küppers, 1994:151).

Conviene indicar que en las definiciones anteriores, se han considerado los filtros o capas de color de cada uno de los colores base en su comportamiento selectivo ideal. Sin embargo, estos colores base ideales: amarillo, magenta y cian, no se pueden obtener en la práctica, ya que con los colorantes actualmente disponibles resulta imposible la elaboración de filtros de color perfectos (Burden, 1978:292; Clerc, 1975:893-894; Fabris y Germani, 1987:46; Kodak, 1980:6; Küppers, 1992:35). Por otra parte, su elección está condicionada a las exigencias técnicas del proceso de reintegración y de reproducción del color por mezcla sustractiva, de tal forma que de nada sirve que exista un color base cuya absorción selectiva sea perfecta, si su comportamiento frente agentes externos (luz, calor, humedad, ácidos, etc.) altera su color inicial de forma rápida y considerable, o bien, el color es selectivamente perfecto pero es opaco.

*Imperfección
de los
pigmentos*

Estas limitaciones son responsables de que los colores base reales disponibles no tengan, en la mayoría de los casos, un color que se pueda denominar *puro*, ya que ninguno de ellos es un absorbente perfecto, y presentan absorciones considerables en partes del espectro donde deberían tener el cien por cien de transmisión (Hunt, 1957:39). Cada color base real se comporta como si estuviese contaminado por los otros dos.

Color base cian .- El color base cian *ideal* absorbe o sustrae la porción roja de la luz blanca (Fig. II.34). En el lugar donde se aplica este color, sólo las porciones azul y verde de la luz blanca llegan al soporte blanco que las refleja. Mezclada en el cerebro esta combinación de azul y verde se aprecia como color cian.

*Absorción:
cian ideal*

Sin embargo, el color cian *real* absorbe no sólo la luz roja, sino también una buena parte de la luz verde y cierta cantidad de la

*Absorción:
cian real*

azul (Fig. II.35); es como si estuviera contaminado por los colores absorbentes de las luces verde y azul (magenta y amarillo).

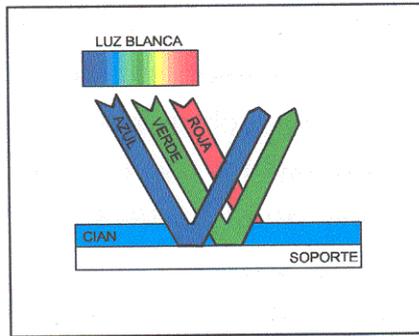


Fig. II.34. Absorción espectral de la luz blanca por parte del color base cian *ideal*.

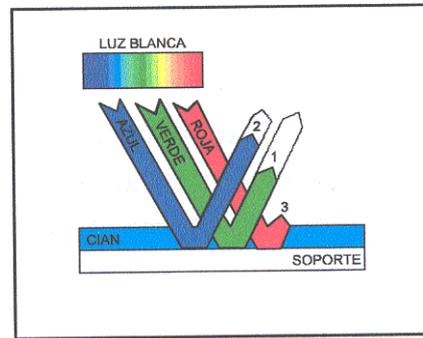


Fig. II.35. Absorción espectral de la luz blanca por parte del color base cian *real*.

Color base amarillo .- El color base amarillo *ideal* absorbe o sustrae la porción azul de la luz blanca (Fig. II.36). Las áreas donde existe color amarillo sólo reciben y reflejan la luz verde y roja. Esta combinación de rojo y verde, mezclada en el cerebro, da la sensación de color amarillo.

*Absorción:
amarillo ideal*

Si bien el color amarillo *real* es casi puro, además de absorber la luz azul también absorbe una parte de luz verde (Fig. II.37), por lo que se comporta como si contuviera una cierta cantidad del color absorbente de la porción verde de la luz (magenta).

*Absorción:
amarillo real*

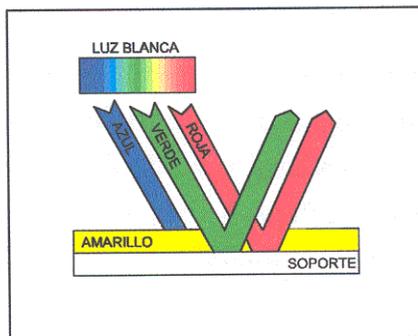


Fig. II.36. Absorción espectral de la luz blanca por parte del color base amarillo *ideal*.

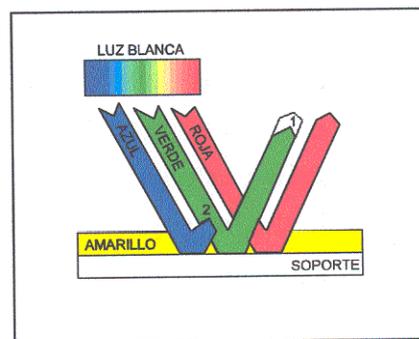


Fig. II.37. Absorción espectral de la luz blanca por parte del color base amarillo *real*.

Color base magenta .- El color base magenta *ideal* absorbe o sustrae la porción verde de la luz blanca (Fig. II.38). Donde existe color magenta, sólo la luz de los colores rojo y azul llega al soporte y es reflejada por él. Esta combinación de luz roja y azul, mezclada en el cerebro, da la sensación de color magenta.

*Absorción:
magenta ideal*

Sin embargo, el color base magenta *real*, al no ser perfecto, absorbe no sólo la luz verde, sino también parte de la azul y un poco de la roja (Fig. II.39). Actúa como si estuviera contaminado por los colores que deben absorber la luz azul y roja (amarillo y cian).

*Absorción:
magenta real*

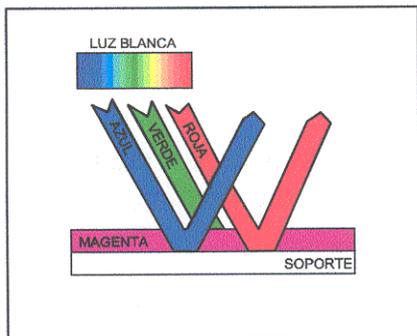


Fig. II.38. Absorción espectral de la luz blanca por parte del color base magenta *ideal*.



Fig. II.39. Absorción espectral de la luz blanca por parte del color base magenta *real*.

Las curvas espectrales de transmisión de los colores base disponibles recogidas en la figura II.40, muestran importantes diferencias con respecto a las curvas espectrales de transmisión de los colores base ideales.

*Curvas
espectrales de
transmisión*

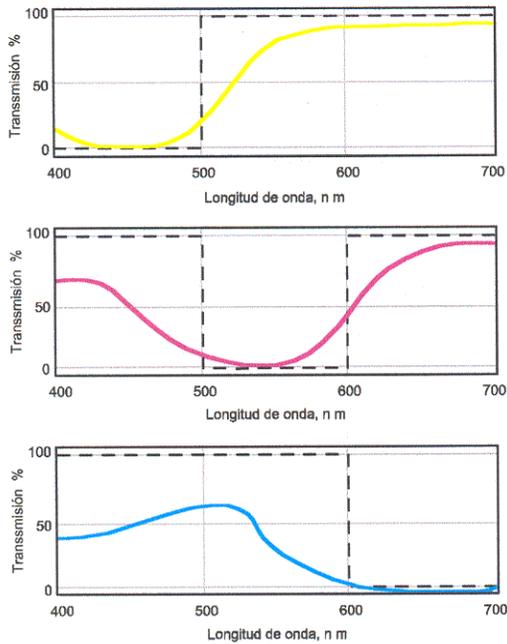


Fig. II.40. Las curvas de transmisión de los colores base sustractivos utilizados en la reproducción del color (trazo continuo de color) se apartan notablemente de los colores ideales (trazo negro discontinuo). El color amarillo absorbe parte en la banda espectral verde y transmite algo de azul cuando debería absorberlo todo. El color magenta absorbe bien en la banda verde, pero también lo hace algo en la azul y en la roja aunque menos. El color cian que debería transmitir totalmente en las bandas azul y verde, absorbe parte de estas radiaciones.

Tintes

El color de la capa o filtro es obtenido por medio de agentes colorantes, como son los tintes y pigmentos. Los tintes son solubles en el medio en el que se aplican y aparecen transparentes por luz transmitida, ya que el efecto de dispersión de la luz provocado por sus partículas es mínimo; a este respecto señalar que el diámetro de partícula de un tinte -aprox. 0,001 micra- es inferior a la longitud de onda de la luz.

Pigmentos

Los pigmentos no son solubles en el medio que los aglutina sino que forman suspensiones. Algunos pigmentos, conocidos también como lacas, son obtenidos a partir de tintes por precipitación de éstos sobre una base o sustrato insoluble (Gettens y Stout, 1966:112; Kühn, 1986:171, 173; Yule, 1967:188).

La distinción física entre pigmento y tinte se realiza en función del tamaño de partícula; en el caso de los pigmentos es superior a 0,1 micra, mientras que las partículas disueltas de un tinte son inferiores a

0,001 micra. Existen compuestos coloreados cuyos tamaños de partícula no corresponden a los pigmentos ni a los tintes, éstos son conocidos como pigmentos coloidalmente dispersos, y en solución se asemejan más a los tintes que a los pigmentos (Kühn, 1986:171).

Pigmentos coloidalmente dispersos

De acuerdo al fenómeno de dispersión⁹⁹, el tamaño de partícula limitará, en mayor o menor grado, la dispersión de la luz incidente y, por tanto, su transmisión. Teniendo en cuenta el tamaño de partícula de los tintes, en un principio, podría considerarse que éstos son los más adecuados para lograr una mejor transmisión de la luz y, por consiguiente, para la reproducción del color por mezcla sustractiva. Sin embargo, ciertas características, como son su baja estabilidad frente a los procesos de degradación y su adecuación al sistema de reintegración que se propone, limitan sus posibilidades. Por esta razón, en la investigación desarrollada en esta Memoria, se utilizan pigmentos y, concretamente, pigmentos sintéticos orgánicos de muy fino tamaño de partícula.

Inconvenientes de los tintes

Por lo tanto, partiendo del hecho de que no existen colores base, pigmentos o tintes, plenamente translúcidos, cualquier color puede considerarse que ocupa un lugar entre dos posiciones extremas: plenamente translúcido o plenamente opaco (Küppers, 1992:151). Esta situación supone una dificultad en la obtención del color por mezcla sustractiva ya que al existir un cierto grado de opacidad¹⁰⁰, la transmisión de radiación no será total. Esta deficiencia práctica limita igualmente las posibilidades teóricas planteadas.

