

DEPARTAMENTO DE PSICOLOGÍA BÁSICA

EL EFECTO EXPANSIÓN CON UNA RED CUADRADA
ACROMÁTICA EN FUNCIÓN DE LA LUMINANCIA Y DEL
TAMAÑO

CÉSAR URTUBIA VICARIO

UNIVERSITAT DE VALENCIA
Servei de Publicacions
2006

Aquesta Tesi Doctoral va ser presentada a València el dia 21 de Desembre de 2003 davant un tribunal format per:

- D^a. Cristina Rechea Alberola
- D. Josep Pladellorens Mallofre
- D^a. Pilar Roig Picazo
- D. Jaume Pujol Ramo
- D. Ricardo López Rodríguez

Va ser dirigida per:

D. José Luis Miralles Adell

D. Mariano Aguilar Rico

©Copyright: Servei de Publicacions
César Urtubia Vicario

Depòsit legal:

I.S.B.N.:84-370-6517-8

Edita: Universitat de València
Servei de Publicacions
C/ Artes Gráficas, 13 bajo
46010 València
Spain
Telèfon: 963864115



EL EFECTO EXPANSIÓN CON UNA RED CUADRADA ACROMÁTICA EN FUNCIÓN DE LA LUMINANCIA Y DEL TAMAÑO

Memoria de Investigación para optar al grado de Doctor en Psicología
llevada a cabo por

César Urtubia Vicario

Septiembre de 2003

D. Mariano Aguilar Rico, Profesor Emérito del Departamento de Restauración de la Universitat Politècnica de Valencia, y D. José Luis Miralles Adell, Catedrático del Departamento de Psicología Básica de la Universitat de Valencia certifican que el trabajo de investigación *“El efecto expansión con una red cuadrada acromática en función de la luminancia y del tamaño”*, ha sido efectuado bajo su dirección por D. César Urtubia Vicario para optar al título de Doctor en Psicología.

Una vez revisado el trabajo de investigación, informamos favorablemente de que el mismo cumple los requisitos para su presentación y defensa pública.

Fdo. Mariano Aguilar Rico

Fdo. José Luis Miralles Adell

Valencia Septiembre de 2003

Índice

<i>Índice</i>	I
<i>Prefacio</i>	V
<i>Agradecimientos</i>	VII
<i>Introducción</i>	1
1. Presentación	1
2. Contenidos del trabajo de investigación	3
3. Breve reseña histórica de la investigación acerca del color	6
<i>Capítulo 1</i> <i>Psicofísica de la visión del color</i>	19
1.1 El color	19
1.2 Radiación y luz	23
1.3 La trivarianza visual	25
1.4 Colores metámeros	30
1.5 Colores complementarios	32
1.6 Ley fundamental. Pureza colorimétrica	34
1.7 Síntesis tricromática. Diagramas RGB	35
1.8 Mezclas o fusión de colores	45

Capítulo 2 *Neurobiología de la visión en color*..... 47

2.1 La cualidad cromática	47
2.2 Teorías acerca de la visión en color	49
2.2.1 Teoría tricromática.....	49
2.2.2 Teoría de los procesos oponentes	50
2.3 Fotoquímica de la visión en color	51
2.4 Neurobiología de la visión en color	60
2.4.1 Confirmación de la teoría de los pares oponentes de color.....	60
2.4.2 Codificación en la retina.....	62
2.4.3 Codificación del color en el cuerpo geniculado lateral.....	68
2.4.4 Codificación del color en la corteza visual.....	75
2.4.5 Teoría retinex.....	84
2.4.6 El centro cerebral del color o Area V4.....	87
2.4.7 Integración final de la información visual	92
2.4.8 Sistemas parvo y magnocelular y percepción cromática	95

Capítulo 3 *Organización perceptiva, contraste y asimilación* .. 99

1.1 Percepción visual	99
1.2 Breve Panorama de la Psicología de la Percepción Visual	104
1.3 Organización perceptiva y teoría de la Gestalt	112
3.3.1 Teoría de la Gestalt, orígenes y conceptos fundamentales	112
3.3.2 Modernas teorías acerca de la percepción de la Gestalt	119
3.3.3 La “aproximación ecológica de Gibson”	125
1.4 La percepción del contraste	128
3.4.1 Medidas fotométricas y percepción de luminosidad.....	129
3.4.2 Contraste de luminosidad	130
3.4.3 Frecuencia espacial del contraste.....	133
3.4.4 Contraste cromático.....	141
3.4.5 Efecto de asimilación, expansión o efecto Bezold	144

Capítulo 4	Metodología experimental.....	161
	4.1 Introducción	161
	4.2 Objetivos	162
	4.3 Metodología.....	163
	4.3.1 Sujetos.....	164
	4.3.2 Materiales.....	165
	4.4 Procedimiento.....	171
	4.5 Resultados	173
	4.6 Análisis de la varianza.....	196
Capítulo 5	Conclusiones	199
Bibliografía		203
Apéndice A		219
Apéndice B		241
Apéndice C		309

Prefacio

Con el trabajo de investigación a punto de culminar aparece algo lejano el día de 1997 en que en el 6º Congreso Nacional de Color que transcurría en la plácida localidad Jarandilla de la Vera , el profesor D. Mariano Aguilar se ofrecía a dirigirme la tesis sobre un tema en el que estaba trabajando en el Departamento de Restauración de la Facultad de Bellas Artes, dentro de la Universitat Politècnica de Valencia, el sorprendente y paradójico *efecto asimilación* o *efecto Bezold*. Dos años más tarde las conversaciones cuajaban en un proyecto de investigación para tesis doctoral con el título EL EFECTO EXPANSIÓN CON UNA RED CUADRADA ACROMÁTICA EN FUNCIÓN DE LA LUMINANCIA Y DEL TAMAÑO.

Como era más apropiado su desarrollo dentro del campo de la percepción, que en una Facultad de Bellas Artes, requerimos la colaboración del profesor D. José Luis Miralles, que impartía entre otras asignaturas la de Percepción. De esta manera efectué mi matrícula de Tercer Ciclo en dicho departamento en julio de 1999, dentro de la Facultat de Psicologia en el marco de la Universitat de Valencia.

En el año 2001 superaba el Diploma de Estudios Avanzados, lo que me otorgaba la Suficiencia Investigadora para emprender cualquier proyecto de

investigación. Esto no obstante, en paralelo a la obtención del diploma, se había hecho una fase preexperimental y realizado parte de la experimental, lo que fue muy eficaz a la hora de elegir los parámetros definitivos que tendríamos en cuenta para dicho trabajo de investigación.

Las dificultades fueron notables no tanto en el aspecto técnico, ya que el diseño y montaje de los optotipos era relativamente sencillo, sino en el humano, la gran dificultad de encontrar personas dispuestas a participar como observadores en un experimento de duración prolongada. Esto se resolvió “echando mano” por una parte de becarios (en dos de los casos) y por otra de la “colaboración desinteresada” de compañeros de trabajo, logrando el aceptable número de cinco observadores, que como se explica en otro momento se debió reducir posteriormente a tres.

Otros dos años después y con un bagaje de más de 30.000 estímulos consignados y procesados estadísticamente, presento con gran satisfacción por mi parte el resultado de este proyecto de investigación en el que debo reconocer la ayuda en distintos niveles cualitativos y cuantitativos de las personas que paso a citar a continuación.

Agradecimientos

Efectivamente debo en primer lugar mostrar mi gratitud a mis dos codirectores del proyecto de investigación, el Dr. Mariano Aguilar Rico y el Dr. José Luis Miralles Adell, por sus aportaciones conceptuales propias de su bagaje científico e investigador y por su encomiable paciencia en leer y corregir mis escritos parciales a lo largo de un período de tiempo tan dilatado.

A mis compañeros y amigos del Departament d'Òptica i Optometria:

La Dra. Guadalupe Götzens García que se prestó a ser observadora en la fase previa de investigación y que me facilitó toda la ayuda posible en la realización y disposición del laboratorio docente, ya que por esas fechas carecíamos de Laboratorio de Investigación. Asimismo por el soporte moral que me ha demostrado a lo largo de todo el proyecto.

Rosa M^a Borrás García y Juan Carlos Ondategui Parra, que también han seguido y me han animado en el proyecto a lo largo de estos casi seis años, incluyendo la colaboración de Juan Carlos como observador en la fase previa.

El Dr. Jaume Pujol Ramo, cuya ayuda ha sido decisiva en los aspectos de expresión gráfica de los datos. Además también por su apoyo moral y

desinteresado a lo largo de todo el proyecto.

A los dos becarios y observadores del proyecto de investigación en su totalidad:

Ana Isabel Megino Quesada y Joan Gómez Lara, por su paciencia y seriedad en la realización del proyecto para la obtención de los valiosísimos datos que asimismo procesaron en la etapa anterior a su procesamiento estadístico.

Asimismo a la auxiliar de laboratorio, M^a Carmen Blasi Ramírez, tercera y última de los observadores para la totalidad del proyecto por las mismas razones.

También quiero agradecer fuera del ámbito académico el interés y el apoyo mostrado por parte de mi familia más próxima, mis padres y mis hermanos, así como de las personas que muy cercanas a mí han soportado con infinita paciencia esta larga etapa en la que a menudo el ocio debía ser sacrificado en aras del deber, siendo completamente ajenas a esta obligación.

Introducción

1. Presentación

Uno de los fenómenos naturales que más interés ha suscitado en mí, como biólogo, es el proceso de la transducción en las sensaciones; la "magia" de ese delicado proceso que transforma tipos de energía tan diversos como las ondas electromagnéticas, la presión, o el micromovimiento molecular desordenado (calor), en un mismo código que es el impulso nervioso; y cómo después el cerebro, la estructura mejor organizada de nuestro universo conocido, transformaba este código en percepción.

Mi docencia en la Escuela Universitaria de Óptica y Optometría desde el año 1979, me llevó a profundizar de forma teórica en los aspectos anatómicos y neurofisiológicos concernientes específicamente a la percepción visual. Dentro de este campo, sentía verdadera fascinación tanto por el color en sí que manifiestan muchas especies de animales como librea sexual o como advertencia u ocultamiento, y de qué manera se origina desde parámetros físicos o químicos, como por los mecanismos biológicos de su percepción en los organismos que poseemos esa facultad. En este sentido desde hace años, y motivado por la pregunta de alguien en algún congreso relacionado con la visión, he leído y escrito

artículos divulgativos y pronunciado algunas conferencias acerca de cómo ven el color los diversos grupos de animales, sin desdeñar por supuesto mi especial interés por la percepción cromática humana.

Por otra parte, muchas de las propiedades perceptivas del color eran sumamente atractivas para mí. Por eso cuando el Profesor Aguilar (investigador de primera magnitud en el campo de la visión), se ofreció a dirigir mi tesis doctoral sobre un tema que en aquel momento acaparaba su atención, una de las propiedades menos conocidas y estudiadas, el “efecto expansión o Bezold”, también conocido como “asimilación”, me pareció un apasionante tema a investigar. Esta propiedad del color fue estudiada a finales del siglo XIX prácticamente en exclusiva por dos autores, Chevreul en primer lugar y Von Bezold de quien tomó el nombre. Como base teórica partíamos prácticamente de las exhaustivas investigaciones del primero citadas en artículos o capítulos de libros en reseñas breves, pero que afortunadamente para mí han sido reeditadas recientemente en el texto *The Principles of Harmony and Contrast of Colors and their applications to the arts*. Si bien la bibliografía sobre la asimilación en el color es escasa, sí se está investigando sobre un efecto derivado, el “efecto expansión de neón” con resultados interesantes por Paola Bressan y otros autores y del que hago una breve descripción en el capítulo 4.

Pero por mi formación de biólogo, tenía carencias en materia de Psicología y en su metodología, algo imprescindible para la investigación en percepción. Era necesario para tener un punto de vista más adecuado al fenómeno perceptivo la colaboración de alguien versado en esta materia, por lo que una vez elegido el tema propio a investigar solicitamos la codirección de la tesis al profesor José Luis Miralles, catedrático de Psicología Básica en la Universidad de Valencia, experto investigador en materia de percepción y que aceptó la propuesta rápida y desinteresadamente.

Así, gracias a las aportaciones complementarias de ambos, en aspectos psicofísicos por una parte (Profesor Aguilar) y perceptivos por la otra (Profesor Miralles), he podido desarrollar la investigación este interesante fenómeno del *efecto expansión* o *efecto Bezold* y he podido cuantificarlo para un color concreto.

El proyecto de investigación ha demostrado cómo varía el *efecto Bezold* (que tiene como campo de adaptación una red acromática de Ronchi), en función del tamaño del test, para un color, (rojo con λ dominante = 620nm y pureza de 0,56), y forma determinados (cuadrado de varios tamaños en función de la distancia) y también para un intervalo concreto de iluminación, hasta llegar a desaparecer.

2. Contenidos del trabajo de investigación

El trabajo de investigación ha sido organizado en cinco capítulos más un apéndice.

Capítulo 1. Psicofísica del color. Después de una breve introducción acerca de la naturaleza del color se desarrollan matemáticamente las ecuaciones psicofísicas que permiten objetivar la sensación cromática. Se destaca en primer término el concepto de *trivarianza*, es decir, el hecho de que para definir un color basta con proporcionar las variables de Tono, Pureza y Claridad. Continúa con la definición de los colores metámeros o colores perceptivamente iguales pero que se obtienen a partir de mezclas de luces físicamente diferentes, entre los que destacamos los colores complementarios, aquellos que sumados dan un metámero blanco. Una cuestión crucial es la síntesis tricromática tratada a continuación. Se describen en este apartado las funciones de igualación de color y las coordenadas cromáticas, con lo que cada tonalidad de color del espectro vendrá dada por las tres coordenadas x , y , z . Por fin se describen de manera sucinta las mezclas de

colores: aditivas y sustractivas. A partir de estos conceptos previos psicofísicos se podrá pasar a describir cómo nuestro sistema nervioso organiza las sensaciones cromáticas en sus diversos matices.

Capítulo 2. Neurobiología de la visión en color. Describe en cada estadio del sistema visual las bases anatómicas, fisiológicas y bioquímicas que nos procuran la sensación de color. Comienza con una introducción general de la cualidad cromática, el *tono*, a partir del recuerdo del experimento de Isaac Newton, seguido inmediatamente con las teorías fundamentales de la visión en color. A continuación se describen las bases bioquímicas de la visión en color: cómo se transforma la luz en impulso nervioso y las propiedades fisicoquímicas de los tres tipos de conos. Ligado a esto hay una breve descripción de la evolución de la visión en color basándose en las mutaciones de los genes que codifican los tipos de proteínas que hacen que sea diferente la absorción máxima de los tres tipos de conos. Por fin se describe en tres grandes apartados la neurofisiología de la visión en color. En primer lugar los tipos y organización de las células que codifican el color en la retina de primate, las células ganglionares. En segundo lugar cómo llevan a cabo este cometido las células del cuerpo geniculado lateral. Finalmente se tratará este aspecto neurofisiológico en el cerebro, pero detallando mucho más este proceso y aportando los conocimientos más recientes de la organización cerebral para la percepción cromática como son los trabajos de Hubel, Livingstone, y Zeki, principalmente, acerca de la localización de los agrupamientos celulares sensibles al color en V1, V2 y V4 con la confirmación de un auténtico *centro cerebral de color* en el cerebro humano por el equipo de Semir Zeki y sus colaboradores. Descritas estas bases neurobiológicas, se pasará al nivel siguiente o nivel perceptivo, desarrollado en el próximo capítulo.

Capítulo 3. Organización perceptiva. Contraste y asimilación. Son los aspectos perceptivos de la sensación cromática en general enfatizando aquellos relacionados

con el contraste y concretamente con el caso particular de la asimilación. A partir de una introducción general sobre la percepción visual seguida de una perspectiva histórica sobre las principales corrientes del estudio de la percepción, se expone todo un apartado acerca de la organización perceptiva y las aportaciones de la Teoría de la Gestalt a este concepto, ya que está en el trasfondo del fenómeno perceptivo de nuestro trabajo. Sigue un importante apartado sobre el fenómeno del contraste, relacionando el fenómeno psicofísico con los conceptos neurobiológicos descritos en el capítulo anterior. Dentro de este apartado se incluye el contraste cromático que basa su explicación tanto en los conceptos psicofísicos del capítulo 1 como en los neurobiológicos descritos en el capítulo 2. Como caso particular dentro del contraste cromático se trata el caso del contraste inverso o asimilación, denominado también efecto Bezold, fenómeno en el que se basa nuestro trabajo de investigación.

Capítulo 4. Metodología experimental. Se describen en este capítulo, el material empleado en la investigación, como son el luxómetro y el telecolorímetro, haciendo referencia a sus características y especificaciones. También se describen el color empleado y el fondo (red de Ronchi) así como el protocolo de experimentación haciendo referencia a la distancia a la que se sitúan los observadores y a la disposición del optotipo de la observación. Se hace asimismo referencia al número de observadores, descripción de los mismos, a los tipos de iluminación y la justificación de su elección, y finalmente al procedimiento para acrecentar la variable *tamaño* que tiene como consecuencia la desaparición del efecto Bezold.