Los pigmentos siempre tienen cierta opacidad

Otro inconveniente que limita la reproducción del color es la falta de aditividad que los colores base presentan en la superposición de

Falta de aditividad

⁹⁹ Véase cap. II, ap. II.1.1.2.4. *Dispersión*, pág. 84.

¹⁰⁰ La opacidad viene expresada por la relación entre la luz incidente y la luz emergente sobre una superficie.

las capas o filtros de color; por esta razón, la densidad¹⁰¹ total de las capas, o filtros superpuestos, es menor que la suma de sus tres colores base componentes por separado (Burden, 1978:292; Kowalisky, 1978:147; Yule, 1967:216).

Causas

Esta falta de aditividad se debe a una serie de causas (Yule, 1967:220), entre las que cabría destacar: la reflexión superficial de la capa o filtro de color, la reflexión interna producida dentro de la propia capa de color y, por último, una cierta opacidad de los pigmentos utilizados en su elaboración (Fig. II.41).

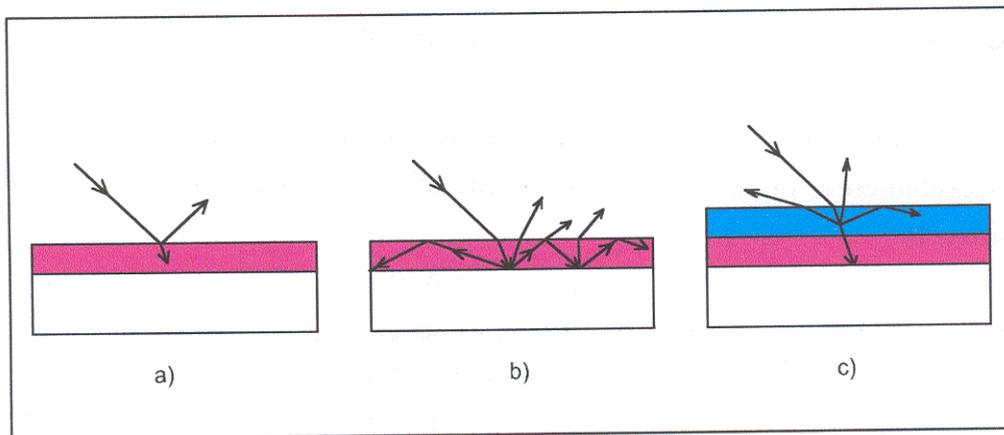


Fig. II.41. La imagen a) muestra una primera reflexión que se produce al incidir la luz sobre la superficie de la capa de color, estimándose que es aproximadamente un 4% de la luz incidente. En b) múltiples reflexiones internas producidas entre la capa de color y el soporte debilitan la luz emergente de la capa de color. En c) se produce una dispersión de la luz en la primera capa de color que debilita la penetración en las capas subyacentes; esto es debido a cierta opacidad de los pigmentos.

Reflexión
superficial

En primer lugar, la *reflexión superficial* de la luz incidente sobre la capa de color, según estima Yule (1967:155), es de aproximadamente un cuatro por ciento. Esto limita la densidad máxima obtenida, ya que

¹⁰¹ La densidad se suele utilizar para indicar la transmisión de las capas o filtros de color (también en blanco y negro). Se deriva de la inversa de la transmisión: densidad = log (luz incidente/luz emergente).

parte de la luz incidente no es transmitida a través de la capa de color (Fig. II.41a).

Por otra parte, al estar aplicada la capa de color sobre un soporte blanco (Fig. II.41b), parte de la luz reflejada por el soporte no emerge directamente al exterior, sino que es nuevamente reflejada por la superficie superior de la capa de color, pasa a través del filtro y es dirigida hacia el soporte donde es otra vez reflejada. Esta *reflexión interna* dentro de la capa de color puede repetirse en múltiples ocasiones, hasta que eventualmente la luz emerja o sea absorbida. A partir de este efecto se deduce que la densidad de una capa de color por transmisión no es proporcional a la densidad por reflexión (Yule, 1967:154).

*Reflexión
interna*

La *opacidad*, como tercera causa de la falta de aditividad entre las capas de color, impide la penetración de la luz hacia el soporte o capa de color subyacente (Fig. II.41c). La opacidad se debe a la dispersión de la luz causada por la heterogeneidad en la morfología de los materiales constituyentes de la capa de color (Yule, 1967:154).

Opacidad

Las limitaciones de los colores base empleados en la reproducción del color, son responsables de que las sensaciones cromáticas producidas, no se correspondan exactamente con las sensaciones extremas de percepción mencionadas del sistema visual: azul, verde, rojo, amarillo, magenta, cian, blanco y negro¹⁰²; en realidad serán más o menos aproximadas, dependiendo de la pureza o del grado de contaminación de los colores base utilizados, así como de los fenómenos de reflexión y opacidad que hubiese.

Con lo desarrollado hasta el momento, en relación a la combinación por mezcla sustractiva de los tres colores base, solamente se puede obtener una gama cromática que corresponde a intervalos

¹⁰² Véase cap. II, ap. II.1.1.3. *Percepción luz-color*, pág. 102.

*Reproducción
de una extensa
gama espectral*

limitados del espectro electromagnético^{103,104}. Por lo tanto, la siguiente cuestión será la de reproducir el espectro de forma continua o, en su defecto, de la manera más amplia posible. El objetivo será intercalar un mayor número de colores entre los intervalos marcados por los colores cromáticos obtenidos.

*Variación
cuantitativa de
la absorción
de los colores
base*

La solución radica en poder variar cuantitativamente cada uno de los tres colores base de partida. De esta forma, las absorciones espectrales de cada uno de ellos, pueden estar comprendidas dentro de un abanico de posibilidades, que oscile en un intervalo marcado por los umbrales de máxima y mínima absorción de sus respectivas longitudes de onda; por ejemplo, el color base amarillo puede absorber en distintos grados la radiación azul, desde una absoluta a una nula absorción; de igual modo se puede variar el grado de absorción del color base magenta en relación a la radiación verde, y el grado de absorción del color cian respecto a la radiación roja.

Teniendo en cuenta que el volumen de absorción en cada una de las capas de color, corresponde a la cantidad de color existente (Küppers, 1992:149), a una mayor cantidad de color, mayor será la radiación absorbida que corresponda a dicho color. Por lo tanto, se trata de variar cuantitativamente el color de cada una de las tres capas cromáticas, lo cual a su vez se corresponde con la variación de su saturación¹⁰⁵. Es decir, trabajando con distintos grados de saturación de los tres colores base, se podrán obtener distintos grados de absorción; a este respecto, recordar que en las explicaciones desarrolladas hasta ahora, los colores base a los que se ha hecho referencia eran todos de

¹⁰³ Como ya se mencionase en la pág. 124 al hablar de la mezcla aditiva, el color magenta no tiene representación en el espectro electromagnético al ser el resultado de la mezcla aditiva de las dos luces situadas en los extremos, luces azul y roja.

¹⁰⁴ Hay que señalar que el color blanco y negro no existen en el espectro electromagnético, ya que el mismo espectro se deriva de la luz blanca por medio de la refracción prismática, y el negro u oscuridad es necesario para descomponer la luz blanca en el espectro policromo.

¹⁰⁵ Véase cap. II, ap. II.1.2.1. *Características subjetivas del color*, pág. 105.

máxima saturación. Este cometido de variar la saturación del color se lleva a cabo mediante los denominados puntos de medio tono.

Puntos de medio tono

II.2.2.3.- Función de los puntos de medio tono

En la práctica un determinado color, por ejemplo un gris, se puede reproducir por dos métodos diferentes; así, se puede utilizar un color gris aplicado directamente sobre el soporte, de forma que cubra totalmente su superficie; otro sistema consiste en disponer sobre dicha superficie una serie de puntos de color negro, diminutos y muy próximos entre sí, cuya percepción óptica genere la sensación correspondiente al color gris (Fig. II.42). Esta segunda alternativa se conoce como puntos de medio tono o semitonos (Bann, 1988:36), y constituye la herramienta fundamental que permite reproducir el color en el SIRECRAMT, puesto que hacen posible la obtención de una amplia gama de grados de saturación de los tres colores base sustractivos.

Variación de la saturación

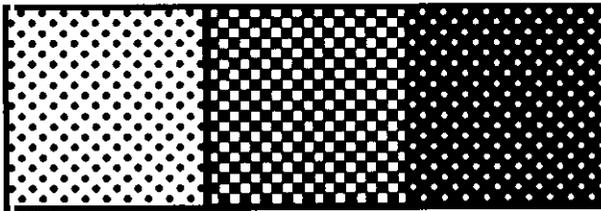


Fig. II.42. Vista ampliada de puntos de medio tono de diversos tamaños. Señalar que para observar en este gráfico distintos tonos de gris a la distancia normal de lectura es necesario entornar los ojos, o bien, proceder a su observación a una distancia de aproximadamente tres metros.

La saturación de un color varía en la medida en que se le añade color acromático blanco, o lo que es lo mismo, en la medida que su

radiación emergente se aproxima al espectro equienergético; lo cual supone una disminución de la saturación del color.

Según el primer método descrito, en relación a la reproducción de un color gris, para disminuir su saturación habría que añadir al color utilizado una cierta cantidad de color blanco; con el segundo método, habría que hacer los puntos de color de un diámetro más pequeño, de forma que una mayor área del soporte blanco quedase sin cubrir. En ambos casos se está incrementando la fracción de radiación blanca emergente o, lo que es lo mismo, disminuyendo la saturación del color que se visualiza.

Diseño de puntos

En la reproducción impresa de imágenes en blanco y negro de tono continuo¹⁰⁶ los tonos intermedios, grises, se reproducen en forma de diseño de puntos. Estos puntos tienen distintos tamaños, si bien en general, son tan pequeños que no se distinguen a simple vista, sino es con la ayuda de una lupa. La vista fusiona los puntos y el cerebro los interpreta como tonos de grises (Albers, 1985:47; Bridgewater y Woods, 1993:8; Kodak, 1978:3; Küppers, 1992:178; Sanders y Bevington, 1986:181).

Escalas de saturación: simuladas y auténticas

Tanto el SIRECRAMT como la reproducción del color en la artes gráficas, se basan en el fundamento de crear escalas de saturación de color *simuladas*. Este aspecto hace que ambas técnicas difieran de la fotografía, la cual trata con escalas de saturación del color llamadas *auténticas*; estas últimas obtienen diferencias de saturación mediante la variación de densidades reales (Küppers, 1994:146).

El concepto de diseño de puntos de medio tono se refiere a cualquier repetición sistemática de signos geométricos que cubren parte del soporte blanco reflector de partida (Robinson *et al.*, 1987:187).

¹⁰⁶ Se denomina tono continuo a la estructura óptica de una imagen en la que las variaciones tonales se producen por diferencias de densidad en solución de continuidad, como las que se observan en una fotografía.

Señalar que en el desarrollo de la explicación, estos signos son considerados principalmente como áreas geométricas circulares, equivalentes a un trazado de puntos, si bien otras formas geométricas pueden resultar igualmente válidas:

Ante una situación óptica compleja, como es la percepción de un diseño de puntos, el sistema visual busca la forma de organización más simple y estable dentro de un conjunto compacto y cerrado. Así, las diferencias ópticas generadas por las áreas de puntos de color y las áreas del blanco del soporte sobre el que están dispuestas, tienden a ser agrupadas en un valor medio. Para ello, en la percepción del diseño, los puntos no son considerados como entidades individuales y separadas, sino como partes interrelacionadas de forma que son agrupados psicológicamente dentro de un conjunto¹⁰⁷ (Arnheim, 1994:70; Fraise y Piaget, 1979:230-231; Granovskaya, Bereznaya y Grigorieva, 1987:44; Kepes, 1976:79; Luna, 1992:370; Schuster y Beisl, 1982:47). En el desarrollo de esta cuestión contribuyen aspectos fisiológicos además de psicológicos. Los receptores estimulados por la imagen óptica no realizan su tarea de forma independiente, sino que entre ellos se establecen conexiones neurales (Arnheim, 1994:57-58).

Percepción de un diseño de puntos

Agrupamiento

Los puntos que forman parte del diseño pierden su individualidad dentro del conjunto, siempre y cuando no tengan propiedades que, a su vez, destruyan la unidad del mismo (Fraise y Piaget, 1979:238).

La pérdida de individualidad de los puntos que forman parte del diseño, genera un agrupamiento perceptivo de los mismos; este comportamiento se debe a que presentan ciertas características ópticas comunes, como son: proximidad, continuidad, semejanza de tamaño, forma y dirección (Frisby, 1987:131-134; Granovskaya, Bereznaya y Grigorieva, 1987:44; Kepes, 1976:69; Luna, 1992:370-371; Sanz,

Características de agrupamiento

¹⁰⁷ Para el cumplimiento de este objetivo, es necesario mantener un criterio opuesto a la máxima clásica citada por Lindsay y Norman (1986:37) de "[...] componer una forma gráfica atractiva consiste en proporcionar un punto focal de interés, incluyendo algún tipo de ruptura en una configuración repetitiva".

1996:176). Estas características fueron objeto de estudio por los psicólogos de la Gestalt.

Proximidad

La *proximidad*, favorece el agrupamiento, puesto que cuanto menor es la distancia entre los puntos, menor será la resistencia a su interconexión visual; este efecto es responsable de que los puntos tiendan a ser agrupados dentro del diseño como una totalidad coherente. La proximidad es la condición más simple de organización (Kepes, 1976:70-72).

Continuidad

La *continuidad de los puntos* en una dirección tiende a crear grupos de orden más sencillos así; por ejemplo, una sucesión de puntos en una dirección determinada tienden a ser agrupados y percibidos como una línea recta. La continuidad se produce, igualmente, en la gradación o progresión de las escalas de saturación de los colores, como se verá posteriormente¹⁰⁸ (Kepes, 1976:77).

Semejanza

La *semejanza o igualdad* es otra de las características de organización que favorece el agrupamiento visual, actuando como fuerza de atracción entre los puntos segregados (Arnheim, 1994:96). Esta condición de semejanza está relacionada con la forma, tamaño, dirección o color de los puntos. El agrupamiento de los puntos por semejanza es más estable que el producido por su proximidad (Kepes, 1976:73).

Características de los diseños de puntos

Por otra parte, el análisis pormenorizado de la estructura de los puntos de medio tono que constituyen un diseño, permite establecer una serie de características que, a su vez, son utilizadas para definir un determinado diseño de puntos. Existe una terminología básica para especificar esas características, cuyo conocimiento es fundamental para la comprensión posterior de los elementos que intervienen en la reproducción del color (Castner y Robinson, 1969:12; Robinson *et al.*,

¹⁰⁸ Véase figura II.50, en cap. II, ap. II.2.2.3.6. *Percepción cromática de un diseño de puntos*, pág. 170.

1987:187). Esta terminología y correspondientes características se explican en los apartados siguientes.

II.2.2.3.1.- Forma de los puntos

La definición de puntos de medio tono podría limitar las posibilidades existentes, en cuanto a las distintas formas geométricas que pueden desempeñar la función de modular la saturación de un color. Un término más amplio, como ya se ha mencionado anteriormente, sería el de signos correspondientes a formas geométricas diferentes, como pueden ser puntos, líneas, círculos, etc. (Fig. II.43). Sin embargo, en este caso se empleará el término de puntos ya que son éstos los signos que han sido utilizados para reproducir el color en el SIRECRAMT.

Posibilidad de formas distintas

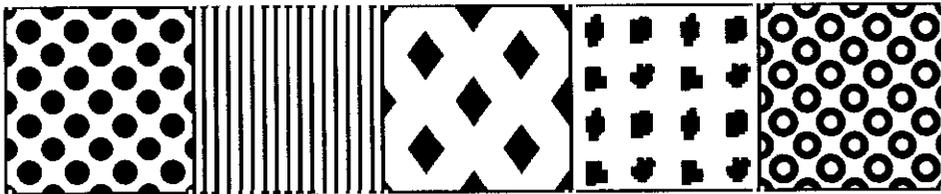


Fig. II.43. Diseños formados a partir de diferentes signos: puntos, líneas, rombos, formas irregulares y círculos.

La forma de los puntos y la distribución del color en su interior debe ser uniforme; estas características se cumplen cuando el punto es circular. Destacar que la existencia de irregularidades afectan a la percepción del área del diseño de puntos. Concretamente, formas irregulares dificultan el agrupamiento visual de los puntos, puesto que la irregularidad es una característica que se opone a la semejanza¹⁰⁹. Así mismo, si se tiene en cuenta que la percepción del color está en función de la cantidad de color depositado sobre el soporte, una variación en la forma de los puntos puede modificar la cantidad del área cubierta de

Uniformidad

¹⁰⁹ Véase *Características de agrupamiento*, págs. 155, 156.

color; por tanto, las irregularidades formales pueden afectar la percepción del tono general del diseño.

II.2.2.3.2.- *Tamaño de los puntos*

Áreas de tamaño variable

Los puntos que forman el diseño deben ser considerados como áreas concretas y no como signos puntuales inmensurables. Teóricamente, su tamaño se puede considerar como el correspondiente a un círculo perfecto¹¹⁰, definido por su diámetro. No obstante, estos puntos pueden ser distorsionados a lo largo del proceso de reproducción, presentando generalmente una forma circular imperfecta, elíptica, rectangular o fragmentada.

Factores que limitan el tamaño

Existen tres factores que limitan el tamaño apropiado de los puntos en el proceso de reproducción del color: el espacio entre los puntos, la agudeza visual para discernirlos y la propia capacidad del proceso de reproducción para reproducirlos.

Máximo tamaño

Variación del diámetro

En un diseño de puntos, el tamaño máximo para un espaciado determinado es el que corresponde a una distribución semejante a la de un tablero de ajedrez del cincuenta por ciento. Como muestra la figura II.42, el tamaño de los puntos define el porcentaje de área de color que cubre la superficie del soporte. En un diseño de puntos regular, una disminución del diámetro de los mismos supone una menor área de la superficie cubierta de color, mientras que un mayor diámetro de punto provoca el efecto contrario. El tamaño de los puntos determinará, en parte, la capacidad del ojo para detectarlos individualmente, o bien, mezclarlos visualmente en una sola tonalidad. Por último, la capacidad del sistema de reproducción del color utilizado, puede limitar el tamaño de diámetro mínimo.

¹¹⁰ Observar la excepción de que cuando se trata de un diseño de puntos del un 50% la forma de éstos se corresponde con un cuadrado en lugar de un círculo, como se muestra en la figura II.42, pág. 153.

II.2.2.3.3.- Espaciado entre los puntos

El espaciado entre los puntos de un diseño regular viene definido por su distancia lineal, medida a lo largo de líneas de puntos; esta distancia es la que corresponde a la separación mínima entre los centros de dos puntos más próximos.

En general un diseño de puntos está determinado por su textura, la cual corresponde a su vez, al número de puntos repetidos en una distancia determinada; técnicamente este aspecto se conoce como *lineatura* y se expresa en líneas de puntos por centímetro (l/cm) o líneas por pulgada (l/pulg) (Fig. II.44).

Lineatura

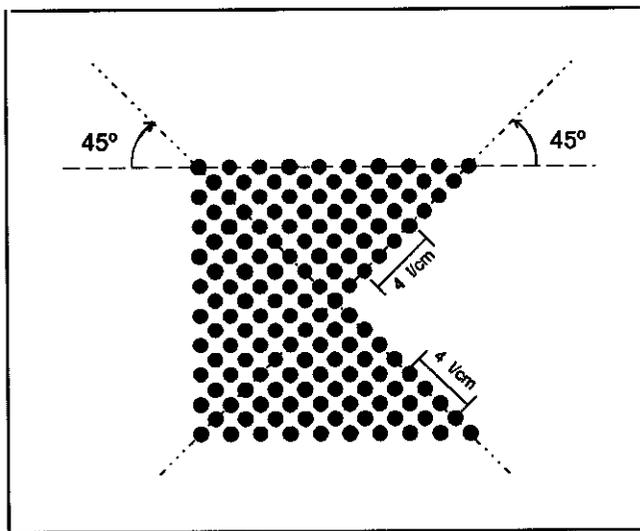


Fig. II.44. La lineatura de un diseño de puntos se mide en aquella dirección en la que los puntos están más próximos. El diseño de puntos del gráfico, presenta un lineatura de 4 l/cm.