Capítulo 5. Bibliografía. Contiene todos los libros de texto y las referencias bibliográficas de trabajos especializados, consultados a lo largo de la realización del trabajo de investigación. La gran mayoría aparecen citados en el texto y unos pocos de contenido conceptual muy general no han sido citados en el texto.

Apéndice. En él quedan reflejados los datos parciales, que no han sido relevantes a la hora de representar gráficamente los resultados o de los que no se ha podido extraer conclusiones directamente, sino después de ser procesados.

3. Breve reseña histórica de la investigación acerca del color

En las más remotas culturas: china, bizantina, eslava, sudafricana, maya, andina, etc., muy distintas entre sí y con rasgos peculiares muy propios, encontramos un factor común: la adoración al Sol (Fig. 1). El *Sol* en tanto en cuanto fuente de luz es un *dios*, reconociendo su necesaria presencia en los ciclos del agua (líquido- evaporación-lluvia) y en la purificación constante de nuestra atmósfera.



a



b

Figura 1. El culto al sol en las primeras civilizaciones. a) Conjunto megalítico de Stonehenge, Inglaterra (2800-1800 a. C.) (de Singh, 1993). b) Dosel del trono de Tutankhamon, XVIII, dinastía, (1500 a. C.) Museo Egipcio, El Cairo (de Sureda, 1986).

La cultura griega constituye la excepción, ya que no solo no concedió rango divino alguno al sol y la luz, sino que consideró bárbaras a las mitologías que los incluían, especialmente a la egipcia. Esta negación de la divinidad no significa no obstante que no mostrara interés por la luz. En el mundo grecorromano su importancia es tal que es prácticamente imposible encontrar filósofo alguno que no tercie en un intento de explicar el fenómeno de la visión, “explicar la luz”: Pitágoras, Euclides, Ptolomeo, Heráclito, Anaxágoras, etc. Según Bierwaltes, un erudito de la cultura clásica, “estar vivo era ver la luz del sol”.

Pero, ¿y el color?. Respecto al color existen innumerables pruebas de su importancia en el mundo antiguo. Sus templos, hogares e incluso sus tumbas, se adornan con colores que venciendo los embates del tiempo, aún causan admiración por su variedad y belleza. Así, las pinturas rupestres en las cuevas de Altamira, Santander (Fig. 2 a), la Valltorta en el Levante español (Fig. 2 b), Font de Gaume y Narsoulas en Francia, (período magdalenense, 14.000-10.000 a.C.).

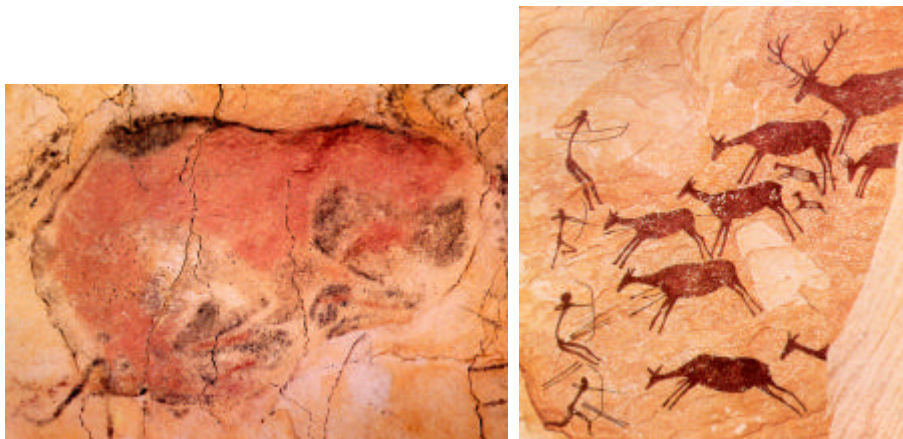


Figura 2. El color en el arte parietal prehistórico. a) Bisonte policromado, Cueva de Altamira, Santander. Paleolítico: Magdalenense medio (14000 a C.). b) Escena de caza en la Cova dels Cavalls, La Valltorta, Castellón de la Plana. Neolítico medio (5000 a C) (de Sureda, 1986).

Ya en el período histórico, son buena muestra de la utilización del color los restos que aún se conservan de la cultura Sumeria y Babilónica, las tumbas faraónicas de la sexta (2500 a. C.) y duodécima (1900 a. JC) dinastías egipcias, con sus inigualables azules (Fig. 3), que, en parte, todavía siguen conservando su secreto de producción; y los extraordinarios frescos de la Cultura Minoica (3.000 a 1.570 a. JC.), como por ejemplo de Triada Hagia en Creta (1^{er} periodo 1.900-1570 a. JC.) (Aguilar, 1994).

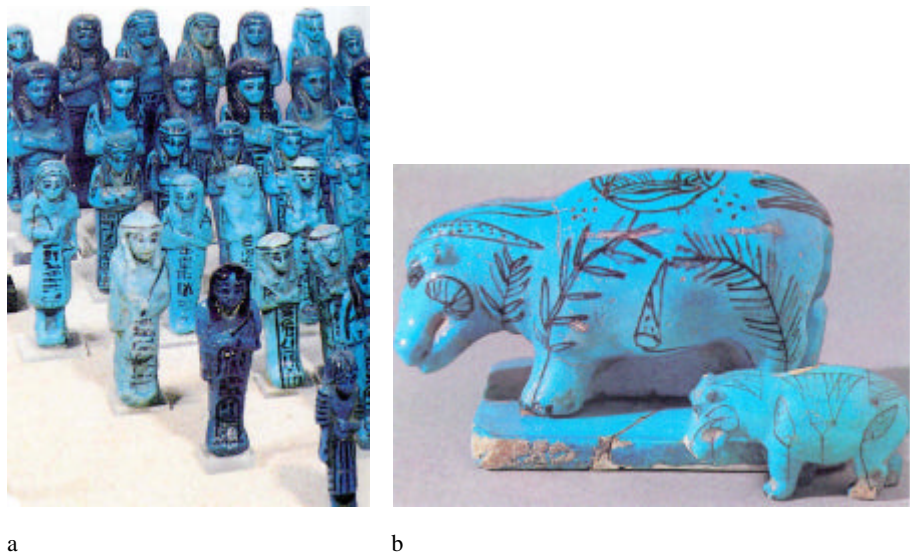


Figura 3. El azul en el arte egipcio primitivo. a) Hombres de reemplazo. b) Hipopótamo. Ambos fabricados en loza fina. Museo del Louvre, París (2000-1900 a C)(de Marie, 1995).

Paradójicamente esta exuberante presencia del color en cualquiera de las culturas primitivas, contrasta con una gran pobreza en el léxico. En las culturas antiguas el único vocabulario referente al color es el *blanco* y *negro* o incluso *claro* y *oscuro*, apareciendo en las más avanzadas, el *rojo* que parece ser por los objetos a que se aplicaba, incluye el *amarillo*, *naranja pardo* y *violeta*. Por ello no es sorprendente que Homero (siglo IX a.JC.) el primer poeta épico cuya obra se

conoce, en sus casi 30.000 versos de la *Ilíada* y la *Odisea*, no habla nada del azul y verde, un poco del rojo y mucho del blanco, negro, claro y oscuro. Esta pobreza en el lenguaje del color ha sido uno de los más importantes argumentos en la leyenda sobre la ceguera de Homero.

La contradicción entre riqueza pictórica y pobreza terminológica se debe en opinión de Aguilar (1996) a que en aquel tiempo en la belleza de un conjunto cromático, “el tono” tenía menos valor frente a lo que realmente fascinaba, “el brillo”, la cantidad de luz. Según este autor, “la belleza se medía en función de la claridad”. Probablemente, porque en aquel entonces no se podía “medir” el color, y dado que los griegos eran amantes de las proporciones, era condición indispensable dicha medida. La demostración de que el criterio de que los griegos minusvaloraban el color es falso, no llega hasta principios del siglo XIX en que arqueólogos de toda Europa van descubriendo que el cromatismo formaba parte de la arquitectura y escultura griega; idea reforzada con el descubrimiento en la segunda mitad del siglo XIX de los restos preclásicos de Micenas y Knossos (Fig. 4).



Figura 4. Escena de tauromaquia. Fresco del palacio de Knossos, Creta (2000 a C.)(de Barralt, 1987).

Aristóteles identifica, junto al blanco y negro, cinco colores intermedios puros: Blanco, amarillo, escarlata, violeta, verde, azul, negro (gris), formando una escala de siete colores, imitando la escala musical, que conocía bien, y que por analogía le proporcionaba el método de generar los colores intermedios, mediante proporciones numéricas. El resto de los colores son mezclas de los siete primarios (puros) de la escala. Los cinco colores básicos de Aristóteles son los “cinco colores estelares” en que Newton veinte siglos después descompone su *Arco Iris*. Según Aristóteles los colores no pueden estar contenidos en la luz, por ser más oscuros que ésta (pensamiento sostenido veinte siglos más tarde por Goëthe) pero para verlos necesitamos la luz, escribiendo textualmente: “El color es visible a la luz”.

La idea que tenemos actualmente del color, podemos decir que es el resultado de aglutinar los esquemas de tres grandes pensadores de los siglos XVII, XVIII y XIX (Aguilar, 1996):

ISAAC NEWTON	JOHANN GOËTHE	ARTHUR SCHOPENHAUER
1642-1727	1749-1830	1788-1860
Finales del S. XVII	Finales del S. XVII	Principios del S. XIX
Física del color	Percepción del color	Sensación del color

Para Newton el color está en los distintos rayos que componen el haz luminoso; ni siquiera está en la fuente luminosa que él considera incolora, sino en los rayos emitidos por aquella; y el color que vemos en los cuerpos no es porque estos lo hayan transformado con la refracción, reflexión, dispersión, etc..., los rayos siguen inalterables, los cuerpos se han limitado a absorber unas y difundir

más o menos otras, del conjunto difundido depende el color con que veremos los cuerpos. Según este científico todo el mérito está en lo que los artistas actuales llaman color-luz, o sea, el color ya existe en la radiación.

Esta idea hiere profundamente al filósofo Goethe fascinado por la luminosidad, para el que la luz blanca, el blanco, no es un conglomerado de colores sino una unidad pura, que al incidir en no importa que superficie, ésta lo destroza, lo oscurece más o menos (pensamiento que coincide con el de Aristóteles); de la calidad y envergadura del destrozo depende el color con que vemos los objetos. El color no existe en la luz que llega al objeto, siendo éste su verdadero creador, para este filósofo sólo existe lo que en el argot moderno se conoce con el nombre *color-superficie* (en mucha bibliografía se confunde con el color pigmento de los artistas) que no cabe duda tiene mucha más fuerza que el *color-luz*, como lo prueba la *constancia del color*: el percibir el mismo color en el objeto aunque cambie dentro de ciertos límites el espectro de la luz que lo ilumina.

Thomas Young entre 1802-1807, redujo los cinco colores básicos de Newton a tres. Proponía la existencia de tres tipos de sensores primarios que respondieran específicamente al *rojo*, *verde* y *azul*. Su hipótesis se basaba en que la mezcla apropiada de los tres colores primarios (azul, amarillo y rojo para pigmentos, o azul, rojo y verde para la luz) produciría la sensación de blanco, o bien cualquier otro de los colores que pudieran ser reconocidos por el ser humano. La confirmación la dio James Maxwell poco tiempo después. Von Helmholtz, en sus trabajos sobre visión (1856-1866) confirmó experimentalmente algunos de estos supuestos. Esta teoría es la llamada *teoría tricromática* o de Young-Maxwell-Helmholtz.

La *teoría de los procesos oponentes*, propuesta por Ewald Hering en 1878, se basa en la pureza psicológica de las sensaciones de *azul*, *amarillo*, *verde* y *rojo*. De

hecho Hering se había basado en una anterior concepción sobre luminosidad de Goethe el cual habría aportado el par blanco-negro a esta concepción. Estas cuatro sensaciones pueden ser subdivididas en dos pares de colores antagonistas o pares oponentes (*colores oponentes*) según: *amarillo/azul, verde/rojo*.

Schopenhauer, ya a mediados del siglo XIX, convencido del aspecto subjetivo de las sensaciones, al estudiar los colores por indicación de su maestro Goethe, va más allá que éste en su idea de la pureza del blanco y fiel a su pensamiento, coloca lo subjetivo por encima de lo objetivo. La luz llega a nuestro ojo sin ser aún color, siendo sólo energía; la que no produce reacción alguna en la retina, es la responsable de la visión del negro, la que actúa en su totalidad lo es del blanco, siendo el mayor o menor porcentaje de actuación lo que crea una u otra sensación de color. Para este autor las características de la imagen retiniana marcan el principio de la conversión de la energía exterior-luz- en la respuesta perceptual del color; idea de acorde con nuestros actuales conocimientos.

Partiendo de los colores de las postimágenes habla de colores complementarios entendiéndolos por tales, los que completan la acción de la radiación en la retina. Así, si el azul responde a un tercio de acción, su color complementario será el que actúa con el porcentaje $2/3$, que corresponde al anaranjado; su coexistencia (actuación total) dará como respuesta una sensación de blanco (acromaticidad). Con esta idea de complementariedad establece su conjunto de colores básicos (su espectro), en cuyos extremos está el blanco y el negro, y en el centro la pareja rojo-verde, casi igualados en cuanto a acción. Su estratificación en colores complementarios alcanzaría un gran éxito ciento cincuenta años más tarde, siendo el fundamento, desde una perspectiva sensorial, de la teoría de los colores opuestos de Hurvich y Jameson (1951).

En el ámbito de la Neurobiología, la idea de un espectro formado por colores

complementarios (colores que se anulan al coexistir) también ha sido confirmada en el siglo XX mediante las experiencias electrofisiológicas tanto en retina, como en cuerpo geniculado lateral y en corteza visual de los primates, de campos receptores con centro y periferia antagónicos, formados por los pares rojo-verde, amarillo-azul y blanco negro. Las técnicas que permitieron detectar respuestas individuales de las neuronas empezaron en los años treinta con los trabajos de Adrian (1932). En los años cuarenta y cincuenta muchos fisiólogos como Hartline y Granit, que obtuvieron el Premio Nobel en 1967 seguidos por Barlow y Kuffler en los sesenta, aplicaron estas técnicas a las neuronas del sistema visual. Estos trabajos fueron continuados entre otros por Hubel y Wiesel que también obtuvieron el Premio Nobel en 1981.

Los pioneros trabajos anatómicos de Schultze (1825-1874), pusieron de manifiesto la existencia de dos tipos de fotorreceptores en los vertebrados: los conos para la visión diurna y cromática y los bastones para la visión nocturna y acromática. Böll en 1876 observó que la retina de una rana, que guardada en una cámara oscura mostraba un color púrpura o magenta brillante, lo perdía al ser expuesta a la luz, quedando amarillo pálido y blanco al cabo del tiempo. El color púrpura reaparecía después de un tiempo en oscuridad. Kühne en 1879 fue el primero que aisló una sustancia fotosensible en la retina, localizándola en el segmento externo de los bastones.

George Wald de la Universidad de Harvard, recibió igualmente el Premio Nobel en 1968 por sus contribuciones a la fotoquímica de la visión entre los años 1935 a 1968, año en que se le otorgó el premio. La opsina, porción proteica de los fotorreceptores, es insensible a la luz. A ella se fija el *retinal 11-cis*, un derivado de la *vitamina A* o *retinol*. A la presencia de este *cromóforo* (cromóforo significa "que da color") se deben tanto los colores que manifiestan los fotorreceptores, como sus espectros de absorción.

Los tres diferentes fotopigmentos de los conos presentan diferencias de sensibilidad para longitudes de onda específicas. Marks y col. (1964) y Rushton y Weale (1964) determinaron qué longitudes de onda absorbía cada tipo de cono mediante una técnica denominada *espectrofotometría de reflexión* en humanos. Por otra parte, Mac Nichol y col. (1964) y Liebman (1972) utilizando conos aislados "in vivo" en preparaciones microscópicas, en peces y primates, y Bowmaker y Dartnall (1980) una sola vez en humanos, mediante técnicas de *microespectrofotometría*, confirmaron los resultados anteriores. Un tipo de cono absorbe la luz con un máximo próximo a los 420 (420-440) nanómetros (*sensible al azul*) o *conos S*. Otro, presenta su máximo de absorción a los 534 (530-535) nanómetros (*sensible al verde*) o *conos M*. Un tercero presenta su máximo de absorción a 564 (560-570) nanómetros, que corresponde al color amarillo. Pero debido a que absorbe más longitudes de onda del rojo que los otros conos, se le llama *sensible al rojo* o *conos L*.

En 1986, un grupo de biólogos moleculares en la Universidad de Stanford, liderados por Jeremy Nathans (1986), clonaron los genes que codificaban los tres fotopigmentos responsables de la visión en color humana. Lograron obtener la secuencia aminoacídica completa de las tres opsinas de los conos A partir de la similitud de las moléculas de opsina y mediante técnicas de hibridación de ADN, se ha demostrado que en los fotopigmentos de la retina humana, las opsinas de los fotopigmentos sensibles al rojo y verde son muy similares (cerca del 96% de los aminoácidos), y son relativamente diferentes de las opsinas del azul y de la escotopsina de los bastones (sólo existe un 41-43% de homología en su cadena aminoacídica) (Urtubia, 1997).