La lineatura es simplemente el inverso del espaciado entre los puntos; cuanto más corta sea la distancia del espaciado, mayor será el valor de la lineatura, y viceversa.

Los diseños de puntos cuya estructura es visible, poseen un bajo número de líneas de puntos por centímetro, por ejemplo, 10 ó 20 l/cm, y

*Lineatura
basta*

*Lineatura
fina*

se dice que tienen una lineatura tosca, basta; por el contrario, un diseño de puntos con un número elevado de líneas por centímetro, por ejemplo, 40 ó 60 l/cm, presenta una lineatura fina, responsable de que no se aprecie la estructura del diseño de punto a simple vista.

*Lineatura y
porcentaje de
punto*

Al variar la lineatura se varía el número de puntos existentes dentro de un área; esto supone que, si se pretende cubrir un mismo porcentaje de área de color¹¹¹ utilizando distintas lineaturas, habrá que variar el diámetro de los puntos. Como se puede apreciar en la figura II.45, si se emplea un diseño de puntos de lineatura elevada, el diámetro de los puntos será más pequeño que si se recurre a una lineatura baja.

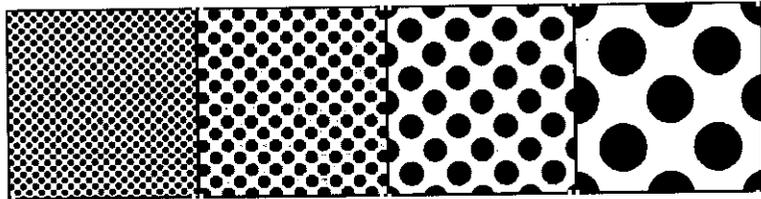


Fig. II.45. Los siguientes cuatro diseños de puntos presentan todos a un 40% de porcentaje de punto, sin embargo la lineatura en cada uno de ellos es distinta. De izquierda a derecha las lineaturas son: 10, 5, 3 y 2 l/cm, respectivamente.

— *Relación lineatura - poder separador del órgano visual*

*Umbral de
percepción de
los puntos*

Para determinar el umbral de la lineatura de un diseño de puntos a partir de la cual no se aprecie el entramado de puntos individuales, es necesario recurrir de nuevo a la estructuración del órgano visual.

Agudeza visual

La capacidad de resolución del órgano visual para detectar puntos aisladamente viene determinada por su agudeza visual, la cual a

¹¹¹ El porcentaje del área de color que cubre una superficie se expresa como tanto por ciento de punto, así por ejemplo, se puede decir que un diseño de puntos que presente la estructura de un tablero de ajedrez, tiene un porcentaje de punto del 50%.

su vez, está estrechamente relacionada con el diámetro y la distribución de los conos situados en la zona foveal de la retina que, como se recordará, corresponde al área de máxima resolución¹¹² (Castner y Robinson, 1969:17; Granovscaya, Bereznyaya y Grigorieva, 1987:47; Kaiser y Boyton, 1996:114). La capacidad de los conos yuxtapuestos en ese área de la retina para separar dos puntos *a* y *b* (Fig. II.46), que constituyen la imagen obtenida a partir de dos puntos A y B situados en la lejanía, corresponde a un ángulo visual aproximado de un minuto sexagesimal^{113,114}. Este valor caracteriza la agudeza visual o poder separador del ojo humano¹¹⁵. La tangente trigonométrica de este ángulo corresponde a la distancia aparente entre los dos puntos.

Ángulo visual

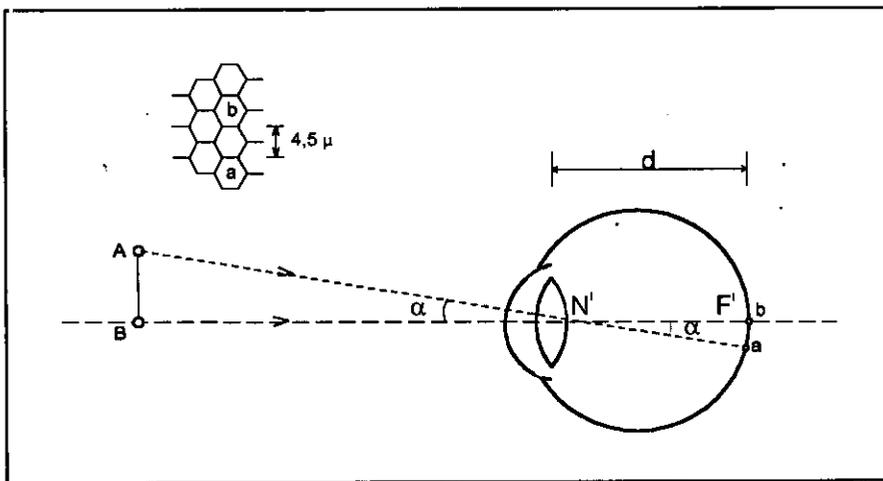


Fig. II.46. Esquema de percepción de dos puntos A y B. Si se considera que la distancia desde el punto nodal posterior del cristalino N' a la retina F' es de 14,767 mm, y el diámetro medio de los conos es de 4,5 μ, el ángulo que determina la agudeza visual de aproximadamente un minuto sexagesimal, viene definido por la inversa de la tangente de la relación entre el diámetro de los conos y la distancia N'F'.

¹¹² Véase cap. II, ap. II.1.1.3. *Percepción luz-color*, pág. 94.

¹¹³ Desde el cristalino, las células de la retina se ven bajo un ángulo de 30 segundos de arco, por lo que sería de esperar un ángulo visual de un minuto para distinguir una separación entre dos puntos luminosos, dejada una célula sin exponer a la luz entre dos expuestas.

¹¹⁴ Se expresa como ángulo aproximado ya que puede variar dependiendo del observador, condiciones de iluminación y forma de los objetos.

El ángulo visual describe el tamaño mínimo de la imagen retiniana, independientemente del tamaño o distancia a la que se encuentre el objeto que la produce. Este ángulo es el que corresponde a las líneas imaginarias trazadas desde el ojo a los bordes exteriores del objeto, que se dice abarca ese ángulo; asimismo, permite establecer el tamaño y la distancia límite, más allá de los cuales los objetos no son percibidos aisladamente (Frisby, 1987:165).

Condicionantes

La agudeza visual varía en los distintos sujetos y además depende de las condiciones de iluminación y forma de los objetos observados; concretamente depende de la luminancia del objeto, de su posición, de su contraste sobre el fondo, y del diámetro de la pupila del ojo.

Así, el poder separador o de resolución del ojo es menor para bajas luminancias, diámetros de pupila muy grandes o muy pequeños y para objetos más lejanos.

*Disminución
de la agudeza
visual en
diseños*

Aunque el ángulo visual corresponde al valor mínimo reconocible de un elemento aislado, cuando existen elementos semejantes adyacentes, como es el caso de un diseño de puntos, la resolución de un único punto dentro del diseño resulta más difícil (Castner y Robinson, 1969:20). El resultado es como si disminuyese la agudeza visual, o lo que es lo mismo, el ángulo visual aumentase.

Considerando la agudeza visual de un minuto sexagesimal, un punto del diseño aislado cuyo diámetro sea de 0,05 mm no será percibido como tal, cuando la distancia de observación sea superior a 170 mm, mientras que si este mismo punto forma parte de un diseño de puntos similares, no será apreciado incluso a una distancia de 90 mm.

¹¹⁵ Ángulo de *agudeza visual* es el mínimo ángulo bajo el cual se puede ver dos puntos separadamente; a la inversa de tal ángulo se le llama *poder separador* o *poder de resolución*.

Ensayos realizados (Blackemore y Campbell, 1969:237-260), en un diseño de un enrejado de líneas de una anchura y separación de 1,27 mm; demuestran que resulta imposible su apreciación individual a una distancia de 2.895 mm; estos datos permiten definir un umbral de agudeza visual para la resolución de elementos gráficos dentro de un diseño. Concretamente, a estos valores de distancia de apreciación y anchura de líneas corresponde un ángulo visual de, aproximadamente, un minuto y treinta segundos sexagesimales. Esto supone una agudeza visual inferior a la necesaria para aislar una línea que no forme parte del enrejado, cuyo ángulo visual se había cifrado en un minuto sexagesimal (Frisby, 1987:109-110).

*Agudeza visual
dentro de un
diseño*

En este sentido, un diseño de puntos que presente una lineatura mayor de 30 l/cm, y sea contemplado a una distancia aproximada de 40 cm, se percibirá normalmente como un único tono de color (Robinson *et al.*, 1987:190), ya que el ángulo visual de un minuto treinta segundos sexagesimales no permitirá discernir la estructura aislada de los puntos.

La disminución de la agudeza visual en un diseño de puntos con respecto a los puntos aislados se debe, en parte, a las características ópticas ya citadas¹¹⁶, que favorecen el agrupamiento de elementos: proximidad, continuidad, semejanza de formas, tamaños, dirección, así, como a efectos de dispersión de la luz.

En base a lo anterior, si para un punto situado en un diseño de puntos, se considera el poder separador de un ángulo visual de un minuto sexagesimal, se estará por debajo del umbral de poderlo discernir. En consecuencia, no serán apreciados los puntos del diseño aisladamente, si no en su totalidad.

En un diseño de puntos de baja lineatura, al ser el diámetro de los mismos mayor (Fig. II.45), resulta fácil percibir el diseño como un

¹¹⁶ Véase cap. II, ap. II.2.2.3. *Función de los puntos de medio tono*, págs. 155, 156.

conjunto de puntos aislados; mientras que en un diseño de elevada lineatura, al ser el diámetro de los puntos menor que el umbral de la agudeza visual, éstos no podrán ser discernidos y el diseño será percibido como un área de un sólo tono, sin estructura visible de puntos.

Percepción de un diseño de lineatura elevada

Se puede presuponer que en el proceso de observación de diseños formados por lineaturas elevadas y, por tanto, con numerosos puntos, se producirá un mayor número de descargas neurales por distancia lineal del movimiento del ojo, y como resultado el ojo recibirá una impresión más continua de color.