Gerald Jacobs, James Bowmaker, Chrysta Neumeyer y varios otros autores en los decenios de los ochenta y noventa del siglo pasado, demostraron que la mayoría de los mamíferos de hábitos diurnos son dicrómatas, con dos fotopigmentos en sus

conos, uno para la onda corta y otro para la onda media-larga. Estos autores postulan que los primates superiores (monos del Viejo Mundo) incluyendo la especie humana, son tricrómatas, debido a que hubo una duplicación del gen ancestral para la onda media-larga, hace unos treinta millones de años.

Gunnar Svaetchin en 1953 procuró la evidencia fisiológica de la teoría de los procesos oponentes al registrar los *potenciales S* en las células horizontales de la retina de teleósteos (que él creyó se debían a los conos). Kaneko (1970) atribuyó correctamente a estas células, las respuestas despolarizantes para un tipo de longitud de onda e hiperpolarizantes para otra. Tomita (1984) extendió las técnicas de registro intracelular individual a todas las células de la retina. Zrenner y Gouras, 1981 pusieron de manifiesto en la retina la existencia de las células ganglionares, *oponentes simples*, las cuales reciben entrada de señales de un sistema de conos en el centro y de otro u otros dos en la periferia. Las mismas respuestas a estímulos cromáticos se encuentran en el CGL, cuyas neuronas, de las capas 3 a 6 (parvocelulares), reciben entrada de señales de ganglionares P. De Valois, Abramov y Jacobs (1966), Wiesel y Hubel (1966) efectuaron varios estudios que esclarecieron la forma en que la información del color se codifica en el cuerpo geniculado lateral. Los estudios de Hubel y Livingstone (1983), (1988), pusieron de manifiesto grupos celulares que han sido denominados gotas, manchas o grumos que se extendían a lo largo de las capa II y III y más vagamente en las capas V y VI.

Gracias principalmente a los estudios de Zeki y su equipo se concibe la corteza visual como especializada funcionalmente: desde el área V2 surgen aferencias hacia otras áreas de la corteza de asociación, denominadas V3 y V3a, que para Zeki estarían encargadas del procesamiento de la forma y el área V5 o MT (medio temporal) lo haría del movimiento. Esta área recibiría aferencias de una zona de V2 denominada de bandas gruesas, en las cuales proyecta el sistema magnocelular.

Estas áreas serían insensibles a los estímulos cromáticos.

A finales de los setenta, mediante experimentos de ablación en los macacos de un área cerebral denominada V4, se situó en estos animales la zona última del procesamiento cromático. Estudios posteriores en los años ochenta por parte de Zeki y colaboradores (Zeki, 1980; Zeki y Shipp, 1988) mediante la utilización de tomografía de emisión de positrones (TEP) y situaron el procesamiento último del color en una zona equivalente en el ser humano. Se averiguó también en esos años que el tipo de procesamiento cromático cerebral era del tipo de codificación oponente doble. Por otra parte, y mediante optotipos que imitaban los cuadros del pintor noruego Pieter Mondrian, unos rectángulos de varios colores adosados unos a otros, Zeki confirmó las ideas de Land autor de la teoría “retinex” en el sentido de que nuestra percepción última del color no sólo depende de la lambda dominante que emita el objeto, sino que depende en una gran parte del entorno. Nuevos estudios de TEP y la aplicación de nuevas técnicas como la resonancia magnética funcional (fRM) y estudios en pacientes con acromatopsia cerebral desvelaron en gran parte en el decenio de los noventa la base neurobiológica de la percepción cromática en el ser humano que culmina con los trabajos de este equipo al final del milenio (Moutoussis y Zeki, 2000, Moutoussis y Zeki, 2002).

PARTE I

Fundamentos teóricos

CAPÍTULO 1

Psicofísica de la visión en color

1.1 El color

El color es, probablemente, la cualidad perceptiva más obvia que experimentamos los humanos y aquella con la que nos involucramos de una forma más activa. Tomamos decisiones sobre el color siempre que decidimos la ropa que vamos a llevar, decoramos una habitación, pintamos una casa o seleccionamos el color de un coche nuevo. Nos vemos afectados por el color cuando el propio de una habitación afecta a nuestro estado de ánimo, o cuando en una tienda el color del paquete nos motiva para comprar el producto que contiene. Podemos disfrutar del color de una pintura abstracta o de una puesta de sol, pero antes de tomar decisiones o sentirnos afectados por el color en la forma anteriormente descrita, debemos percibirlo.

El color enriquece nuestra experiencia visual y nos permite discernir objetos y patrones que, de otra manera, no podríamos ver. Para apreciar este

enriquecimiento sólo necesitamos comparar una fotografía en color con otra en blanco y negro de la misma escena (Fig. 1.1) En la imagen en blanco y negro (Fig 1.b), los detalles aparecen representados por las diferencias de luz y oscuridad. Los detalles son más fáciles de distinguir , pero la imagen carece de la riqueza y estructura global de la imagen a todo color.

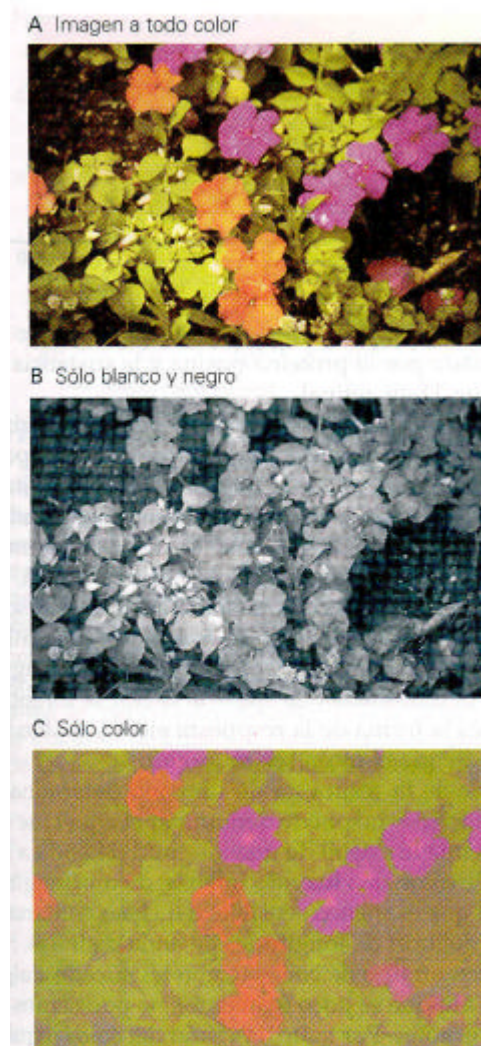


Figura 1.1 La visión del color enriquece la percepción visual pero no ayuda mucho a la detección del detalle espacial (adaptado de Gegenfurtner 2000, en Kandel, 2001).

La visión en color añade un elemento distintivo e importante a la simple percepción de la luminosidad. Fig. 1.1A: Una imagen normal a todo color contiene información sobre las variaciones de la luminosidad y el color. Fig. 1.1 B: Una imagen acromática capta las variaciones de luminosidad de la escena y se forma por la ponderación de la energía de la luz reflejada por la sensibilidad espectral global del ojo. En este tipo de imagen es fácil apreciar el detalle espacial. Fig. 1.1 C: No obstante, la visión en color es un mal sustituto de la visión de la luminosidad, lo que puede apreciarse al mirar una escena en la que se han eliminado las variaciones de luminosidad y dejado sólo las variaciones de color (Gegenfurtner, 2000). En esta situación, la definición de los objetos es escasa y la estructura de la escena resulta oscura (Fig. 1c). Para que las variaciones de color adquieran sentido necesitamos información sobre las variaciones de la luminosidad, y para comprender la visión de los colores debe ser considerada en el contexto más amplio de los objetos percibidos. Es decir, una imagen puramente cromática no contiene información sobre las variaciones de luminosidad de la escena y sólo contiene información sobre el tono y la saturación. En esta situación el detalle espacial es difícil de discernir.

En 1630, el filósofo Descartes atribuyó el color de los objetos al cambio experimentado en la luz cuando ésta difunde desde aquellos. Hasta entonces se creyó que la luz carecía de color, que éste pertenecía a los objetos y que la luz los hacía visibles. El moderno concepto de color sigue aquel punto de vista. El color, como la luz, es un concepto psicofísico que depende de la *energía radiante* (estímulo físico) y de las sensaciones visuales (respuesta psicológica). Por definición, el color comprende todos los aspectos de la luz excepto las variaciones en tiempo y espacio. Así, la distribución natural de luz y sombras sobre un césped no concierne al color de la luz. Del mismo modo, la llama de una vela tampoco produce cambio alguno en el color de la luz. Juan Carlos Sanz nos recuerda en este sentido que:

“El hecho de que sólo podamos detectar visualmente nuestro entorno “cuando hay luz” significa que nuestros ojos reaccionan a la incidencia que la energía radiante representa, y no a la materia. Podemos detectar los objetos en el espacio tocándolos y sentir sus diferentes cualidades hápticas, que no son sino un conjunto de interpretaciones sensoriales de la “corporeidad”. Ese conjunto perceptivo de peso, tridimensionalidad, temperatura, etc., sucede en nuestro cerebro aún en oscuridad. Por el contrario, la percepción del color o la de luminosidad sólo se manifiestan cuando nuestro sentido de la vista resulta estimulado fundamentalmente por la luz, y ésta no pertenece físicamente a los objetos (Sanz, 1993)”.

En el año 2001, la Commission Internationale de l'Eclairage (C.I.E.) definió el *color* como: “*Característica de la percepción visual que puede ser descrita por los atributos de Tono, Luminancia (o Claridad) y Colorido (Saturación o Cromo)*”.

La luz está formada por un conjunto de radiaciones monocromáticas que, al llegar al ojo, originan una sensación de color única, de acuerdo con la radiación monocromática de mayor intensidad (*longitud de onda dominante*), la suma de todas las intensidades monocromáticas (*luminosidad*) y la desviación en intensidad respecto al conjunto de radiaciones monocromáticas equienergéticas (*pureza*). Debe establecerse, no obstante, que el color de un determinado tipo de luz desde el punto de vista físico, y la sensación de color que pueda producir, son dos hechos diferentes. Físicamente, el color de un tipo de luz viene definido por su composición espectral, es decir, por las longitudes de onda y las intensidades de las radiaciones monocromáticas que la componen. Podemos afirmar que la variable más importante para definir un tono es el espectro del estímulo, no obstante, aunque varíe este espectro, si los demás parámetros permanecen constantes puede seguir viéndose el mismo color (metamerismo).

El sistema visual de la mayoría de los vertebrados detecta la longitud de onda difundida por los objetos de su campo visual y la analiza comparándola con las longitudes de onda del resto de las imágenes del entorno de estos objetos. Como resultado, se obtiene la percepción cromática, que no es, por lo tanto, una

propiedad intrínseca a los objetos, sino una elaboración subjetiva del sistema visual. En la retina depende de los conos, y es procesada posteriormente en el cuerpo geniculado lateral y en la corteza visual. Dos longitudes de onda podrán distinguirse si causan estimulaciones relativas diferentes de dos o más tipos de células receptoras. Esto puede conducir a diferentes pautas de actividad en las distintas células, y el cerebro puede interpretar estas pautas en términos de color.

1.2 Radiación y luz

Se entiende por *luz* a la respuesta que una determinada porción del espectro electromagnético provoca en el ser humano; a esta porción del espectro electromagnético se le denomina *espectro visible*. La radiación electromagnética puede describirse, considerando un modelo corpuscular, o un modelo ondulatorio. En el primer caso podemos considerar que la luz está compuesta por pequeñas partículas denominadas *fotones*, cuya masa en reposo es nula y que representan unidades o *cuantos de energía*. Considerada como una onda de energía, la radiación electromagnética puede caracterizarse según la *longitud de onda* λ (distancia entre ondas sucesivas), la *frecuencia* ν (número de ondas por segundo) y la *amplitud* (diferencia entre el valor mínimo y el máximo de una onda (Fig. 1.2).



Figura 1.2 Longitud de onda y amplitud de onda (de Bear y col., 1998).

El contenido energético de una radiación electromagnética es proporcional a su frecuencia. La composición física de la atmósfera terrestre determina que sólo la pueden atravesar las radiaciones que van desde los 300 a los 1.100 nm. de longitud de onda. Los cuantos de energía con longitudes de onda superior a 850 nm tienen una energía insuficiente para desencadenar las reacciones fotoquímicas. Las longitudes de onda inferiores a 300 nm tienen una energía muy elevada, y pueden producirlas de forma muy eficaz, pero debido a esa elevada energía provocan mutaciones nocivas en proteínas y ácidos nucleicos. El sistema visual de los animales en particular está pues, constreñido a funcionar con una gama espectral máxima entre los 300 y los 850 nm. Muchos animales aprovechan casi todo este rango espectral, como algunos peces teleósteos, quelonios entre los reptiles y gran parte de las aves diurnas. Otros como es el caso de los primates tienen el rango espectral eficaz algo más reducido, como es el caso de los primates (Urtubia, 1993; Urtubia, 1997 b; Garriga y Urtubia, 2002)). En concreto la especie humana, tiene su rango de visión entre los 380 y 780 nm aproximadamente (Fig. 1.3).

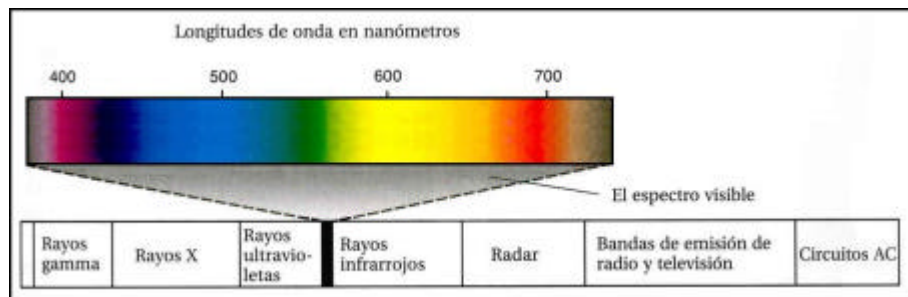


Figura 1.3. Espectro electromagnético y espectro visible (de Carlson, 2000).

Como demostró Newton, la combinación de determinadas longitudes de onda en distintas proporciones en el intervalo emitido por el sol da lugar a los colores que percibimos los seres humanos. Cada color tiene varias características de orden

psicofísico : *Tono*, atributo de una sensación visual por la que una determinada zona del campo visual (objeto), parece caracterizarse por uno de los siguientes colores: rojo, naranja, amarillo, verde, azul o violeta; o por diversas combinaciones de ellos. La variante física perteneciente a la energía radiante más directamente relacionada con el tono es la *longitud de onda*. *Saturación*, es el atributo de la percepción del color que marca el grado de diferencia respecto al blanco. La variable física más relacionada con la saturación es la *pureza*. *Cromaticidad*, es el atributo de la percepción cromática mezcla del tono y de la saturación. *Esplendor*, atributo de la percepción cromática que nos permite clasificar como equivalentes a algún miembro de la serie de colores acromáticos que van desde el muy oscuro al muy luminoso. La variable física más relacionada con este atributo psicológico es la *luminancia*. *Claridad*, es el atributo de la percepción del color que nos permite clasificar los colores como equivalentes a algún miembro en la serie de percepciones de colores de objetos acromáticos que van desde el blanco al negro en los cuerpos difusores y desde el claro o incoloro al negro u oscuro en los transparentes. La variable física más relacionada con la claridad es en los cuerpos difusores el *factor de reflexión difusa, b* , y en los transparentes el *factor de transparencia*. La claridad puede denominarse también *leucia*. *Brillo*, se refiere a las propiedades selectivas direccionalmente, responsables del grado con que debido a los reflejos especulares las imágenes de las fuentes pueden verse superpuestas sobre la superficie difusora o transmisora (Aguilar et al. 1995).

1.3 La trivarianza visual

En su excelente artículo, “*La visión del color: ¿Diversidad en la uniformidad? O ¿Uniformidad en la diversidad?*” Oscar Estévez (1995) plantea de nuevo una cuestión manifestada desde antiguo (Aristóteles, Newton...), el que la visión en color no sea exactamente la misma en todos los individuos catalogados como no

defectuosos para la percepción cromática. Cuando una persona ve una escena en color, supone automáticamente que los demás observadores perciben los mismos colores que ella. Como escribe Estévez:

"Esta suposición se basa en que la mayoría de mujeres y cerca del 92% de los varones aceptan las mezclas de colores o pinturas hechas por los otros. Al restante 8% de los hombres se les llama deficientes para la visión en color. Sin embargo, si estudiamos cuidadosamente estas mezclas, se puede demostrar que también entre los sujetos normales hay diferencias pequeñas pero consistentes. La uniformidad que aceptamos como normal es tan sólo el resultado de la tolerancia imbuída en el aparato visual humano y del hecho de que las diferencias entre la mayoría son muy pequeñas".

Salvando pues estas mínimas diferencias, puede afirmarse que las personas con visión del color normal pueden igualar el color de cada composición espectral de luz mediante la adecuada combinación de los tres colores primarios: azul, rojo, y verde. Esta propiedad del color llamada *univarianza* resulta de la síntesis neuronal que a partir de las absorciones máximas de los tres tipos de conos realiza nuestro cerebro. Los conos aislados no transmiten información acerca de la longitud de onda del estímulo luminoso. Cuando un cono absorbe un fotón, la respuesta eléctrica que genera es siempre la misma, sea cual sea la longitud de onda del fotón.

La *univarianza* fue establecida por Rushton ya en 1972, y ha sido confirmada fisiológicamente por Dennis Baylor y col. (1987), que midieron las respuestas eléctricas en conos de primates. De hecho, si bien la longitud de onda del fotón no se ajusta a la respuesta del cono, el número de fotones absorbidos por un cono varía con la longitud de onda, pero el mecanismo de fototransducción es igual en todos los casos. Las personas con un solo tipo de conos no tienen capacidad para

distinguir el color (*monocromatopsia*). La visión en color requiere al menos dos series de conos con diferentes sensibilidades espectrales. Un sistema *dicromático* o *divariante* puede detectar dos valores de brillo para cada objeto. Comparando estos dos brillos, el cerebro será capaz de distinguir colores. Un sistema divariante podría haber sido un primer paso en la evolución de la visión en color, sin embargo algunas combinaciones serían cromáticamente indistinguibles. Por ejemplo, un objeto que refleje luz en los dos extremos del espectro, situado sobre un fondo que lo haga en la mitad del espectro, será cromáticamente invisible, ya que tanto el objeto como el fondo producen la misma respuesta en los dos tipos de fotorreceptores. Este tipo de ambigüedades se reducen considerablemente mediante el sistema de tres fotorreceptores o *sistema trivariante*, si bien este sistema aún no elimina todas las ambigüedades.

La radiación visible, procedente de una superficie luminosa que incide en nuestros ojos está compuesta, generalmente, por gran cantidad de colores monocromáticos de muy variada intensidad. Debido a la complejidad de la radiación, parece lógico que para definir el color que percibimos de un objeto necesitamos conocer las múltiples variables referentes a las diferentes longitudes de onda, componentes de la misma con sus correspondientes niveles de intensidad. Sin embargo, tres números no bastan para indicar con toda precisión el color que estamos viendo. Esta asombrosa reducción de las variables necesarias para especificar cualquier color, se conoce con el nombre de *trivariancia visual*. La trivariancia de la percepción visual es un fenómeno plenamente demostrado, basado en gran cantidad de experimentos de la más variada índole, aunque teniendo siempre presente que para su cumplimiento hay que aceptar las siguientes restricciones:

Nivel fotópico: En rigor no percibimos el color hasta que la luminancia con la que vemos el objeto iguale o sobrepase las 10 cd/m^2 , para la cual todos los conos son sensibles a la radiación luminosa y la respuesta de los bastones es muy pequeña,

por lo que este valor marca el principio del *nivel fotópico*. Pero según Aguilar (1996), “la visión exclusiva de conos no tiene lugar hasta que los bastones han alcanzado su saturación completa” (Aguilar y Stiles, 1954). El *fenómeno de Bezold-Brücke* (corrimiento del tono percibido para una radiación de λ constante al pasar de las 10 a las 100 cd/m^2) parece confirmar la opinión de que la constancia en la respuesta visual respecto del color sólo se alcanza una vez que los bastones están saturados. Por otra parte, en el marco del nivel fotópico de visión del color, ésta empieza a experimentar irregularidades a partir de unas 10.000 cd/m^2 en que ya se dejan sentir los efectos del deslumbramiento incómodo”.

Visión central con un campo de 2° a 3°@10°. Visión foveal no es sinónimo de *visión central*, ya que aunque en ambos casos el conjugado del punto de fijación es la foveola, en la visión foveal la imagen retiniana no sobrepasa su tamaño (un grado) exigencia que no se cumple en la visión central. La relación de conos a bastones varía a lo largo de la retina, pasando de ser infinita (carencia de bastones) en la foveola (aproximadamente un grado de diámetro angular en la superficie retiniana) a ser prácticamente nula a partir de los 40° o 50° extrafoveales en que somos ciegos al color. Las tres variables (coordenadas cromáticas) que definen un color, se obtuvieron en principio experimentalmente (1931), con la curva de visibilidad de un observador patrón, visión central y test que subtendía un ángulo visual de 2 a 3°. La práctica demostró que estas tres variables no satisfacían con precisión las leyes de la colorimetría en las superficies corrientes de nuestro entorno que casi siempre subtenden un diámetro angular superior a los 2° o 3° por lo que en 1964 se definieron tres nuevas coordenadas cromáticas obtenidas experimentalmente con test de 10° de diámetro, comprobándose que estas nuevas variables eran válidas al aplicarlas a test superiores a dicho tamaño.

Eliminación del efecto perceptor. El estudio de un color debe hacerse aislándolo del objeto en que está la superficie difusora (*color apertura* o *color film*); de otro

modo (*color superficie* o *color objeto*) el conocimiento del objeto puede influir en el resultado de las medidas. Se puede obtener un color apertura observando la superficie a través de un orificio circular de 2° a 3° de diámetro practicado en una cartulina gris; al obturar las formas circundantes conseguimos ver una superficie sin conexión con el objeto a que pertenece. Se prefiere el gris, al blanco o negro, para que haya una mayor igualación luminosa entre la superficie a observar y el campo circundante.

Evitar los contrastes espacial y temporal. Es un hecho conocido que se enmarca dentro de la psicología de la visión cromática que el color de la superficie que envuelve otra de pequeñas dimensiones, enmascara el color de esta última, superponiéndole con pequeña intensidad, bien su color (*efecto de asimilación* o *efecto Bezold*), bien su complementario (*contraste cromático simultáneo y sucesivo*), dependiendo de los colores en juego y de la forma de los límites de separación. La explicación de estos fenómenos será tratada en el capítulo 4.

Observador con visión cromática normal. Como ya se ha comentado, (1.3) se dice que un observador tiene visión cromática anormal si el número de colores que percibe es muy inferior al percibido por la mayoría de las personas, o dicho de otro modo, confunde colores que el resto de las personas diferencia perfectamente (*visión defectiva del color*). El 2% de todos los varones son protanopes o deuteranopes, y el 6% son tricrómatas anómalos en los que el fotorpigmento para el rojo o verde muestran alteraciones en su sensibilidad espectral. Por tanto, aproximadamente el 8% de los varones muestran deficiencias para el rojo o para el verde. Como las células femeninas tienen 2 cromosomas X, y el alelo mutante es recesivo, las mujeres sólo mostrarán el defecto cuando ambos cromosomas X contengan el gen anormal ($1/250 = 0,4\%$) (Hita, 1985).

1.4 Colores metámeros.

Con cuatro fuentes luminosas y una pantalla difusora perfecta, (que difunda por igual todas las radiaciones), podemos conseguir mediante un dispositivo adecuado, que las dos primeras, S_1 y S_2 , iluminen la mitad de la pantalla (Fig. 1.4) y las otras dos la otra mitad. Regulando convenientemente sus intensidades luminosas lograremos que la sumas de las luminancias que emergen de cada una de las mitades sean iguales.

Esta igualdad de iluminación se representa por la *ecuación fotométrica* (1,1)

$$L_1 + L_2 = L_3 + L_4 \quad (1,1)$$

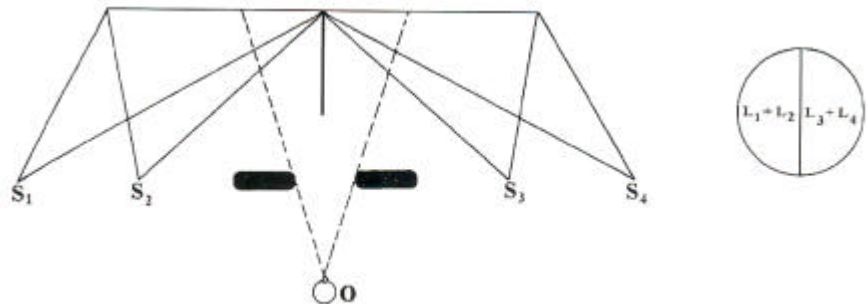


Figura 1.4 Dispositivo de igualación de colores. A la derecha espectro del campo visto desde O (de Aguilar, 1996).

Los cuatro sumandos de (1,1) pueden sustituirse por un número indefinido, ya que la igualdad fotométrica goza de todas las propiedades de las igualdades algebraicas (asociativa, multiplicativa y distributiva).

Si las fuentes no tienen el mismo color (distinta composición espectral de la curva de emisión) el color de la mitad de la pantalla iluminada por S_1 y S_2 será distinto,

según se ilumine por cada fuente independiente (L_1 o L_2) o por ambas a la vez ($L_1 + L_2$). Este color, resultado de superponer en la pantalla, la iluminación producida por dos o más fuentes, se llama *color mezcla*, y la técnica de obtener un color por la superposición de varios procedentes de distintas fuentes, *mezcla de colores*. Puede ocurrir que a pesar de que L_1 y L_2 distintos a L_3 y L_4 el color resultante de $L_1 + L_2$ sea igual al $L_3 + L_4$; en este caso la *ecuación fotométrica* (1,1) se transforma en la *ecuación cromática* (1,2):

$$L_1 + L_2 \equiv L_3 + L_4 \quad (1,2)$$

donde se ha sustituido el símbolo algebraico de igualdad por el de identidad.

Los colores mezcla ($L_1 + L_2$ y $L_3 + L_4$) iguales entre sí, pero con sus sumandos diferentes son los *colores metámeros*. Si al sumar L_1 con L_2 y L_3 con L_4 es igual no sólo el color resultante sino también las curvas espectrales, los colores $L_1 + L_2$ y $L_3 + L_4$ se llaman *colores isómeros*. Un corolario del metamerismo es que el cerebro humano (a diferencia de lo que sucede con los sonidos) es incapaz de distinguir los colores que componen la mezcla.

Grassmann comprobó en 1853 que las ecuaciones cromáticas gozan de las mismas propiedades que las identidades algebraicas, propiedades conocidas en colorimetría como leyes de Grassmann, de suma importancia en los conceptos básicos de la trivariancia visual. Las leyes de Grassmann pueden definirse como: “El conjunto de propiedades de las ecuaciones algebraicas aplicadas a las ecuaciones colorimétricas” (Aguilar, 1996).

Propiedad aditiva o asociativa. Una ecuación cromática conserva sus propiedades aunque:

- a) Se sume un mismo color a ambos términos.
- b) Se sume término a término con otra ecuación cromática.
- c) Se sustituyan dos o más de sus componentes, por su mezcla.

Propiedad conmutativa. Se puede trasladar un término de un miembro a otro partiendo de:

$$L_1 + L_2 + L_3 = L_4 + L_5 + L_6 + L_7 \quad (1,3)$$

Se cumple:

$$L_1 + L_2 + L_3 - L_7 \equiv L_4 + L_5 + L_6 \quad (1,4)$$

como realidad física, el signo menos de L_7 en (1,4) significa que el color representado por él está añadido a los colores $L_4 + L_5$ y L_6 en la pantalla correspondiente.

Propiedad multiplicativa. Si multiplicamos los dos términos de (1,3) por un número M se sigue manteniendo el metamerismo. Al aplicar esta propiedad no hay que olvidar que el nuevo valor debe mantenerse en el nivel fotópico y lejos del deslumbramiento

1.5 Colores complementarios

Aunque aceptada universalmente la definición de “Colores complementarios son los que sumados dan un metámero blanco”, Aguilar (1996) propone sustituirla por: “Colores complementarios son los que sumados dan un metámero de un estímulo acromático”, entendiéndose por acromático los tonos grises (neutros). Con un

estímulo monocromático de longitud de onda inferior a 492 nm, siempre encontramos otro de longitud de onda superior a 567 nm que mezclado en una proporción dada con el primero da un color metámero con el blanco.

$$L_1 + L_2 = L_w \quad (1,5)$$

Estos dos colores se llaman colores complementarios respecto el blanco w. Existen distintos estímulos heterocromáticos que son percibidos como blancos, admitidos por la CIE como *blancos patrón*. Siempre que se habla de colores complementarios debe especificarse respecto a qué blanco.

Los estímulos con longitud de onda comprendida entre 492 y 567 nm tienen que superponerse a un púrpura para formar blanco. Los púrpuras son los complementarios de las radiaciones centrales del espectro, propiedad que sirve para su nominación: al referirnos a un púrpura determinado le asignaremos la amplitud de onda de su complementario. Por ejemplo, al decir un púrpura de $\lambda = 510$ nm nos referimos al púrpura complementario del verde que tiene $\lambda = 510$ nm (previamente habremos fijado el blanco).

Si las luminancias de los complementarios no están en la proporción conveniente, definida por (1,5), por ejemplo si se añade a L_1 una luminancia excesiva $L_2 + L_2'$, se obtiene una mezcla metámera con la suma del blanco y el exceso de L_2 .

$$L_1 + (L_2 + L_2') \equiv L_w + L_2' \quad (1,6)$$

Por lo tanto la mezcla de complementarios en cualquier proporción da siempre el color en exceso pero lavado de blanco. Dos colores cuya mezcla es isómera de un blanco de referencia se llaman *complementarios físicos* de dicho blanco.

1.6 Ley fundamental. Pureza colorimétrica

El estímulo suma de dos radiaciones monocromáticas es metámero con la suma de un blanco de referencia con una radiación pura (monocromática o púrpura) convenientemente elegida.

$$L_1 + L_2 \equiv L_w + L_\lambda \quad (1,7)$$

La longitud de onda λ se llama longitud de onda dominante de la mezcla $L_1 + L_2$; está situada entre las λ_1, λ_2 , de los componentes de la mezcla, si éstos están más cerca entre sí en el espectro, que los complementarios; y fuera del intervalo $\lambda_1-\lambda_2$, (pudiendo ser un púrpura) en caso contrario. La longitud de onda dominante depende del blanco de referencia. Como L_λ es un color distinto al L_1 o L_2 , en colorimetría se dice que la suma disminuye el color de los sumandos pudiendo incluso llegar a anularlos (colores complementarios) a diferencia de la luminancia que siempre es mayor en la suma que en los componentes.

La ecuación (1,7) se sigue aplicando en el caso de que L_1 o L_2 sean un púrpura; podemos decir que la ley fundamental (1,7) se aplica en los colores puros en general. Sumando un nuevo estímulo espectral a (1,7)

$$L_1 + L_2 + L_3 \equiv L_w + (L_\lambda + L_3) \equiv L_w + (L_w' + L_\lambda') \quad (1,8)$$

Generalizando,

$$L_s \equiv L_w + L_\lambda \quad (1,9)$$

en donde, L_s representa la luminancia de un estímulo luminoso heterocromático cualquiera.

De la ley fundamental se deduce que un estímulo cualquiera es metámero con la suma de un blanco y un color puro (monocromático o púrpura) lo que explica que para un sujeto que nunca ha visto una radiación monocromática, ésta le parece simplemente más viva que los colores de los objetos naturales. La ecuación (1,9) es la primera representación analítica de la trivariancia visual, pues las muchas variables del primer término (luminancias y longitudes de onda), se sustituyen por las tres del segundo, (luminancia del blanco, longitud de onda dominante y su luminancia). La trivariancia visual es un hecho experimental puesto de manifiesto a mitad del siglo XIX por Helmholtz y Maxwell.

Se llama *pureza colorimétrica* al valor definido por

$$P_c = L_\lambda / L_s \quad (1,10)$$

que tiene valor 0 para un blanco y 1 para un estímulo monocromático.

La trivariancia visual permite pues definir completamente el aspecto de un color mediante una variable luminosa L y dos cromáticas, la longitud de onda dominante λ y la pureza colorimétrica.

1.7 Síntesis tricromática. Diagramas RGB

De la trivariancia visual se puede deducir que es necesario mezclar tres colores para reproducir cualquier otro. Naturalmente, la mezcla debe hacerse en una proporción adecuada de los tres colores, y los tres números que expresan la proporción de mezcla deberán servir para caracterizar el color reproducido (Artigas et al 1995). A partir de esta simple idea, se desarrollará un sistema de coordenadas en el que cada color real (tanto monocromático como de espectro continuo)

vendrá definido por tres números.

Unidades tricromáticas. Elijamos un blanco de referencia, por ejemplo, la *fente equienergética*. Aunque por costumbre se suele utilizar el término "blanco", debería en rigor decirse "acromático", ya que, en realidad, los términos blanco, gris claro, gris oscuro o negro sólo hacen referencia a la claridad, que está asociada a la luminancia pero no a la composición espectral. Elijamos tres estímulos, preferiblemente espectrales (no necesariamente), a los que nos referiremos como primarios. Aunque esta elección es en principio arbitraria, parece lógico escoger un color de un extremo del espectro (violeta o azul), uno del centro (verde) y uno del otro extremo (rojo). Por consiguiente, los representamos por λ_R , λ_G y λ_B . En el sistema CIE (1931) se toman como primarios el 435,8 nm (violeta), el 546,1 (verde) y el 700 (rojo), los dos primeros extraídos de una lámpara de vapor de Hg de alta presión.