En resumen, se puede decir que la forma como es percibido un diseño de puntos, bien como puntos aislados o bien como un tono general, depende, principalmente, de su lineatura.

II.2.2.3.4.- Distribución de los puntos

Organización de los puntos

Este aspecto se refiere a la organización física o posición relativa de los puntos que definen la estructura del diseño; en un sentido figurado, estas posiciones relativas podría suponerse encuadradas en las intersecciones de figuras geométricas, tales como un cuadrado o un triángulo (Fig. II.47).

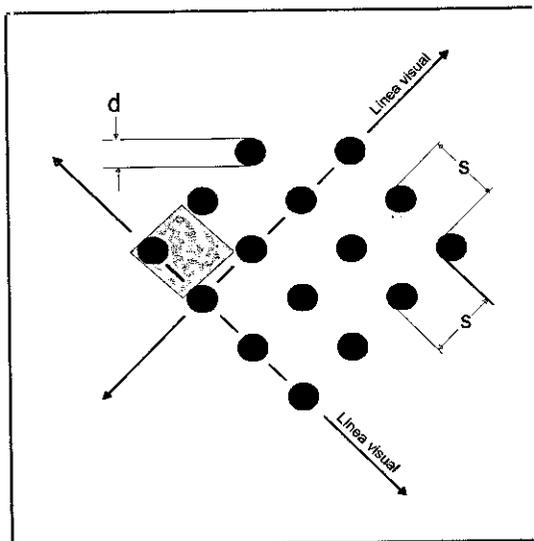


Fig. II.47. Diseño de puntos con distribución cuadrada en el que se aprecian las líneas visuales en posición perpendicular entre sí. Los valores de espaciado (s) y diámetro de los puntos (d) sirven para determinar el porcentaje de color que cubre la superficie (Castner y Robinson, 1969:21).

La proximidad, semejanza y continuidad de los puntos de un diseño dan como resultado su organización en unas líneas visuales directrices, a lo largo de las cuales se ve inducido el movimiento del ojo.

Líneas visuales directrices

Si se considera la distribución de los puntos dentro de un cuadrado imaginario (Fig. II.47), las líneas visuales se situarían en dos direcciones ortogonales y cada punto del diseño equidistante de los cuatro puntos más cercanos (Castner y Robinson, 1969:20-21).

Para una distribución de este tipo, la expresión matemática del porcentaje del área de color se determina a partir del área de un punto (Ec. II.7) y el área cuadrada máxima (Ec. II.8).

Porcentaje del área de color

$$\text{Área de un punto} = \frac{\pi d^2}{4} \quad (\text{II.7})$$

$$\text{Área cuadrada máxima} = S^2 \quad (\text{II.8})$$

Según esto, el porcentaje del área de color se expresaría como:

$$\text{Porcentaje del área de color} = \frac{\pi d^2}{4S^2} \quad \text{o bien,} \quad \frac{0,7854 d^2}{S^2} \quad (\text{II.9})$$

II.2.2.3.5.- Orientación de los puntos

La orientación de un diseño de puntos está referida a la posición de las líneas visuales, anteriormente definidas, en relación a una línea horizontal de referencia.

Ángulación de las línea visuales

*Diferente
percepción
según la
angulación*

La variación del ángulo de orientación en un diseño de puntos no debería repercutir en el valor de la percepción, si ésta es considerada como una respuesta al área relativa de color; sin embargo, parece tener el efecto de aumentar el contraste percibido en diseños de puntos de elevada lineatura (Castner y Robinson, 1969:22, 28; Robinson *et al.*, 1987:190). Según sugieren Castner y Robinson (1969:24-25), este efecto puede estar relacionado con el movimiento del ojo, según pueda moverse en direcciones preferentes respecto a las líneas visuales del campo de visión (Fig. II.48).

*Ángulos de
máxima y
mínima
apreciación:*

Pruebas realizadas de agudeza visual sobre un test de líneas paralelas, muestran una apreciación más baja de las mismas cuando están situadas en ángulos oblicuos, principalmente de 45° y 135°, y una apreciación máxima a 0° y 90° (Frisby, 1987:104-105).

Si se considera que el movimiento del ojo es preferentemente en horizontal (0°) y vertical (90°), cuando las líneas visuales de puntos estén organizadas visualmente en estas direcciones, resultará más fácil su percepción. La variación entre estas orientaciones, 0°-45°y 45°-90°, produce una transición intermedia entre ambos extremos de percepción.

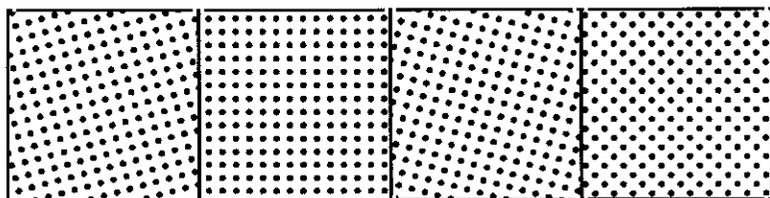


Fig. II.48. Efectos de percepción producidos por los cambios de orientación de los diseños de puntos. De izquierda a derecha poseen una angulación de: 15°, 90°, 75° y 45°. Los cuatro diseños de puntos tienen la misma lineatura y porcentaje de punto. En el último diseño, correspondiente a 45°, es donde menos se aprecian las líneas visuales generadas por los puntos.

Sin embargo, este efecto visual, no puede ser determinado ni por el porcentaje de punto, ni tan siquiera a través de la medición realizada con un densitómetro, ya que éste no posee el aspecto clave del movimiento del ojo (Castner y Robinson, 1969:28).

II.2.2.3.6.- Percepción cromática de un diseño de puntos

Los parámetros que definen un diseño de puntos (tamaño, forma, espaciado, distribución y orientación), producen en su conjunto una impresión visual que, básicamente, es el resultado de su integración mental; concretamente de la cantidad de color depositada sobre el soporte y la forma en que los puntos está distribuida (Fig. II.49).

Impresión visual

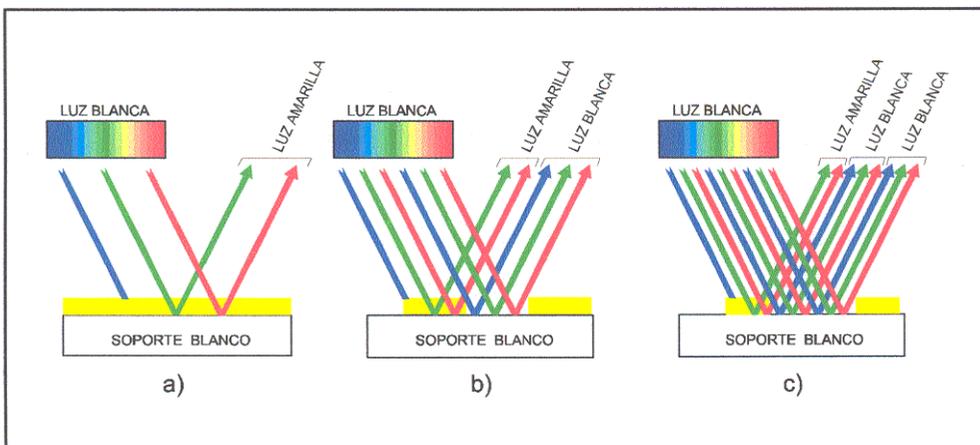


Fig. II.49. En las tres partes *a*, *b* y *c*, de que consta el gráfico, se muestra cómo los puntos de color amarillo cubren de forma distinta el soporte, concretamente en porcentajes de 100%, 60% y 40% respectivamente. La mezcla aditiva de las radiaciones reflejadas produce la sensación de diferentes grados de saturación del color amarillo, siendo máxima en la imagen *a* (100%), y disminuyendo en *b* (60%) y en *c* (40%).

Según sea la lineatura del diseño de puntos, se percibirá una sensación de color del conjunto (diseño de lineatura elevada), o bien, se verá puntos de color y los espacios entre los mismos (diseño de baja lineatura). En el SIRECRAMT, se parte de diseños de puntos cuya

Percepción de un tono general

lineatura es lo suficientemente alta como para percibir un tono general a la distancia normal de observación de la obra donde son aplicados.

Para analizar la sensación visual originada por un diseño de puntos es necesario conocer la cantidad de color aplicado sobre la superficie, así como el tono generado por todo su conjunto; es decir, el color que realmente existe y el que visualmente es percibido (Castner y Robinson, 1969:25).

Como se ha mencionado, las sensaciones son definidas en función de los estímulos luminosos que las generan; así, la sensación del tono generado por el conjunto de puntos de un diseño, se define a partir de la medición del área del conjunto de puntos de color; con esta finalidad a este área se le asignan unos valores identificables con la respuesta cromática percibida. Concretamente, se pretende realizar una medición mediante una escala de la impresión visual cromática, expresada en términos de porcentaje de área de color.

*Medición por
escala*

Si se considera que el porcentaje de la luz absorbida por el color es aproximadamente proporcional al porcentaje del área cubierta por los puntos, tendremos que si éstos cubren un 40% del área del soporte, el color absorberá un 40% de la luz que, por su color, le corresponde; así por ejemplo, un diseño de puntos de un 40% de puntos de color magenta, absorberá un 40% de la radiación espectral verde, o lo que es lo mismo, del 100% de reflectancia de las tres radiaciones -roja, verde y azul- del soporte blanco sobre el que están los puntos de color magenta, éstos restarán un 40% de la luz verde, por lo tanto al observador llegará un 100% de la radiación roja y azul, y un 60% de la verde (Fig. II.49). En consecuencia, cuanto mayores sean los puntos y más próximos estén, mayor será la saturación del color del área de la imagen.

*Medida del
área de color*

Directa

El área real de color existente en un diseño de puntos puede ser calculada directa o indirectamente. En el primer caso, se miden las dimensiones que conforman el diseño de una determinada muestra de

puntos y se calcula el porcentaje del área de color¹¹⁷; este porcentaje expresa la relación entre el área cubierta de color dentro del diseño y el área total del mismo.

La medición indirecta se realiza mediante un densitómetro. Este instrumento analiza la proporción entre la cantidad de luz incidente sobre el diseño de puntos y la cantidad de luz reflejada por el mismo (Arnold, Rolls y Stewart, 1974:49-50; Kodak, 1978:42-44). La densitometría proporciona una medida relativa del tamaño del punto en comparación con otras áreas de puntos.