Para saber qué flujo de cada uno de ellos habrá que mezclar para "igualar" (esto es, obtener un metámero) un flujo F_w del blanco, se efectuará el experimento con los primarios anteriores, y se obtiene que la proporción de igualación (normalizando a la unidad para el rojo) es de 1:4,5907:0,0601, de manera que la suma de los tres flujos debe dar F_w . Si definimos las cantidades anteriores como unidades (a las que llamaremos *unidades tricromáticas* y representaremos por L_R , L_G , L_B) el blanco quedaría definido por los números 1:1:1, donde el 1 representa dichas cantidades para el rojo, el verde y el azul, respectivamente.

Funciones de igualación de color y coordenadas cromáticas. Consideremos ahora la igualación de un color espectral cualquiera λ de energía unidad (definida por una cantidad arbitraria E_o). Realizando el experimento, podremos encontrar los flujos de igualación correspondientes, en lúmenes, que demostraremos por F_R , F_G , F_B , de manera que:

$$F_{\lambda} = F_{R\lambda} + F_{G\lambda} + F_{B\lambda} \quad (1,11)$$

donde F_{λ} es el flujo luminoso que corresponde a la energía E_o , esto es, $k_m E_o V_{\lambda}$ lumens.

Si repetimos la operación para cada λ del espectro, siempre para la misma energía (espectro equienergético), habrá una terna de flujos $F_{R\lambda}$, $F_{G\lambda}$ Y $F_{B\lambda}$ asociada con cada longitud de onda. Si dividimos $F_{R\lambda}$, $F_{G\lambda}$ Y $F_{B\lambda}$ por las unidades tricromáticas determinadas previamente obtendremos una nueva terna de números asociada con cada λ que denotaremos por \bar{r}_{λ} , \bar{g}_{λ} , \bar{b}_{λ} . Entonces:

$$(1,12)$$

$$\begin{aligned} r_{\lambda} &= F_{R\lambda}/L_R \\ g_{\lambda} &= F_{G\lambda}/L_G \\ b_{\lambda} &= F_{B\lambda}/L_B \end{aligned}$$

Así pues, se obtienen tres funciones de λ que expresan las cantidades de los tres primarios escogidos, necesarias para igualar una cantidad constante de energía (E_o) de cada λ . Tales funciones se conocen *como funciones de igualación de color* (también *funciones de mezcla*) y constituyen un *patrón colorimétrico*.

Pero, si se modifica el valor de E_o , los tres flujos medidos cambian en términos absolutos, aunque, de acuerdo con las leyes de Grassmann, se mantiene la proporción entre ellos. Así pues, si queremos que las funciones de igualación representen la proporción entre dichas cantidades, independientes de E_o , habrá que normalizarlas imponiendo alguna condición. En el observador patrón CIE 1931 (tabla 1.1 Fig 1-5) se establece:

$$V_{\lambda} \text{ (lumens)} = L_R \bar{r}_{\lambda} + L_G \bar{g}_{\lambda} + L_B \bar{b}_{\lambda} \quad (1,13)$$

de manera que la curva de visibilidad V_λ resulta ser una combinación lineal de las funciones de igualación del color. Con la condición dada por la igualación anterior, r_λ , \bar{g}_λ y \bar{b}_λ representan directamente las cantidades para la igualación de λ con energía $E_o = 1/k_m$.

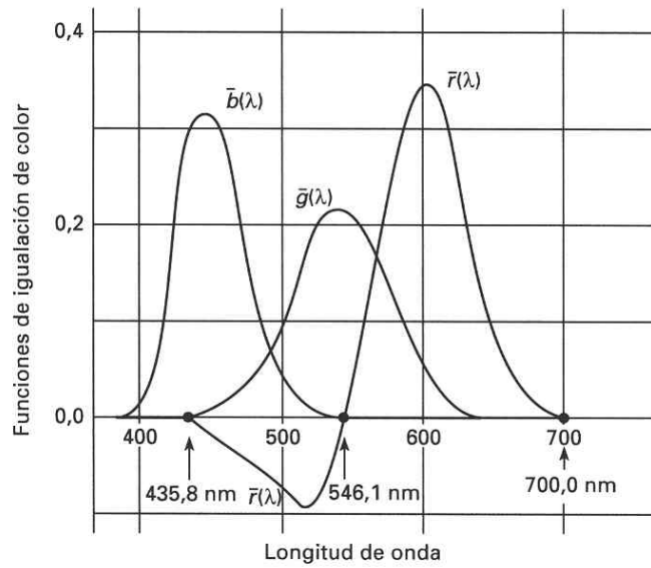


Figura 1.5. Funciones de igualación de color (CIE, 1931) (de Wyszecki, G. y Stiles, W.S., (1982) en Artigas et al 1995).

Se definirán seguidamente las siguientes cantidades, que denominaremos *coordenadas cromáticas*:

(1,14)

$$\begin{aligned} r_\lambda &= \bar{r}_\lambda / \bar{r}_\lambda + \bar{g}_\lambda + \bar{b}_\lambda \\ g_\lambda &= \bar{g}_\lambda / \bar{r}_\lambda + \bar{g}_\lambda + \bar{b}_\lambda \\ b_\lambda &= \bar{b}_\lambda / \bar{r}_\lambda + \bar{g}_\lambda + \bar{b}_\lambda \end{aligned}$$

TABLA 6-1

Observador Patrón CIE (1931). Funciones de igualación de color y coordenadas cromáticas

λ (nm)	\bar{r}_λ	\bar{g}_λ	\bar{b}_λ	r_λ	g_λ	b_λ	λ (nm)
380	0,0000	-0,0000	0,0012	0,0272	-0,0115	0,9843	380
390	0,0001	-0,0000	0,0036	0,0263	-0,0114	0,9851	390
400	0,0003	-0,0001	0,0121	0,0247	-0,0112	0,9865	400
410	0,0008	-0,0004	0,0371	0,0225	-0,0109	0,9884	410
420	0,0021	-0,0011	0,1154	0,0181	-0,0094	0,9913	420
430	0,0022	-0,0012	0,2477	0,0088	-0,0048	0,9960	430
440	-0,0026	0,0015	0,3123	-0,0084	0,0048	1,0036	440
450	-0,0121	0,0068	0,3167	-0,0390	0,0218	1,0172	450
460	-0,0261	0,0148	0,2982	-0,0909	0,0517	1,0392	460
470	-0,0393	0,0254	0,2299	-0,1821	0,1175	1,0646	470
480	-0,0494	0,0391	0,1449	-0,3667	0,2906	1,0761	480
490	-0,0581	0,0569	0,0826	-0,7150	0,6996	1,0154	490
500	-0,0717	0,0854	0,0478	-1,1685	1,3905	0,7780	500
510	-0,0890	0,1286	0,0270	-1,3371	1,9318	0,4053	510
520	-0,0926	0,1747	0,0122	-0,9830	1,8534	0,1296	520
530	-0,0710	0,2032	0,0055	-0,5159	1,4761	0,0398	530
540	-0,0315	0,2147	0,0015	-0,1707	1,1628	0,0079	540
550	0,0228	0,2118	-0,0006	-0,0974	0,9051	-0,0025	550
560	0,0906	0,1970	-0,0013	-0,3164	0,6881	-0,0043	560
570	0,1677	0,1709	-0,0013	-0,4973	0,5067	-0,0040	570
580	0,2453	0,1361	-0,0011	-0,6449	0,3579	-0,0028	580
590	0,3093	0,0975	-0,0008	-0,7617	0,2402	-0,0019	590
600	0,3443	0,0626	-0,0005	-0,8473	0,1597	-0,0012	600
610	0,3597	0,0356	-0,0003	-0,9059	0,0949	-0,0008	610
620	0,3571	0,0183	-0,0001	-0,9425	0,0590	-0,0005	620
630	0,2268	0,0083	-0,0001	-0,9649	0,0354	-0,0003	630
640	0,1597	0,0033	-0,0000	-0,9797	0,0203	-0,0002	640
650	0,1017	0,0012		-0,9888	0,0112	-0,0001	650
660	0,0593	0,0004		-0,9940	0,0061	-0,0001	660
670	0,0315	0,0001		-0,9966	0,0035	-0,0001	670
680	0,0169	0,0000		-0,9984	0,0016	-0,0000	680
690	0,0082			-0,9996	0,0004		690
700	0,0041			-1,0000	0,0000		700
710	0,0021			-1,0000			710
720	0,0010			-1,0000			720
730	0,0005			-1,0000			730
740	0,0002			-1,0000			740
750	0,0001			-1,0000			750
760	0,0001			-1,0000			760
770	0,0000			-1,0000			770

o lo que es lo mismo:

$$\begin{aligned}
 r_\lambda &= r_\lambda (\bar{r}_\lambda + \bar{g}_\lambda + \bar{b}_\lambda) = r_\lambda S(\lambda) \\
 g_\lambda &= g_\lambda (\bar{r}_\lambda + \bar{g}_\lambda + \bar{b}_\lambda) = g_\lambda S(\lambda) \\
 b_\lambda &= b_\lambda (\bar{r}_\lambda + \bar{g}_\lambda + \bar{b}_\lambda) = b_\lambda S(\lambda)
 \end{aligned}
 \tag{1,15}$$

donde se ha representado $\bar{r}_\lambda + \bar{g}_\lambda + \bar{b}_\lambda$ para abreviar por $S(\lambda)$. Sustituyendo (1,15) en (1,13) se obtiene:

$$V_\lambda = S(\lambda) [L_R r_\lambda + L_G g_\lambda + L_B b_\lambda]
 \tag{1,16}$$

de donde despejando $S(\lambda)$ y sustituyendo de nuevo en (1,15) se obtiene finalmente:

$$\begin{aligned}
 S(\lambda) &= V_\lambda / [L_R r_\lambda + L_G g_\lambda + L_B b_\lambda] \\
 \bar{r}_\lambda &= r_\lambda V_\lambda / [L_R r_\lambda + L_G g_\lambda + L_B b_\lambda] = r_\lambda V_\lambda / L_\lambda \\
 \bar{g}_\lambda &= g_\lambda V_\lambda / [L_R r_\lambda + L_G g_\lambda + L_B b_\lambda] = g_\lambda V_\lambda / L_\lambda \\
 \bar{b}_\lambda &= b_\lambda V_\lambda / [L_R r_\lambda + L_G g_\lambda + L_B b_\lambda] = b_\lambda V_\lambda / L_\lambda
 \end{aligned}
 \tag{1,17}$$

Puede comprobarse fácilmente que la combinación lineal $L_R r_\lambda + L_G g_\lambda + L_B b_\lambda$ tiene el sentido de una unidad tricromática resultante para λ , esta razón se ha representado por L_λ .

Si se iguala una cantidad de energía cualquiera de una cierta λ , la terna de números obtenidos (F_R/L_R , F_G/L_G , F_B/L_B) será proporcional a la que se obtuvo en la igualación de la unidad de energía, pero el flujo total será el que corresponda a la energía añadida para igualar. No obstante, si a partir de los tres números obtenidos de la igualación se calculan las coordenadas cromáticas mediante (1,14) y sustituimos en (1,18), obtendremos tres nuevos números que estarán en la misma proporción que los obtenidos directamente, pero ahora el flujo total corresponderá a la unidad de energía, dado que las ecuaciones (1,18) se derivan de (1,13), que no era más que la condición de igualación por unidad de energía.

Si se representan en un plano de coordenadas r , g de cada λ , (tabla 1-1) se obtiene una curva (Fig. 1.6) sobre la que se sitúan los colores espectrales. Los primarios λ_R , λ_G y λ_B se sitúan en los vértices del triángulo de coordenadas (1,0,0), (0,1,0) y (0,0,1). A la línea recta que une los extremos del espectro cerrando el locus se la denomina *recta de los púrpuras*. Este sistema de representación de coordenadas recibe el nombre de *diagrama cromático*.

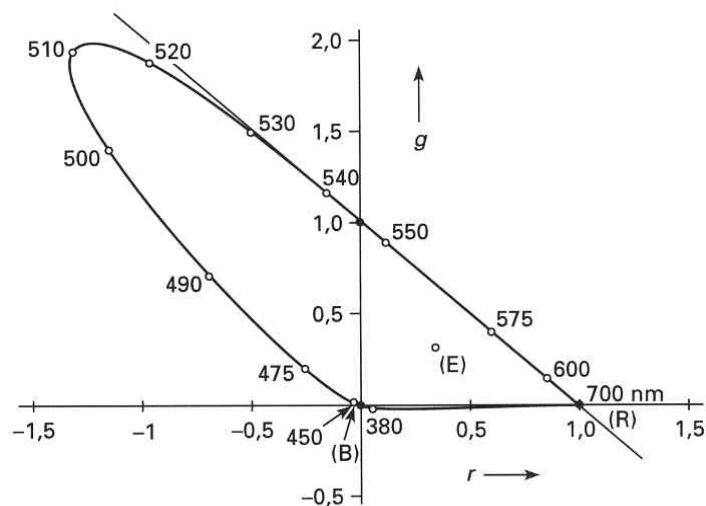


Figura 1.6. Diagrama cromático RGB (CIE 1931). (de Wyszecki, G. y Stiles, W.S., 1982 en Artigas et al 1995).

Valores triestímulo. Repitamos el proceso de síntesis tricromática para un color cualquiera de espectro continuo $\{E_\lambda d\lambda\}$. Si realizamos la igualación mediante los tres primarios habituales obtendremos los tres flujos necesarios, de manera que si el color que igualamos tiene un flujo F se cumplirá como siempre

(1,19)

$$F = F_R + F_G + F_B$$

Si ahora dividimos F_R , F_G Y F_B por las unidades tricromáticas respectivas obtendremos finalmente una terna de números que representaremos por

(1,20)

$$R = F_R/L_R$$

$$G = F_G/L_G$$

$$B = F_B/L_B$$

Estas cantidades se denominan *valores triestímulo* y representan para un color cualquiera lo mismo que las funciones de igualación de color para un color espectral, esto es, la proporción de igualación. No obstante esto no significa que sea necesario realizar una igualación experimental para cada color a fin asignarle sus valores triestímulo (Artigas y col., 1995).

Veamos a continuación como pueden calcularse analíticamente estos valores para un color cualquiera dado por un espectro $\{E_\lambda d\lambda\}$, a partir de las funciones de igualación de color tabuladas en la tabla 1.1. En la ecuación (1,13), que expresa la igualación por unidad de energía o, lo que es lo mismo, para V_λ lumens; si en un intervalo infinitesimal $\Delta\lambda$ hay una energía E_λ , entonces (1,13) puede reescribirse:

(1,21)

$$E_\lambda V_\lambda = L_R E_\lambda \bar{r}_\lambda + L_G E_\lambda \bar{g}_\lambda + L_B E_\lambda \bar{b}_\lambda$$

y sumando para todas las longitudes de onda del espectro resulta

(1,22)

$$\int E_{\lambda} V_{\lambda} d\lambda = L_R \int E_{\lambda} \bar{r}_{\lambda} d\lambda + L_G \int E_{\lambda} \bar{g}_{\lambda} d\lambda + L_B \int E_{\lambda} \bar{b}_{\lambda} d\lambda$$

Multiplicando ambos miembros de la igualdad por k_m , la parte izquierda de la igualdad es el flujo luminoso asociado al color $\{E_{\lambda} d\lambda\}$ y cada uno de los términos de la parte derecha de la igualdad ha de ser el flujo de cada uno de los primarios de acuerdo con (1,19); luego si definimos

(1,23)

$$\begin{aligned} R &= k_m \int E_{\lambda} \bar{r}_{\lambda} d\lambda \\ G &= k_m \int E_{\lambda} \bar{g}_{\lambda} d\lambda \\ B &= k_m \int E_{\lambda} \bar{b}_{\lambda} d\lambda \end{aligned}$$

resulta finalmente:

(1,24)

$$F = L_R R + L_G G + L_B B$$

con lo que la definición de valores triestímulos dada por (1,23) es coherente con la idea que ya teníamos sobre ellos; es decir, representa para $\{E_{\lambda} d\lambda\}$ lo que \bar{r}_{λ} , \bar{g}_{λ} , \bar{b}_{λ} para λ . En efecto, si aplicamos las ecuaciones (1,23), en particular a un color espectral, cada integral quedará reducida a un único sumando, esta es:

(1,25)

$$\begin{aligned} R_{\lambda} &= k_m E_{\lambda} \bar{r}_{\lambda} \\ G_{\lambda} &= k_m E_{\lambda} \bar{g}_{\lambda} \\ B_{\lambda} &= k_m E_{\lambda} \bar{b}_{\lambda} \end{aligned}$$

de donde se pueden definir las funciones de igualación de color como los valores triestímulo de los colores espectrales por unidad de energía, o como mencionamos anteriormente, para un *espectro equienergético*.

En la práctica resulta de gran utilidad representar un color cualquiera $\{E_\lambda d\lambda\}$ por un vector Q cuyos componentes son los valores triestímulos (Fig. 1.7), esto es,

$$(1,26)$$

$$Q = Ru_R + Gu_G + Bu_B$$

donde u_R , u_G y u_B son los valores unitarios en las tres direcciones del espacio de valores triestímulo y representan físicamente las unidades tricromáticas de lumens. Los valores triestímulo son las componentes del vector Q , por lo que también se les denomina a veces componentes tricromáticas. La ecuación (1,26) equivale exactamente a la ecuación (1,19).

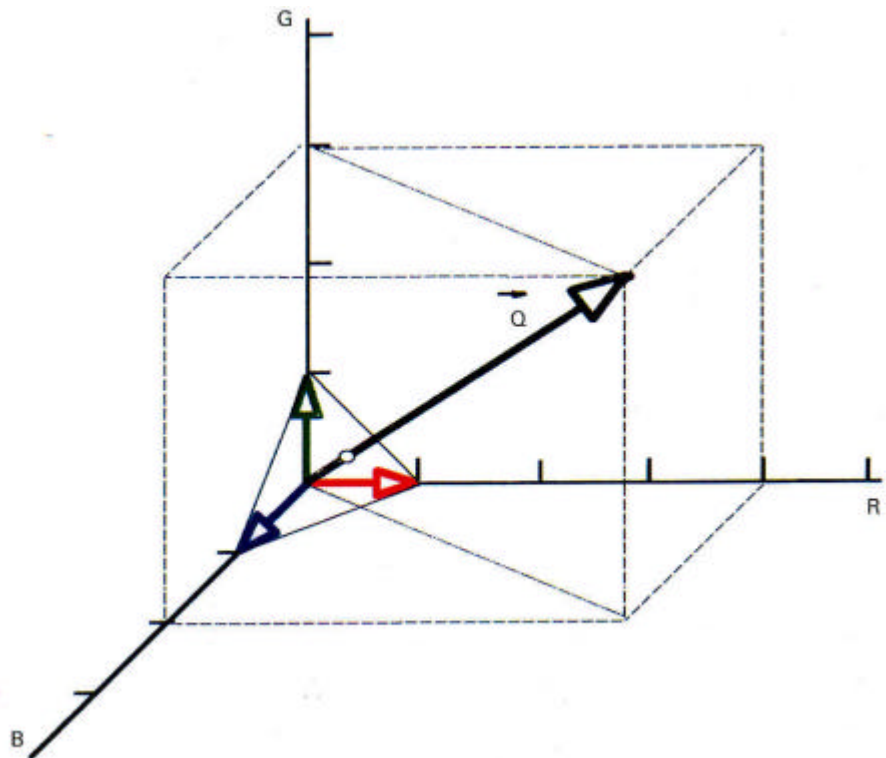


Figura 1.7. Representación vectorial del color que muestra el plano $R + G + B = 1$ (de Artigas et al. 1995).

1.8 Mezclas o fusión de colores

Las sensaciones cromáticas resultan generalmente de la emisión de luz monocromática o de la mezcla de diferentes longitudes de onda. (Fig. 1.8). *Mezcla aditiva*. Se obtiene mezclando distintos tipos de luces. Su resultado puede predecirse ordenando en forma de triángulo los colores primarios. *Fusión de pares de colores no complementarios*. La mezcla de dos colores del espectro separados por un intervalo menor que el de los complementarios (situados en el mismo lado del triángulo) crea un nuevo tono, intermedio entre ambos. Así, el rojo con el amarillo da el anaranjado, y el anaranjado con el verde, el amarillo. El púrpura, color que no existe en el espectro, se obtiene mezclando el rojo con el violeta (extremos del espectro visible). *Mezcla sustractiva*. Bajo el nombre de *mezcla sustractiva* de colores, se entiende un fenómeno de absorción física. Por ejemplo, si un filtro azul y otro amarillo (cuyas luces en mezcla aditiva adecuada darían el blanco) son atravesados sucesivamente por una fuente luminosa de luz blanca resulta el verde.

Serie cromática. Todos los colores visibles están contenidos en el espectro solar, excepto el púrpura, que es así el único color extraespectral. Los denominados *colores espectrales* son, atendiendo a su máximo de absorción de longitudes de onda: *violeta (430 nm)*, *azul (460 nm)*, *verde (520 nm)*, *amarillo (575 nm)*, *naranja (600 nm)*, *rojo (650 nm)*.

Serie acromática. Se designan así las sensaciones de blanco y negro y la serie intermedia de grises, que se deben a la mezcla de blanco y negro en proporciones variables. La sensación de *blanco (color acromático)* deriva siempre de la fusión de radiaciones monocromáticas en proporción adecuada. Las diferentes gradaciones de *gris* tampoco constituyen colores, ya que no son más que blancos de menor intensidad luminosa. Sería el caso de un papel blanco sobre el que se proyecta una

sombra. La sombra, si ocupa parcialmente el papel, aparecerá como "gris", mientras que si lo ocupa completamente, al no existir comparación, el sistema visual lo interpretará como "blanco". Respecto al *negro*, para algunos autores, no es una sensación, porque los cuerpos negros no reflejan luz. La percepción del negro se debería a la falta de estímulo en esa zona de la retina. El *negro* es la sensación producida por la ausencia de luz. No obstante, las recientes aportaciones de la electrofisiología, con el descubrimiento de los campos receptores sensibles al contraste, ponen de manifiesto que el negro es una sensación "positiva", ya que una parte de las células ganglionares retinianas (centro *OFF*) serían las que en primer lugar se activarían por la "oscuridad". Lo mismo cabe decir de CGL y de corteza visual. En efecto, una persona ciega no puede decirse que vea "negro" sino que "no ve nada", puesto que si registráramos electrofisiológicamente cualquier célula de su vía visual, no daría respuesta (Urtubia, 1997 a).

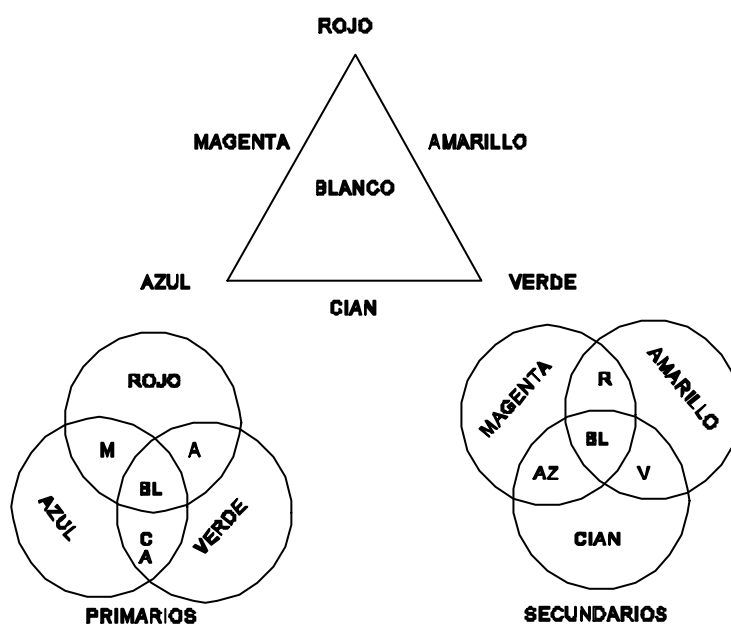


Figura 1.7 a) Mezcla aditiva de luces espectrales. b) En el triángulo de colores, los colores complementarios se localizan en los vértices y los secundarios a los lados (de Urtubia, 1997).

CAPÍTULO 2

Neurobiología de la visión en color

2.1 La cualidad cromática

En la visión, la cualidad del estímulo se refiere a la codificación del color. La determinación de la calidad del estímulo es muy simple, porque las diferentes cualidades se extienden en un continuo de longitudes de onda, dentro del espectro visible. Fue el físico inglés Isaac Newton, quien realizó por vez primera (1666) una investigación con criterio científico acerca de la percepción cromática (Newton, 1730). Halló que la luz blanca no era una radiación única, sino que podía ser dispersada por un prisma en un espectro de gradaciones de color (Fig. 2.1). Newton con idea de medir la sensación cromática mediante algún sistema de referencia en Física, añadió el naranja y el añil a los cinco colores básicos tradicionalmente aceptados: rojo, amarillo, verde, azul y violeta. De esta manera existirían siete colores espectrales básicos correspondientes a las notas de la escala musical, si bien él mismo encontró diferencias notables entre uno y otro sistema. Newton observó que, por ejemplo, un determinado tono naranja podía ser

descompuesto en rojo y amarillo mediante refracción con un segundo prisma. Sin embargo, una persona con cierta sensibilidad musical, no confundirá un acorde con una simple nota. El color, según Newton, podía ser caracterizado por las diferentes refracciones de los rayos luminosos al atravesar un prisma, con lo que lo asoció a una cantidad física definible; como expresa Wright (1967), "iniciando así una relación de la matemática y la física con la percepción cromática".

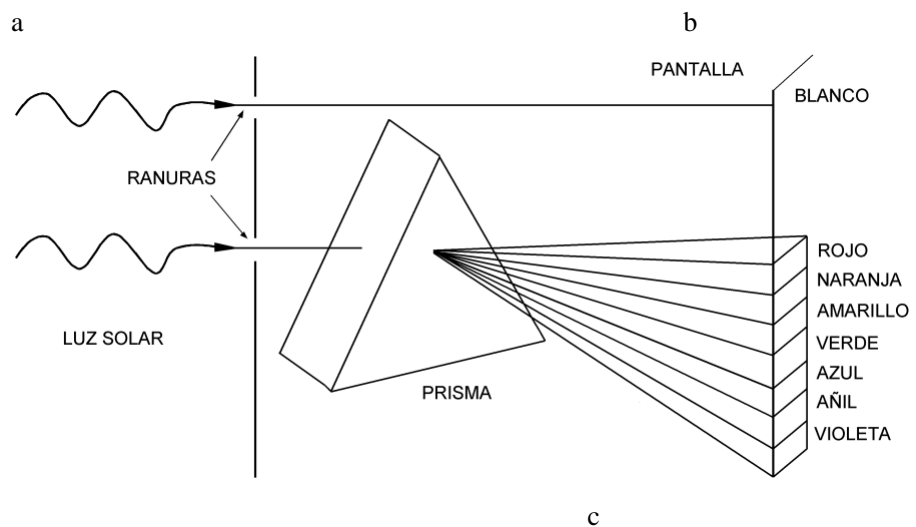
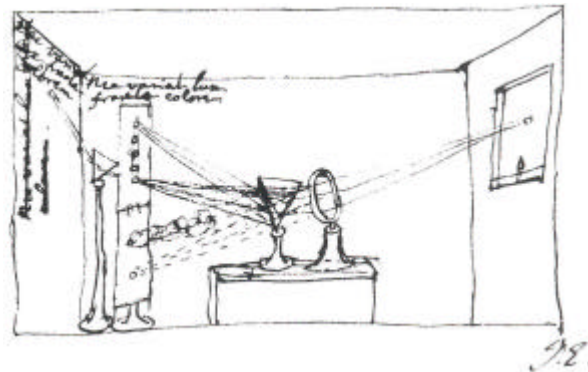


Figura 2.1. a) Isaac Newton, 1642-1727. b) Dibujo original del propio Newton sobre la refracción de la luz. c) Los rayos de luz blanca (luz solar) sufren grado diverso de refracción según su longitud de onda (de Urtubia 1997).

2.2 Teorías acerca de la visión en color

2.2.1 Teoría tricromática

Una importante teoría, desarrollada por Thomas Young (Fig. 2.2a) entre 1802-1807, redujo los siete colores básicos de Newton a tres. Proponía la existencia de tres tipos de sensores primarios que respondieran específicamente al *rojo*, *verde* y *azul*. Su hipótesis se basaba en que la mezcla apropiada de los tres colores primarios (azul, amarillo y rojo para pigmentos, o azul, rojo y verde para la luz) produciría la sensación de blanco, o bien cualquier otro de los colores que pudieran ser reconocidos por el ser humano. Esto fue demostrado casi medio siglo más tarde por el físico James Clerk Maxwell.



Figura 2.2 a) Thomas Young (1773-1829) b) Herman L.F. von Helmholtz (1821-1894) c) Ewald H. Hering (1834-1918) (de Poliak, 1954)

El alemán Herman Ludwig Ferdinand von Helmholtz (Fig. 2.2 b), en su gran obra publicada entre 1856 y 1866 *Handbuch der Physiologischen Optik* (Cronly-Dillon, 1991), confirmó experimentalmente algunos de estos supuestos, y postuló que debían existir "tres tipos de sustancias fotoquímicamente descomponibles

depositadas en la terminación de las fibras del nervio óptico". Esta teoría es la llamada *teoría tricromática* o de Young-Maxwell-Hemholtz, que adscribe la percepción del color a la interacción de tres tipos de fotopigmentos específicos en la retina, sensibles respectivamente al rojo, al verde y al azul-violeta.

2.2.2 Teoría de los procesos oponentes

Si bien la teoría tricromática aporta explicaciones satisfactorias sobre algunos datos de mezcla de colores y de la mayor parte de los casos de visión defectiva del color, no explica otros aspectos como el contraste de color o contraste cromático y algunos datos experimentales de la adaptación al color (contraste sucesivo cromático). Una de las primeras oposiciones fue la de Goethe (1810-1820), quien consideró el color como un conflicto cósmico entre luz y oscuridad. Aunque en su mayor parte su concepción era errónea, aportó el "par blanco-negro" a la teoría de Hering. La cancelación de colores, como el hecho de que la mezcla de luces roja y verde se perciba como amarillo puro o el de que la mezcla de luces amarilla y azul se perciba como blanca, condujo a la formulación de otras teorías. La más acertada de entre ellas ha sido la *teoría de los procesos oponentes*, propuesta por Ewald Hering en 1878 (Fig. 2.2 c). Se basa en la pureza psicológica de las sensaciones de *azul*, *amarillo*, *verde* y *rojo*. Estas cuatro sensaciones pueden ser subdivididas en dos pares de colores antagonistas o pares oponentes (*colores oponentes*) según: *amarillo/azul*, *verde/rojo*.

Hurvich y Jameson (1957) conciliaron estas teorías, señalando que si la teoría de Goethe de luz-oscuridad se compaginaba con la de Hering, surgiría un sistema de tres pares, compatible con la teoría tricromática. Este nuevo enfoque supone que en la retina existen los tres canales de oponencia de color correspondientes, es decir, que hay células que cambian sus frecuencias de descarga como respuesta a diferentes longitudes de onda de manera antagónica. Así el rojo produce un

aumento de descargas y el verde las disminuye en la misma célula. Existen, por tanto, tres tipos de células: células sensibles al rojo-verde, células sensibles al azul-amarillo y células sensibles al blanco-negro.

Los resultados de algunas investigaciones de electrofisiología retiniana, CGL, y corteza visual a la estimulación por la luz, parecen apuntar directamente a un sistema de reacciones opuestas: en teleósteos, el hallazgo de los potenciales (C) o cromáticos, que se originan en las células horizontales, las cuales son despolarizadas por un sistema de conos e hiperpolarizadas por otro; los campos receptores de bipolares y ganglionares organizados en forma de un centro excitado por una determinada banda de longitud de onda y una periferia cuyo estímulo por otra banda de longitudes de onda inhibe la respuesta. Todo ello confirmó que si bien la teoría tricromática es cierta respecto a los fotorreceptores, la elaboración del mensaje visual en la retina se produce por un mecanismo de oponencia de colores. Ambas teorías resultaron, pues, en esencia correctas, pero en diferentes estadios de la vía visual aferente, lo cual reitera una premisa básica en la percepción: "la codificación de cualquier característica ambiental puede cambiar de un estadio al siguiente".

2.3 Fotoquímica de la visión en color

Fotorreceptores en los mamíferos. En la retina de los mamíferos cabe distinguir dos tipos de fotorreceptores diferentes, tanto morfológica como funcionalmente: los *conos* y los *bastones* (Fig 2.3). Los bastones son sensibles a bajas intensidades luminosas e intervienen en la visión nocturna (*escotópica*) y los conos en la visión diurna y cromática (*fotópica*). Son células de forma alargada, polarizadas en cuanto su forma y función, y segmentadas en subregiones con diferente papel

funcional.

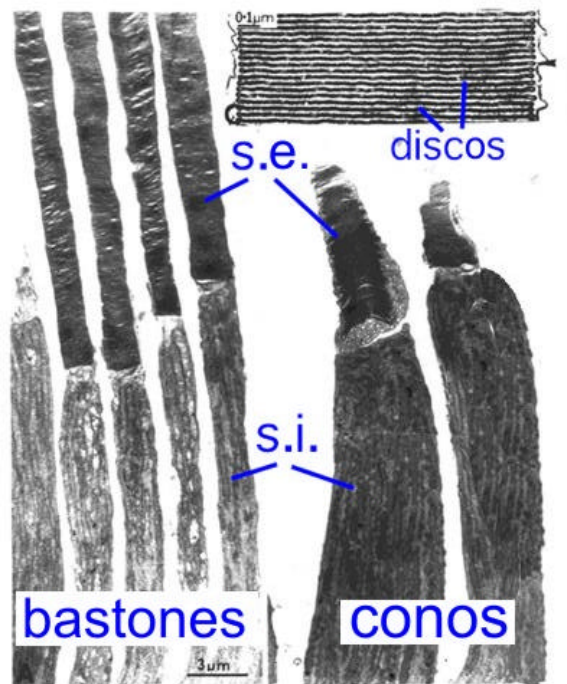


Figura 2.3 Los dos tipos de fotorreceptores, conos (dcha) y bastones (izda) (de Kolb y Fernández 2002).