Indirecta

Las series de diseños de distintos porcentajes de puntos de cada uno de los colores base, se pueden representar a partir de escalas lineales o unidimensionales, que muestran los distintos grados de saturación que pueden obtenerse (Grandis, 1985:43). Los intervalos de medida de estas escalas pueden estar cifrados en diferentes porcentajes de punto; normalmente, los incrementos son del orden del diez por ciento de punto (Fig. II.50), con los que se obtienen escalas de transición suaves y discernibles por el sistema visual. Las escalas con incrementos inferiores proporcionan transiciones todavía más suaves, si bien, a efectos prácticos el incremento estará limitado por la capacidad del sistema para poder reproducirlo, así como por la textura de la superficie sobre la que se va a reproducir.

Escalas de saturación

Las escalas están comprendidas entre un 0% y un 100% de porcentaje de punto, lo que supone que con incrementos del 10%, se obtienen escalas de once pasos (Fig. II.50). Hay que señalar, que la utilización de porcentajes de punto del 100%, podría interferir con los criterios de reintegración¹¹⁸ en cuanto a su discernimiento, ya que en el porcentaje de punto del 100% no existe la estructura de puntos que

¹¹⁷ Véase Ec. II.9, en cap. II, ap. II.2.2.3.4. *Distribución de los puntos*, pág. 165.

¹¹⁸ Véase cap. I, ap. I.3. *Exigencias técnicas*, págs. 53, 54.

puedan identificar la reintegración. Por esta razón, se utilizan escalas con porcentajes de punto inferiores al 100%.

De esta forma, a partir del porcentaje de punto de color, se puede establecer la relación entre las variaciones unidimensionales de saturación y el correspondiente estímulo generado. Estas variaciones son representadas por escalas monocromáticas de saturación de cada uno de los tres colores base (Fig. II.50).

Escalas monocromáticas de saturación

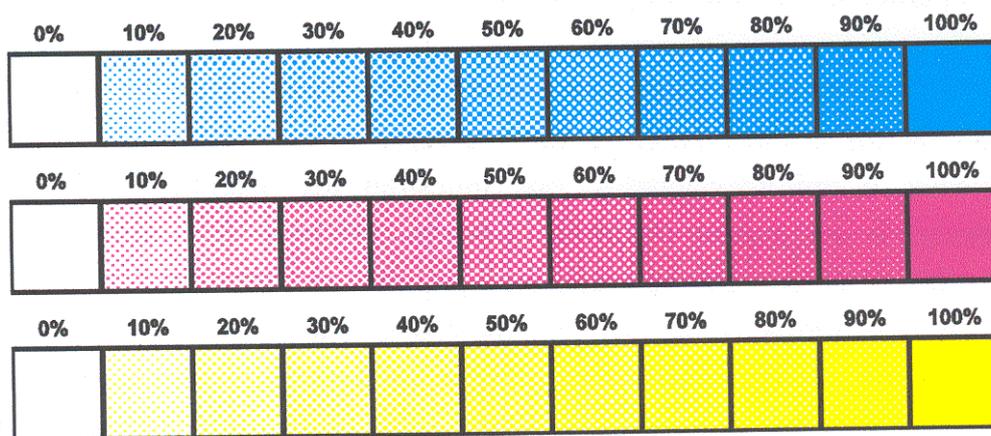


Fig. II.50. Representación lineal o unidimensional correspondiente a escalas o grados de saturación de cada uno de los tres colores base: amarillo, magenta y cian. Cada escala es cifrada en intervalos del 10% de porcentaje de punto.

En resumen, se ha mostrado la forma en que los puntos de medios tonos, permiten obtener diferentes escalas de gradación de saturación para cada uno de los tres colores base. Asimismo, en un apartado anterior¹¹⁹ se ha visto cómo la combinación de las tres capas de colores base superpuestas sobre un soporte blanco, absorben selectivamente la radiación de luz incidente, y producen las sensaciones correspondientes a los seis colores cromáticos y los dos acromáticos.

¹¹⁹ Véase cap. II, ap. II.2.2.2. *Función de los pigmentos*, pág. 143.

Destacar que en esta operación, las capas de color eran consideradas en su máxima saturación, es decir, expresadas en función del área de color cubierta, corresponderían a un área de un porcentaje de punto del 100%.

Si se considera que la combinación de las capas de cada uno de los tres colores base que se superponen corresponden a diferentes porcentajes de área de puntos de color, es fácil deducir que se obtendrá una amplia gama de colores. Sin embargo, como etapa previa, es necesario establecer una serie de consideraciones técnicas referidas a la forma de superposición de los diseños de puntos de color.

Posibilidad de múltiples combinaciones de color

Superposición de los diseños de puntos

Supongamos un diseño de un determinado porcentaje de punto de un color base y con una cierta angulación, por ejemplo, un porcentaje de punto del 30% de color amarillo y con una inclinación de 45°; si sobre el mismo se colocase superpuesto otro diseño de puntos de igual lineatura, con igual o distinto porcentaje y con la misma angulación, por ejemplo, un porcentaje de punto del 40% del color base magenta y con una inclinación de 45°, los puntos de ambos diseños estarían superpuestos. Este efecto no es satisfactorio para la reproducción del color, pues de esta forma el color producido dependería de que los puntos estuviesen superpuestos unos sobre otros en perfecto registro, lo que supondría que el color producido resultante fuese extremadamente sensible a las mínimas variaciones de registro, ya que como se ha indicado al tratar el tema de la falta de aditividad¹²⁰, los puntos de color superpuestos absorben menos luz que la correspondiente a la suma de las absorciones de los puntos individuales (Yule, 1967:335).

Los diseños deben tener diferentes angulaciones

A partir de este momento y a lo largo de la explicación, en las referencias que se realicen respecto a la superposición de varios diseños de puntos de color, se partirá de la condición de que todos tienen la misma lineatura.

¹²⁰ Véase cap. II, ap. II.2.2.2. *Función de los pigmentos*, págs. 149, 150.

Cada color
base una
inclinación

Al objeto de realizar una distribución de los diseños de puntos, de forma que no coincidan los puntos cuando son superpuestos los tres colores base o lo hagan lo menos posible, a cada color se le asignará una inclinación determinada. De este modo, los puntos estarán distribuidos de forma que tiendan a cubrir el soporte y no a superponerse; situándose adosados unos a otros. Se entiende que la disposición de los puntos, sin que se produzca cierta superposición, estará limitada por el umbral del porcentaje de punto; así, por ejemplo, en dos diseños de punto superpuestos, cada uno de ellos con un porcentaje de punto del 60 y 70%, necesariamente tendrán que superponerse parcialmente los puntos.

Muaré

La variación del ángulo de inclinación de los diseños de puntos de color de igual lineatura no se hace de una manera aleatoria ya que, si así fuese, como resultado de la superposición de los diseños, podrían aparecer unas formas geométricas repetitivas (Fig. II.51), conocidas con el nombre de *muaré*¹²¹ (Bridgewater y Woods, 1993:118; Yule, 1967:330).

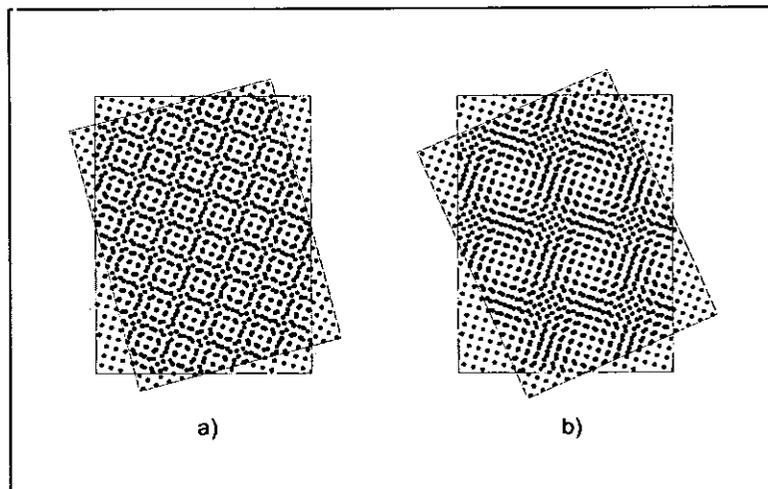


Fig. II.51. Muaré producido por la superposición de dos diseños de puntos con una misma lineatura y una inclinación aleatoria. Este efecto es más acusado cuanto mayor sea la intensidad de los colores de los puntos; así, en los puntos en negro es más acusado que en los puntos de color.

¹²¹ El término *muaré* deriva de la palabra en francés *moiré*.

Partiendo de la superposición de dos diseños de puntos con fondos transparentes, si sobre ésta se varían sus respectivas inclinaciones, se apreciarán constantes cambios en el diseño de muaré, tal y como se pone de manifiesto en la figura II.51a y II.51b. Los diseños de muaré guardan una relación matemática que se utiliza en la resolución gráfica de ecuaciones; en el caso que se describe en relación a un ángulo (Stong, 1964:134).

El muaré perturba la percepción del diseño de puntos como un solo tono general; las formas geométricas que aparecen surgen como elementos aislados fácilmente perceptibles, que atraen la atención del observador.

*Aspecto
negativo del
muaré*

Los estudios realizados para la reproducción del color por tricromía sugieren que, para evitar el efecto de muaré, los ángulos empleados en cada uno de los diseños de puntos de los colores base, debe tener una diferencia de 30° (Burden, 1978:328; Langford, 1972:432; Robinson *et al.*, 1987:190; UNE 54-022-81; Yule, 1967:336).

Como se ha podido comprobar al tratar de la agudeza visual, el órgano visual muestra la menor apreciación visual para ángulos oblicuos¹²², concretamente de 45°, partiendo de esta situación, éste ángulo será el que se utilice para el diseño de puntos del color más intenso, en este caso para el color cian (Burden, 1978:328; Yule, 1967:329-330). Los otros dos colores base; amarillo y magenta, estarán a un ángulo de 30° respecto al de 45°; es decir, al color magenta le corresponderá un ángulo de 15° y al color amarillo un ángulo de 75°, o viceversa (Fig. II.52).