Pigmentos visuales. Böll en 1876 observó que la retina de una rana, que guardada en una cámara oscura mostraba un color púrpura brillante, lo perdía al ser expuesta a la luz, quedando amarillo pálido y blanco al cabo del tiempo. El color púrpura reaparecía después de un tiempo en oscuridad. Kühne en 1879 fue el primero que aisló una sustancia fotosensible en la retina, localizándola en el segmento externo de los bastones y valorando debidamente su función en el proceso de la visión (Urtubia 1986). Su función es permitir la visión crepuscular o nocturna, que es la que se tiene con una claridad tal, que permite ver como sombra la forma de los objetos, pero no su color. Las rodopsinas de las diversas especies animales tienen limitado su espectro de absorción entre los 493 y los 502 nm. Debido a que la visión diurna (con intensidad elevada de luz o visión fotópica) se localiza en los tres

tipos celulares de conos, se denominó a las tres proteínas que conformaban los pigmentos visuales de los conos *fotopsinas*.

Al pigmento visual de los bastones se le llamó en un principio *eritropsina*, por su color rojo-anaranjado brillante. También se la ha llamado *púrpura visual*, ya que refleja la luz de los dos extremos del espectro, rojo y azul. Posteriormente, a partir de un juego de palabras entre el prefijo griego "rodhos" (rosado) y el hecho de que el término rod significa bastón en inglés, se le dio el nombre de *rodopsina* (Urtubia, 1997 a). A la porción proteica de la rodopsina se le llama *escotopsina*, por ser los bastones los fotorreceptores propios de la visión escotópica.

Una solución de rodopsina humana íntegra, presenta un máximo de absorción a una longitud de onda de 498 nm. en la zona del visible, que corresponde a la banda espectral del verde-azulado (alfa). Cuando se escinde la molécula por la acción de un fotón, su espectro de absorción presenta dos máximos: gamma (278 nm) corresponde a la porción proteica, la opsina, y beta (370 nm) que corresponde al retinal (Fig. 2.4).

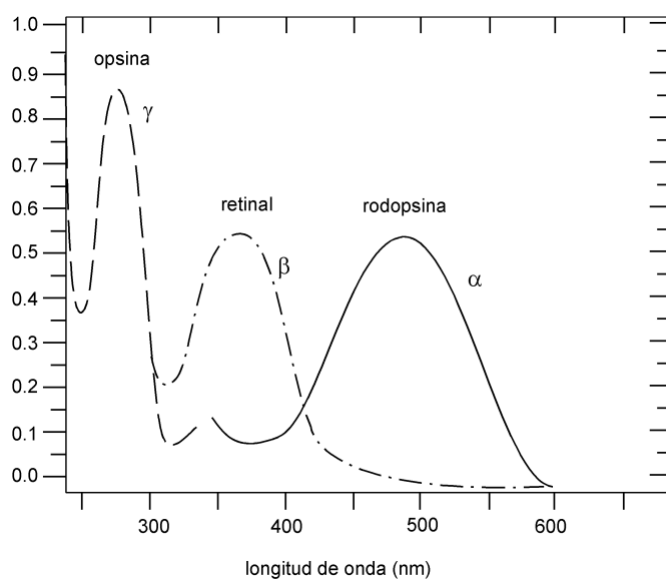


Figura 2.4. Espectro de absorción de la rodopsina (de Urtubia, 1997).

La *opsina* es una proteína conjugada (Fig 2.5), compuesta por la glucoproteína *opsina* en combinación con el isómero 11-cis del aldehído de la vitamina A o *retinal*. La rodopsina contiene hasta un 60% de estructura helicoidal, incluida en la membrana: 7 hélices de tipo alfa, conectadas por segmentos no helicoidales y orientadas en un plano perpendicular a la bicapa lipídica. (Dratz y Hargrave, 1983).

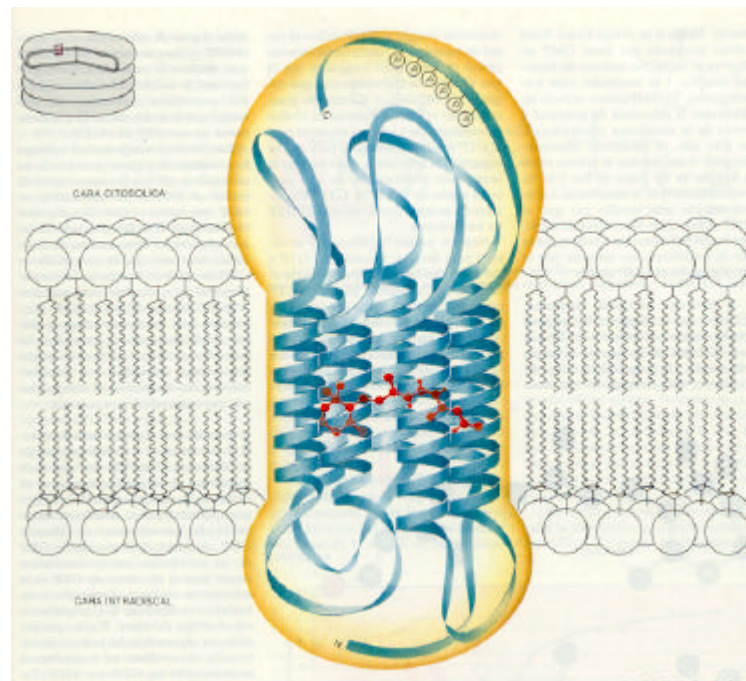


Figura 2.5. Estructura tridimensional de la rodopsina (adaptado de Dratz y Hargrave, 1983).

La opsina es insensible a la luz. A ella se fija el *retinal 11-cis*, un derivado de la *vitamina A* o *retinol*. A la presencia de este *cromóforo* (cromóforo significa "que da color") se deben su color rojo-magenta y la sensibilidad a la luz. La banda de absorción del retinal aislado en disolventes orgánicos se encuentra entre 360 y 380 nm. Al exponerse a la luz la molécula de rodopsina, el 11-cis-retinal cuya

estructura tiene forma acodada y está ligado a la opsina, experimenta la transformación a una conformación rectilínea, *retinal "todo-trans"* (Wald, 1954) (Fig. 2.6).

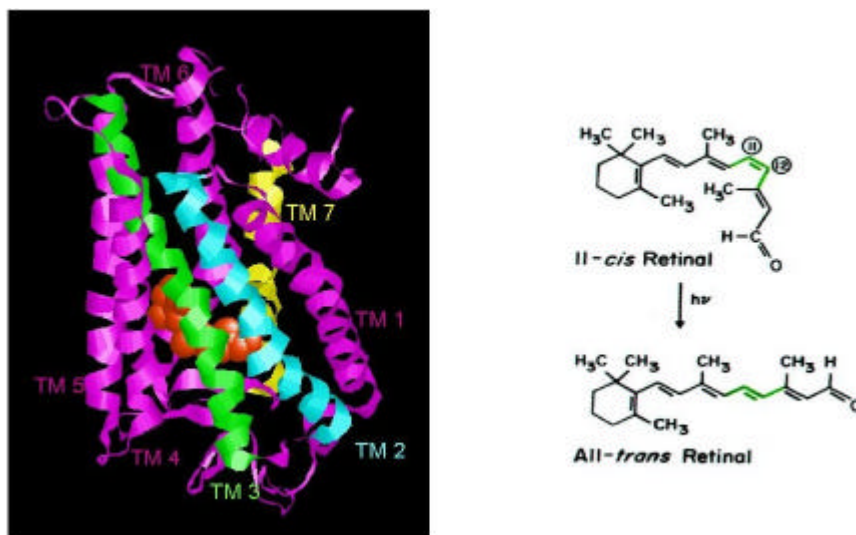


Figura 2.6 A la izquierda estructura tridimensional de la rodopsina con sus siete hélices alfa. A la derecha representación gráfica de la molécula del retinal en su forma 11-cis y en su forma todo-trans después de isomerizarse al captar el fotón (de Pawcelsky, 2002).

Los pigmentos visuales de los conos están compuestos por el mismo tipo de retinal que los bastones y por tres tipos diferentes de opsinas, diferentes asimismo de la de los bastones. Estas opsinas se denominan *fotopsinas*, ya que los conos funcionan con elevados niveles luminosos. La denominación actual de los pigmentos visuales de los conos es: *pigmento sensible al rojo*, *pigmento sensible al verde* y *pigmento sensible al azul*. Es precisamente la diferencia de cargas eléctricas en torno al retinal de cada una de las tres opsinas, consecuencia de la diferente estructura primaria, lo que hace que la molécula integrada muestre una sensibilidad diferencial a la longitud de onda roja, verde o azul (Garriga y Urtubia, 2002).

Espectrofotometría de absorción de los conos. Bowmaker y Dartnall (1980) y

Dartnall, Bowmaker y Mollon (1983) en 11 personas primero y luego en 7 respectivamente, midieron las absorciones máximas de los conos mediante técnicas de *microespectrofotometría*, que consiste en medir las longitudes de onda que pasarán a través del cono antes y después de haberlo decolorado por medio de un fino haz luminoso. (Fig. 2.7). Obsérvese el gran porcentaje de solapamiento en las longitudes de onda que cubre cada tipo de cono. Un tipo de cono absorbe la luz con un máximo próximo a los 420 nanómetros (*sensible al azul*) o *conos S* (*short* = corta). Su espectro de absorción se extiende desde los 370 a los 530 nm. En realidad, el pico en el azul se da a 440 nm en el ojo intacto, ya que el cristalino (ligeramente amarillento según la edad) absorbe algunas radiaciones de onda corta. Otro tipo de cono presenta su máximo de absorción a los 534 nanómetros (*sensible al verde*) o *conos M* (de *middle* = media). Son sensibles a las λ comprendidas entre 430 y 620 nm. Un tercer tipo de cono presenta su máximo de absorción a 564 nanómetros, que corresponde al color amarillo, pero debido a que absorbe más longitudes de onda del rojo que los otros conos, se le llama *sensible al rojo* o *conos L* (de *long* = larga). Absorbe longitudes de onda entre 450 y 780 nm.

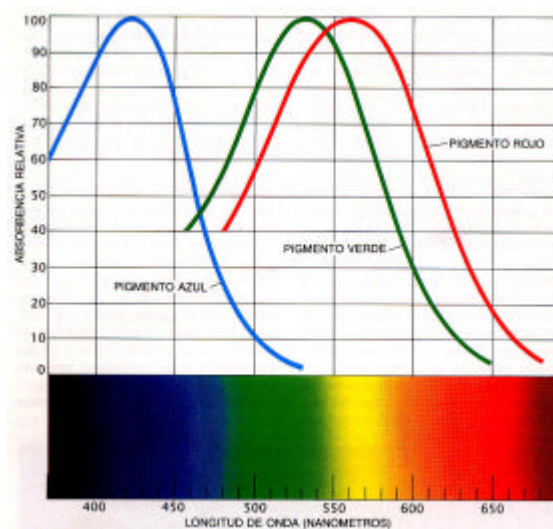


Figura 2.7. Curvas de absorción espectral de conos y bastones en humanos. En ordenadas, la absorbancia normalizada, en abscisas la longitud de onda expresada en nm (de Nathans 1989, adaptado de Bowmaker y Dartnall, 1980).

La longitud de onda sólo determina la probabilidad de absorción, la cual está definida por la curva de absorción de los diferentes pigmentos. Véase en la gráfica que existe mucho solapamiento en las longitudes de onda que cubre cada tipo de cono. Puesto que cada cono expresa únicamente un tipo de fotopigmento, un haz de luz de una determinada longitud de onda promoverá distintos grados de excitación en los diferentes tipos de fotorreceptores. La población de conos con un máximo de absorción cercano a la longitud de onda de un determinado haz de luz será estimulada más intensamente, y los conos cuyo máximo de absorción más alejado de dicha longitud de onda se estimularán menos. La razón de la intensidad de estimulación entre los tres mecanismos es específica para cada longitud de onda de la luz. Es de esta forma, como la retina discrimina todas las longitudes de onda en cada punto retiniano, mediante tres conos sensibles diferenciales. La visión en color requiere por tanto la comparación de las señales de salida de al menos dos células fotorreceptoras que difieran en el espectro de absorción de su fotopigmento.

El diferente grado de excitación entre los fotorreceptores suministrará la información sobre la longitud de onda del estímulo. Estos descubrimientos han disminuído la controversia respecto a cómo los fotorreceptores codifican el color. La teoría tricromática era, en esencia, correcta: tres tipos de conos cada uno de los cuales responde a una gama de longitudes de onda, pero también con sensibilidades máximas al verde, al azul, y al rojo. Pero una vez que la información es transmitida a las células ganglionares y desde allí al cuerpo geniculado lateral, la teoría del proceso oponente describe mejor la situación.

Distribución de los conos en la retina de los primates. Si bien morfológicamente los tres tipos de conos son indistinguibles, puede hacerse una diferenciación por métodos histoquímicos, y puede estudiarse su distribución en la retina. Hasta ahora los mejores éxitos han sido en retinas de macaco, aunque la tinción era selectiva

para conos sensibles al azul (De Monasterio y col. 1981, 1985). Mollon y Bowmaker (1992) tomaron medidas directas mediante microespectrofotometría de diversas zonas de la región foveal de la retina de varios cercopitecos enanos (*Cercopithecus talapoin*). Los conos sensibles a las longitudes de onda media y larga, distribuidos al azar, están prácticamente presentes en igualdad numérica. Esto contrasta con la proporción 2:1 postulada para la fovea humana a partir de datos psicofísicos obtenidos por Pokorny y Smith (1991).

Evolución y genética molecular de la visión en color. Actualmente se han identificado y caracterizado las secuencias aminoacídicas de las tres opsinas correspondientes a los fotopigmentos de los tres tipos de conos. Esta secuencia de aminoácidos determinará la estructura terciaria de las opsinas asociadas al cromóforo (*retinal*) con lo que el máximo de absorción de éste (370 nm) se verá desplazado de distinta forma según el entorno de aminoácidos que lo rodea. En función de estas diferencias en las cadenas de las opsinas, se obtienen los diferentes máximos de absorción de los tres fotopigmentos a 440, 534 y 564 nm respectivamente. Esta diferente estructura de las opsinas depende en última instancia de los genes que las codifican. El gen de la opsina para el azul se ha localizado en la pareja de cromosomas 7 que son autosómicos, mientras que las opsinas correspondientes al verde y al rojo se localizan en la pareja 23 que corresponden a los cromosomas sexuales. Para explicar las anomalías cromáticas dependientes de los fotopigmentos se ha propuesto que debido a un mal alineamiento de los alelos se producen unos genes híbridos, lo que provocará un desigual entrecruzamiento de los cromosomas en la meiosis. Estos genes híbridos codificarán opsinas anómalas, con varios aminoácidos diferentes, lo que hará que el máximo de absorción de los nuevos fotopigmentos, no corresponda a los respectivos normales para el rojo o el verde (Urtubia, 1994).

En su exhaustiva revisión sobre la visión en color en mamíferos, que incluye las

de otros varios autores Gerald Jacobs (1993) muestra que la mayoría de los mamíferos de hábitos diurnos son dicrómatas, con dos fotopigmentos en sus conos, uno para la onda corta y otro para la onda media-larga. Estos autores postulan que los primates superiores (monos del Viejo Mundo) incluyendo la especie humana, son tricrómatas, debido a que hubo una duplicación del gen ancestral para la onda media-larga, hace unos treinta millones de años.

En esta fecha es cuando se data la separación de los continentes Africa y América del Sur, quedando los primates repartidos, de forma que la mutación quedara únicamente en los primates africanos de donde proviene la especie humana. Los monos del Nuevo Mundo (Continente americano) siguen siendo dicrómatas. De esa duplicación mutada, se obtuvo el gen que codifica las opsinas de los fotopigmentos que captan las longitudes de onda media (verde).

Recientemente se ha introducido el gen que codifica para el pigmento visual humano de los conos-L (con un pico espectral a aproximadamente 562 nm) en un ratón que sólo tiene naturalmente dos tipos de pigmentos a 509 nm y 360 nm. Se han obtenido así ratones transgénicos que expresan el gen de la opsina humana correspondiente al pigmento de longitudes de onda elevadas, que se encuentra ausente en los ratones normales (wild type). Se ha visto que este fotopigmento es funcional en los ratones transgénicos, produciendo un aumento de la sensibilidad visual de los ratones para longitudes de onda elevadas. De hecho estos ratones ven más en la zona de longitudes de onda elevadas que cualquier otro ratón lo haya hecho anteriormente. Este estudio indica que el sistema visual del ratón puede utilizar señales sumadas provenientes de un pigmento nativo y de otro añadido nuevamente mediante técnicas de ingeniería genética. Esta aproximación puede ser muy útil para esclarecer aspectos fundamentales de la genética molecular de los pigmentos visuales que median la visión del color, así como de la evolución biológica de estas proteínas (Garriga y Urtubia, 1999).