Inclinaciones

¹²² Véase cap. II, ap. II.2.2.3.5. *Orientación de los puntos*, pág. 166.

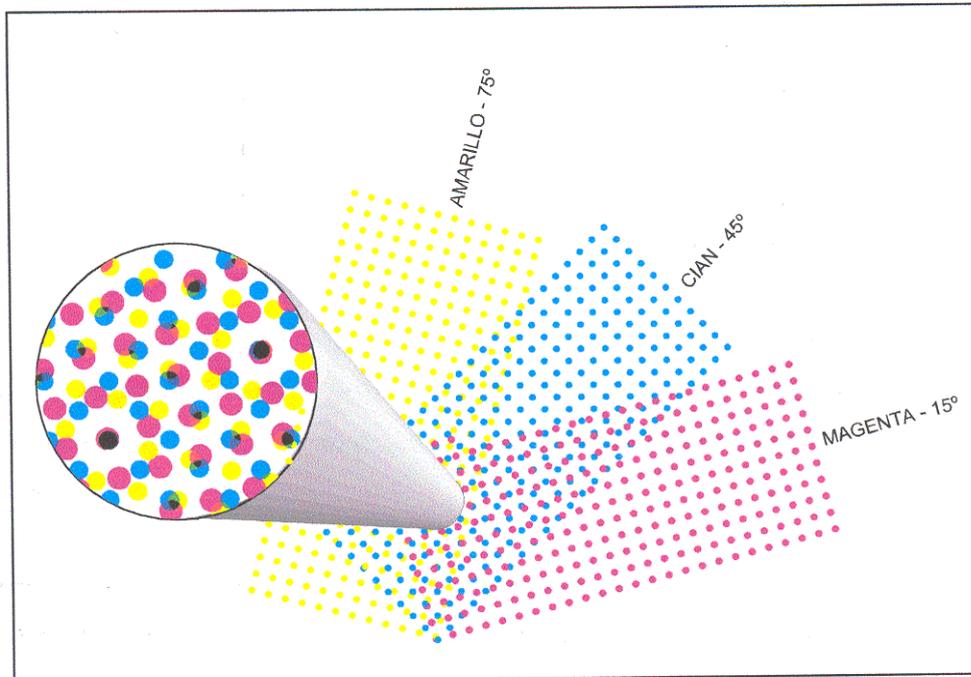


Fig. II.52. Inclinationes correspondientes a cada uno de los tres colores base: cian, 45°; amarillo, 75° y magenta, 15°. En el área circular ampliada se pueden observar más detalladamente las inclinaciones mencionadas correspondiente a las líneas visuales que unen los puntos más próximos de un mismo color.

Rosetas

La distribución de los puntos de los tres colores base superpuestos, con las inclinaciones descritas, constituyen unas formas geométricas denominadas *rosetas* (Fig. II.53). En algunas zonas, las rosetas de puntos están formadas alrededor de un punto central, compuesto de la superposición de los tres puntos de color. En otras, están formadas por dobles anillos de puntos con ausencia de puntos en el centro (Fig. II.53). Entre estos dos extremos se forman distintos diseños irregulares de puntos (Yule, 1967:339).

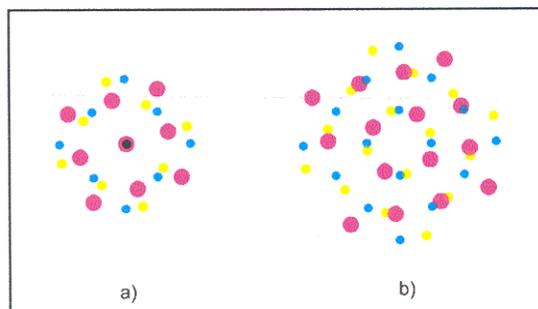


Fig. II.53. Distintos tipos de rosetas: a) roseta formada con registro de puntos en el centro; b) roseta de dobles anillos de puntos.

La simetría de los puntos dentro de un diseño hace que la superposición de varios diseños de color generen doce rosetas, distribuidas en círculo alrededor de la primera roseta, concretamente una por cada 30° (Yule, 1967:341). Así, según se muestra en la figura II.54, respecto a la roseta A, se forman a su alrededor en el primer cuadrante de 90° , tres rosetas B, C y D, luego en 360° serán doce las rosetas generadas respecto a la roseta inicial A.

Distribución de las rosetas

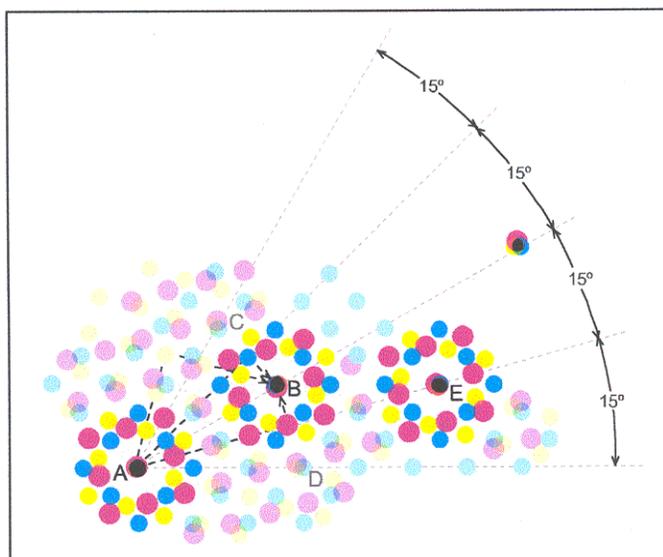


Fig. II.54. Distribución de las rosetas de puntos obtenida por la superposición de los tres colores base con sus respectivas inclinaciones: amarillo 75° , magenta 15° y cian 45° . Se observa cómo las rosetas se generan alrededor de una inicial (A) cada 30° , produciéndose un número total de doce, tres por cada cuadrante de 90° (B, C y D). No existe una repetición exactamente igual de la roseta de los puntos a lo largo de todo el diseño.

En teoría, no es posible que se repita un registro exacto de estas rosetas ya que las tangentes de los ángulos de los diseños de puntos y la relación de distancias entre los puntos son números irracionales¹²³ (Yule, 1967:341). Sin embargo, la apreciación visual de estas diferencias no se encuentran dentro de la agudeza visual.

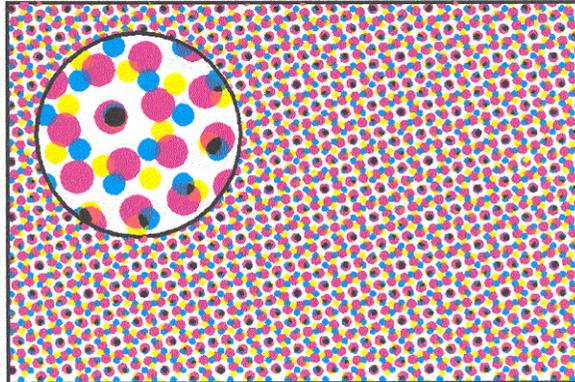
Asimismo, pequeñas variaciones en los ángulos especificados para cada uno de los tres colores base, hacen que la disposición de los puntos pueda variar en su superposición; por la misma razón que en el caso anterior, estas variaciones no se corresponden con diferencias cromáticas apreciables (Yule, 1967:341).

*Mosaico de
colores*

En la superposición de diseños de puntos de cada uno de los tres colores base se forma un mosaico de áreas de color, correspondientes a los seis colores cromáticos: amarillo, magenta, cian, rojo, verde y azul, y los dos colores acromáticos: negro y blanco. En función de que las áreas del soporte no sean cubiertas por los puntos de color, se percibirá el color blanco del mismo; cuando coincidan los tres puntos superpuestos -amarillo, magenta y cian-, se verá el color negro; rojo, donde los puntos de color amarillo y magenta se superpongan; verde, donde los puntos de color amarillo y cian estén superpuestos; azul, donde se superpongan los puntos de color magenta y cian, y donde se sitúen los puntos aisladamente amarillo, magenta y cian (Fig. II.55).

¹²³ Siguiendo la figura II.54, un registro exacto de los tres puntos de color amarillo, magenta y cian, tiene lugar en la roseta con punto central A. En la próxima roseta B, los tres puntos ya no están en un registro exacto; se sitúa en un ángulo de 15° respecto al diseño de puntos magenta y cian, y a 45° respecto al tercer diseño de color amarillo. Su centro aproximado B, puede ser determinado desde la primera roseta A por cuatro puntos en la línea visual de 15° , correspondiente al color magenta, y un punto perpendicular a esta dirección. La tangente del ángulo subtendido por estos puntos están en la relación $\frac{1}{4}$, y corresponde a un ángulo de $14^\circ 2'$, y la distancia entre los centros de las rosetas A y B es $\sqrt{4^2 + 1^2}$. Una misma deducción puede seguirse para situar el punto de color cian. La distancia entre los puntos es la misma, y el ángulo será $30^\circ - (14^\circ 2') = 15^\circ 58'$. Así, los puntos de los diseños magenta y cian no están exactamente en registro en el centro de la roseta B, ya que existe una diferencia de ángulo de cerca de 2° ($14^\circ 2'$ y $15^\circ 58'$). El tercer diseño, color amarillo, los puntos se distribuyen exactamente sobre la línea de 30° y a una distancia de $\sqrt{3^2 + 3^2}$. Por lo tanto, en B se forma el centro de una roseta asimétrica respecto a la primera A. La posición de la roseta B respecto a la primera A, puede representarse por cada uno de los tres colores amarillo, magenta y cian de la forma siguiente (3,3; 4,1; 4,1).

Fig. II.55. La imagen muestra la superposición de los tres colores base de distintos porcentajes de punto, con una lineatura de 6 l/cm y con sus respectivas inclinaciones, amarillo 75°, magenta 15° y cian 45°. El área circular presenta una ampliación de la imagen donde se aprecian los ocho colores posibles resultantes de la superposición.

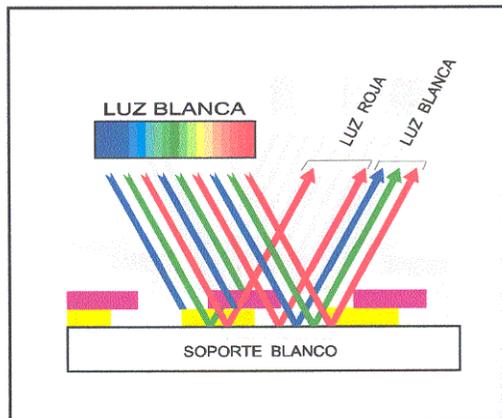


En el mosaico de los ocho colores posibles existe una mezcla sustractiva en las áreas en las que los puntos están superpuestos total o parcialmente. La mezcla óptica del conjunto de los puntos de color aislados, del blanco del soporte que permanece sin cubrir y del color resultante de la mezcla sustractiva de los puntos de color superpuestos, permite obtener la sensación del color global correspondiente (Fig. II.56).

Mezcla sustractiva

Mezcla óptica

Fig. II.56. La superposición de dos colores con sus correspondientes porcentajes de punto provocan una absorción selectiva de la radiación incidente, siendo la luz remitida la que es apreciada por mezcla aditiva; en el caso de la figura, de las radiaciones roja y blanca remitidas. El resultado de la mezcla óptica visual correspondería a un color rojo con cierto grado de saturación, ya que el rojo en su máxima saturación sería cuando el porcentaje de punto de los colores amarillo y magenta fuesen del 100% y por lo tanto cubriesen la totalidad del soporte.



Los valores cromáticos surgen cuando la absorción de la luz incidente, radiación azul, verde y roja, no es absorbida en la misma proporción por las tres capas de color. Así, la luz remitida estará

constituida por distintas proporciones de radiación azul, verde y roja, en relación directa con el tamaño de punto de cada uno de los colores base.

Por lo tanto, se deduce que siempre habrá valores cromáticos cuando, por un lado, existan una o dos capas de color, indistintamente del porcentaje de punto, y por otro, existan las tres capas de color siempre con distintos porcentajes de punto.

Por otra parte, los valores acromáticos, como muestra la figura II.57, surgen cuando de la luz incidente, la radiación azul, verde y roja, son absorbidas en la misma proporción por las tres capas de color; esta situación se alcanza, teóricamente¹²⁴, cuando existen iguales porcentajes de punto en las tres capas. La luz remitida tras la absorción por las tres capas de color, junto con la remitida por el espacio blanco del soporte que continúe activo, dan lugar a los valores acromáticos (Küppers, 1994:145).

Valores
acromáticos

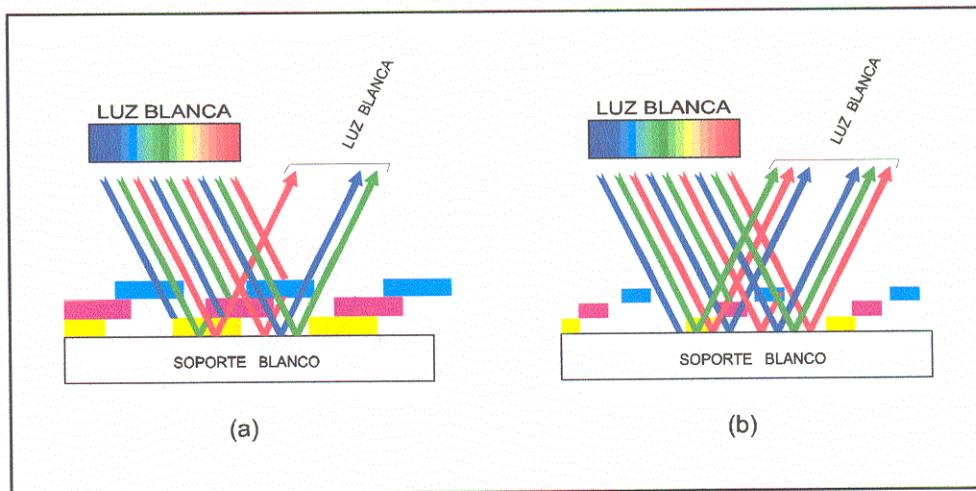


Fig. II.57. En la medida en que los puntos de los tres colores base absorban selectivamente por igual la misma cantidad de la luz incidente, radiaciones roja, verde y azul, se podrá obtener una escala de saturación del color acromático negro. En la imagen *a* el observador tendría la sensación de ver un color más gris que en la imagen *b* ya que esta última refleja más cantidad de luz blanca.

De acuerdo con Küppers (1994:125), los valores acromático y cromático son dos magnitudes recíprocas que juntas conducen siempre a la cantidad matemática del 100%. Cuanto menor es el valor acromático, tanto mayor es el valor cromático y viceversa.

Las combinaciones de los tres colores base en distintos porcentajes de punto permiten variar cada una de las áreas de los ocho colores descritos: cian, amarillo, magenta, rojo, verde, azul, negro y blanco, lo que posibilita técnicamente poder reproducir una amplia gama de colores (Küppers, 1994:16).

Combinaciones de diferentes porcentajes de punto

II.2.2.3.7.- Fondos Tramados Transferibles (FTT)

La siguiente cuestión que surge es cómo obtener materialmente los diferentes diseños de puntos de cada uno de los colores base y cómo situarlos sobre el soporte; todo ello, partiendo de la consideración de que el soporte corresponde al área a reintegrar de la obra de arte, y más concretamente al área de las lagunas estucadas.

Cómo materializar la teoría

La idea básica general es poder disponer de láminas de diferentes porcentajes de punto de cada uno de los tres colores base; las características de estas láminas deben ser tales que permitan su transferencia sobre el área a reintegrar.

Estas láminas de diferentes porcentajes de punto fácilmente transferibles, se denominaran fondos tramados transferibles (FTT).

FTT

Básicamente un FTT consta de un soporte y de una imagen formada por los puntos de color descritos. Los FTT pueden obtenerse

Métodos de obtención

¹²⁴ Se dice teóricamente ya que este comportamiento tendría lugar en el supuesto de la utilización de colores base ideales, cuya absorción selectiva de la radiación fuese perfecta.

por diferentes medios, entre los cuales están los siguientes: fotomecánicos, computerizados y serigráficos o por estampación.

Puesto que el objetivo principal de esta investigación es mostrar la viabilidad del SIRECRAMT como sistema de reintegración, únicamente se ha desarrollado de forma íntegra la obtención de FTT por medios fotomecánicos; los otros procedimientos de obtención quedan como líneas a desarrollar en investigaciones posteriores.

*Obtención
por medios
computerizados*

La obtención de los FTT por medios computerizados se basa, fundamentalmente en registrar, mediante periféricos de salida (impresoras, *plotters*) y sobre un soporte transparente temporal, la información correspondiente a los diferentes porcentajes de punto de color. A través de ensayos previos realizados mediante una impresora térmica de agujas¹²⁵, se ha podido obtener FTT de cada uno de los tres colores base y en distintos porcentajes de punto, con incrementos de 10%, si bien la calidad de la imagen está limitada por la resolución de la impresora. La transferencia de los puntos de color de los FTT así obtenidos se realiza por la conjunción de dos factores: presión y temperatura. Concretamente, la utilización de una espátula térmica, aplicada al reverso del FTT, permite la transferencia de los puntos de color de esa área.

Los FTT así obtenidos deben ser modificados en cuanto a la naturaleza de los pigmentos y aglutinantes, a fin de adaptarlos a las exigencias técnicas de la reintegración. Señalar que debido a la falta de posibilidades para proceder a estas modificaciones, la puesta a punto de la metodología de obtención de este tipo de FTT se ha dejado para posteriores investigaciones.

¹²⁵ Los ensayos realizados se han llevado a cabo a través de una impresora de transferencia térmica de color de agujas de 300 dpi de resolución, marca SHINCO CHC-645, manufacturada por Shinko electric Co. Ltd., Tokyo, Japan.

Los FTT también pueden ser obtenidos por medios serigráficos o de estampación. Estos medios corresponden a sistemas de impresión convencionales, que permiten imprimir sobre diferentes tipos de materiales (Caza, 1983:11). Este sistema de impresión hace más factible la posibilidad de poder variar los elementos que intervienen en el proceso: pigmentos, aglutinantes, soporte del FTT, etc., permitiendo una mejor adecuación a las exigencias técnicas de reintegración.

*Obtención por
medios
serigráficos*

La obtención de los FTT por medios fotomecánicos se realiza fundamentalmente a partir de emulsiones fotosensibles en contacto con negativos tramados. El procesado adecuado de la emulsión, una vez expuesta a una fuente de luz actínica, permite obtener los FTT cuya imagen de puntos de color puede ser fácilmente transferida. En el capítulo siguiente se recoge un estudio detallado de la naturaleza, propiedades y dosificación de los materiales necesarios para la obtención de las emulsiones y negativos. Asimismo, se describen las etapas a través de las cuales se ha puesto a punto el método de procesado de estos materiales, que ha hecho posible la obtención de los FTT.

*Obtención
por medios
fotomecánicos*

Las posibles combinaciones de los FTT permiten obtener una amplia gama de colores que quedan recogidas en tablas cromáticas, las cuales muestran, a su vez, las posibilidades prácticas reales del sistema. Estas tablas son los patrones de referencia en el proceso de reintegración, que hacen posible el análisis del color a reproducir, y su descomposición en los tres colores base y correspondientes porcentajes de punto (Küppers, 1994:21-119; Rogondino, 1990).

Puede considerarse que tanto los FTT como las tablas cromáticas, constituyen las herramientas, a partir de las cuales es posible reproducir el color por el SIRECRAMT. Destacar que ambos elementos han sido desarrollados de acuerdo a las exigencias técnicas requeridas en todo proceso de reintegración y a las particulares del

sistema que se plantea. Como ya se ha indicado, estos aspectos son tratados en el próximo capítulo.

*Posibilidades
prácticas
reales*

Por último, se puede señalar que en esta investigación se plantean las posibilidades prácticas reales del SIRECRAMT. Esto se debe a que se parte de los colores reales disponibles para la reproducción del color, lo cual supone asumirlos con todas sus imperfecciones, frente a las exigencias teóricas ideales. La representación de la combinación de los colores se hace mediante un sistema organizado puramente cuantitativo, dispuesto en escalas cuantitativas. Así, frente a la teoría ideal del color, el SIRECRAMT representa las posibilidades prácticas existentes para su reproducción por tricromía; si bien para su desarrollo se ha partido de los planteamientos teóricos relacionados con la teoría del color y su reproducción.

ABRIR CAPÍTULO III