2.4 Neurofisiología de la visión en color

2.4.1 Confirmación de la teoría de los pares oponentes de color

La teoría de los pares oponentes careció durante muchos años de aceptación. Leo Hurvich y Dorotea Jameson (1958) realizaron un experimento que sentó cuantitativamente las bases de la psicofísica de los procesos oponentes. El objetivo fue determinar la "fuerza" de los componentes azul, amarillo, rojo y verde, en los mecanismos azul-amarillo y rojo-verde, a partir de las diversas longitudes de onda del espectro visible. Comenzaron por determinar la "fuerza" del sistema del azul en las diversas porciones del espectro. Así, ante una luz de 430 nm (violeta), el mecanismo del azul dará una respuesta vigorosa, ya que está prácticamente en el máximo de absorción del sistema de conos sensibles al azul.

Para cuantificar la magnitud de la respuesta, razonaron, que puesto que el amarillo es el opuesto al azul y, por lo tanto lo anula, se podía determinar su "fuerza" (saturación de azul), añadiéndole luz amarilla hasta que desapareciera completamente la percepción de azul. Una vez que el violeta perdió toda su saturación, efectuaron medidas para longitudes de onda más largas, y obtuvieron la curva discontinua de la gráfica de la figura 2.8 a. Dicha gráfica muestra que el mecanismo del azul responde a las luces de longitud de onda inferior a los 500 nm, y que su máxima respuesta es a los 440 nm aproximadamente. Una luz de 500 nm que percibimos como verde no dará impresión de contener azul ni amarillo, pero si se aumenta la longitud de onda por encima de los 500 nm, percibiremos al principio un verde amarillento, luego un amarillo verdoso, un amarillo brillante y, por fin, un amarillo rojizo. Hurvich y Jameson añadieron azul hasta eliminar todo el amarillo que estaba asociado a estas longitudes de onda, con lo cual se conoció la cantidad de amarillo percibida en cada una de ellas.

Observando la curva continua de la figura 2.8 a se puede concluir que el mecanismo amarillo responde a las longitudes de onda entre 500 y 700 nm con una respuesta máxima a 550 nm. En la figura 2.8 b aparecen los resultados de experiencias similares, al medir la fuerza de los mecanismos rojo y verde. Para el mecanismo rojo, se determinó la cantidad de luz verde requerida para anular la percepción del rojo con cada longitud de onda y viceversa para el mecanismo del verde. Los resultados correspondientes al mecanismo del rojo (curva discontinua) muestran una gran fuerza no sólo para longitudes de onda larga, como debería esperarse, sino además para longitudes de onda corta. La explicación radica en que esta luz, de color violeta, tiene a efectos de percepción un componente azul y otro rojo. La curva del mecanismo del verde (línea continua de la figura 2.8 b), muestra cómo dicho mecanismo responde a longitudes de onda comprendidas entre los 490 y los 580 nm, con una respuesta máxima a los 525 nm.

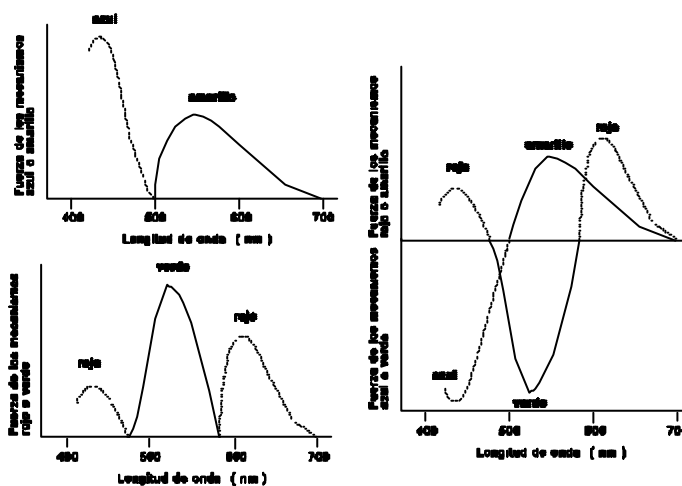


Figura. 2.8 a) Los mecanismos para el azul y amarillo no funcionan simultáneamente a ninguna ?. Además, a 500 nm, su "fuerza" es 0, por lo que esa luz verde no contiene amarillo ni azul. b) Los mecanismos rojo y verde no funcionan simultáneamente ante ninguna longitud de onda. A 475 nm (azul) y a 580 nm (amarillo), su "fuerza" es cero, por lo que esas luces no contienen nada de verde ni de rojo. c) Inversión de las gráficas del azul y del verde, para indicar la naturaleza oponente de los pares azul-amarillo y rojo-verde (adaptado de Hurvich y Jameson, 1958).

En la figura 2.8 c se han unido en la misma gráfica las dos anteriores, pero invirtiendo las curvas correspondientes al azul y al verde para resaltar la idea de oponencia. Esta gráfica permite determinar la cantidad de cada color presente en cualquier longitud de onda del espectro. Así, una luz de 560 nm tiene predominancia de amarillo, pero también incide de forma importante dentro del verde; mientras que una de 630 nm, tendrá rojo y amarillo. Asimismo, esta gráfica demuestra cómo explica la mezcla de color la teoría de los colores opuestos. Por ejemplo, la luz verde de 560 nm provocará respuestas de los mecanismos amarillo y verde, mientras que una luz roja de 630 nm evocará respuesta en el mecanismo de rojo y amarillo. La mezcla de estas dos luces dará como resultado la percepción del amarillo, ya que se habrán anulado los mecanismos del rojo y del verde mutuamente.

Las *postimágenes cromáticas* confirman la teoría de los procesos oponentes. Si se mira una figura de color y luego un papel blanco, aparece casi inmediatamente una postimagen negativa del color opuesto o complementario. Es el *contraste cromático sucesivo*. La sombra de un objeto producida por una luz de color, se ve al iluminarlo con luz incolora, como sombra, del color antagonista. Es un ejemplo del *contraste cromático simultáneo* (Urtubia, 1985).

2.4.2 Codificación del color en la retina

Sistemas de conos. El análisis de la información cromática no se efectúa mediante la actividad de cada tipo de cono, sino por la comparación entre poblaciones de conos que se activan simultáneamente ("código de población"). Así, las señales originadas por los conos sensibles al verde y al rojo deben interaccionar para formar la pareja oponente rojo-verde, y las de los tres tipos de conos deben interaccionar para formar los oponentes azul-amarillo, ya que la sensación de amarillo resulta de la oponencia rojo-verde (Zrenner y Gouras, 1981) (Fig. 2.9).

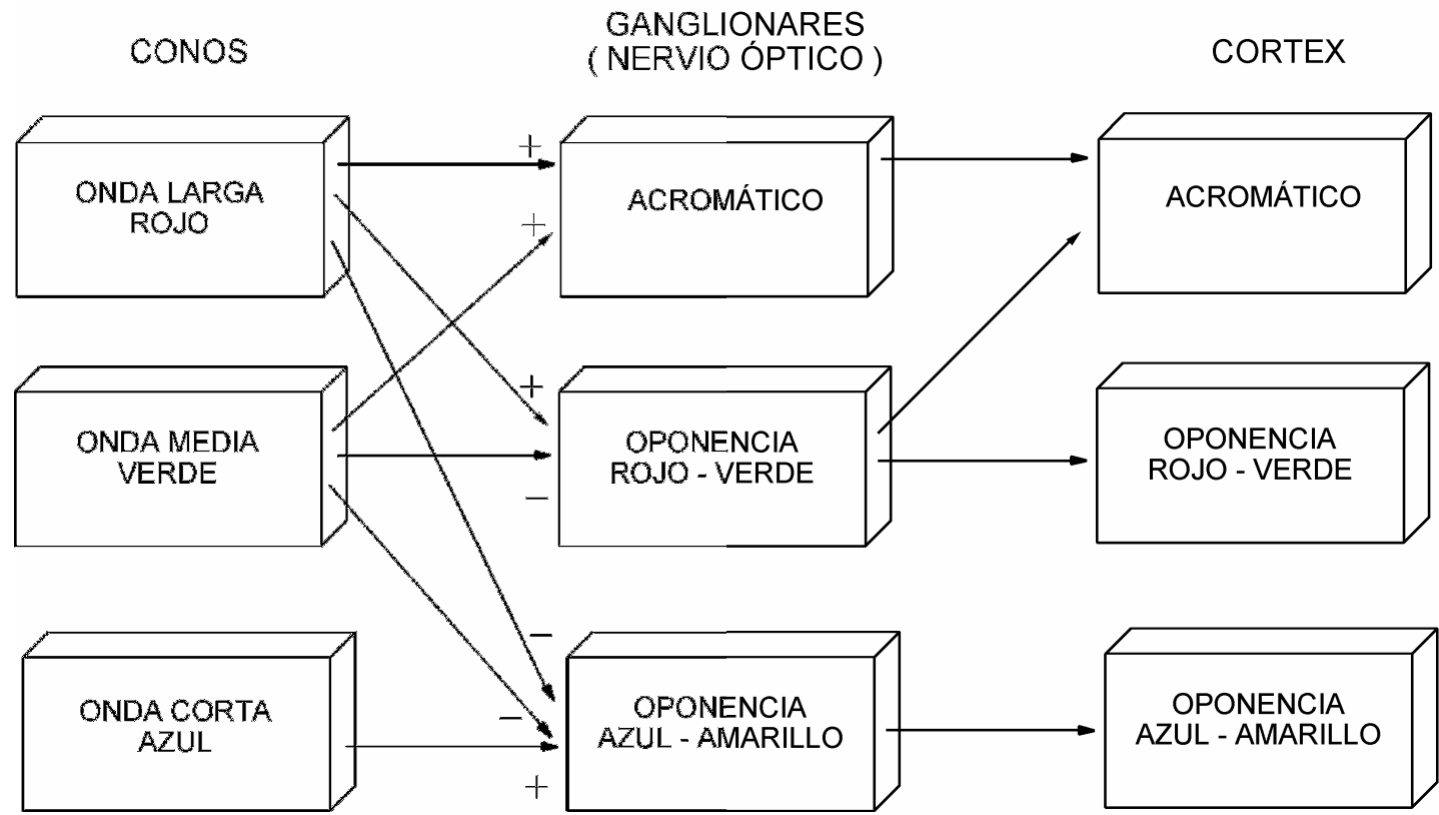


Figura. 2.9 Esquema que muestra las posibles interacciones entre los sistemas de conos hacia las ganglionares (de Zrenner y Gouras 1981).

Células horizontales. La evidencia fisiológica de la teoría de los procesos oponentes fue obtenida por Gunnar Svaetchin en 1953, el cual descubrió los *potenciales S* en las células horizontales de la retina de teleósteos, si bien él pensó que se debían a los conos. Fue Kaneko (1970) quien atribuyó correctamente a este tipo celular un tipo de respuestas despolarizantes para un tipo de longitud de onda e hiperpolarizantes para otra. Pero, al menos, proporcionó la primera evidencia de que existían interacciones opuestas entre sistemas de conos.

El subtipo de *potenciales C* o cromáticos comprende las siguientes respuestas en células horizontales de teleósteos:

- a) Hiperpolarización para el rojo y despolarización para el verde.
- b) Despolarización para el rojo e hiperpolarización para el verde.
- c) Hiperpolarización para el azul y despolarización para el amarillo.
- d) Despolarización para el azul e hiperpolarización para el amarillo.

Las células horizontales de la retina de los primates, como en la mayoría de mamíferos, sólo presentan *potenciales L* o acromáticos. La respuesta específica a las diferentes longitudes de onda viene dada por la magnitud de la hiperpolarización.

Células ganglionares sensibles al color. Estudios posteriores, han permitido identificar células sensibles a la oponencia de color en la retina, CGL y corteza visual de los primates. Entre las ganglionares de la retina de los primates se han descrito algunas que muestran oponencia de color (Daw, 1968; Gouras, 1968) que presentan activación al estímulo del centro de su campo receptor con una longitud de onda, e inhibición al estímulo periférico de su campo receptor con otra. Han sido caracterizados dos tipos celulares, con campos receptores concéntricos antagónicos entre el centro y la periferia, pero con funciones diferentes:

- *Células de amplio rango.* Estas ganglionares tienen una organización concéntrica

centro-periferia de sus campos receptores. Reciben entrada de señales de los tres sistemas de conos, tanto en el centro como en la periferia (Fig. 2.10). Combinan en cada caso impulsos de conos para los colores opuestos rojo y verde. Un haz de luz blanca en el centro del campo receptor excita (*ON*) o inhibe (*OFF*) a la célula, mientras que la luz que estimula la periferia produce la respuesta contraria. Estas células detectan diferencias de intensidad de una determinada longitud de onda entre partes del campo receptor. Se trata de células de amplio rango, acromáticas, pero que transmiten información sobre contrastes de luminosidad. Los conos con sensibilidad al azul no parecen provocar impulsos en estas células (no aparece representado en la figura), presumiblemente porque se utilicen sólo para la visión en color y no para la percepción de la forma, puesto que la aberración cromática del ojo distorsiona más las imágenes para las longitudes de onda corta.

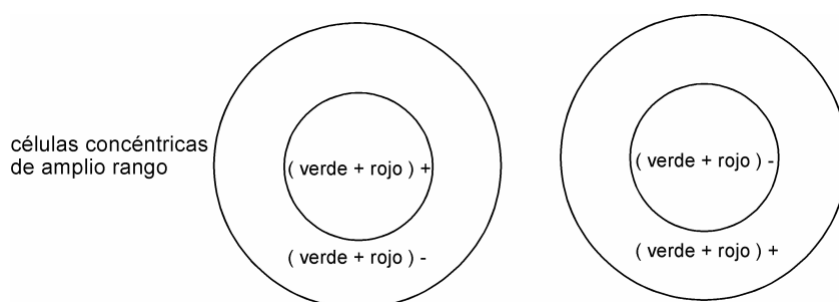
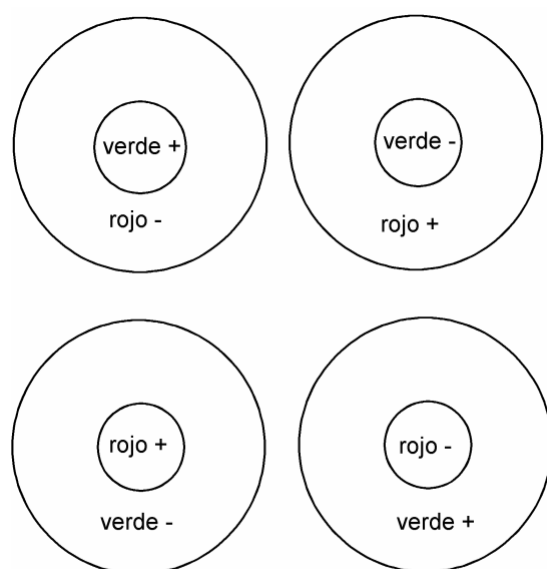


Fig. 2.10 Las células de amplio rango de retina y cuerpo geniculado lateral intervienen en la percepción de formas mediante contrastes acromáticos (de Urtubia, 1997).

- *Células oponentes simples*. Este segundo tipo de ganglionares muestra respuestas diferentes a luces espectrales y a la luz blanca, independientemente de la energía del estímulo. Estas ganglionares, llamadas *opponentes simples*, reciben entrada de señales de un sistema de conos en el centro y de otro u otros dos en la periferia (Fig. 2.11). Un 38% de las neuronas estudiadas daban respuestas *ON* a las longitudes de onda roja, verde o azul, y *OFF* a las luces verde, roja o ambas

(Zrenner y Gouras, 1981). Las neuronas de centro-*OFF* al rojo, verde o azul eran menos numerosas (14%), y daban respuestas *ON* cuando se estimulaba la periferia de su campo receptor con luces verde, roja o ambas (amarillo) respectivamente. Las neuronas más frecuentes son las que se excitan centralmente mediante sistemas de conos sensibles al rojo y se inhiben periféricamente, con sistemas de conos sensibles al verde (21%). Otras se excitan centralmente por un sistema de conos sensibles al verde y se inhiben mediante sistemas de conos sensibles al rojo que converjan en su periferia (11%). También existen las de respuesta recíproca para las respectivas longitudes de onda en centro o en periferia.

Estas células codifican propiedades cromáticas y espaciales, y detectan diferencias de brillo para una determinada longitud de onda, por comparación a través de los bordes. Para que se perciba el color, la luz debe estimular tanto el centro como la periferia del campo receptor. Así, una célula que se inhiba al incidir luz roja en su centro, y dé respuestas al incidir luz verde en su periferia, dará respuesta intensa tanto ante una iluminación de todo el campo con luz verde, como ante una iluminación del centro con una luz blanca, puesto que es una célula de centro *ON*. Esto queda superado por la comparación simultánea de sistemas paralelos en la corteza visual (células oponentes dobles). Por tanto, estas células no responden solamente a estímulos cromáticos. Así, no puede saberse si una respuesta intensa de una célula de centro excitatorio para el rojo y periferia inhibitoria para el verde, es debida a un estímulo amplio rojo o a un estímulo puntual pequeño pero brillante de cualquier color aplicado al centro del campo receptor. Podrían calificarse como células de respuesta ambigua para cromaticidad y contraste. Otras células responden con excitación al amarillo en el centro y se inhiben para el azul en la periferia. Del mismo modo existen las equivalentes de *centro-OFF* para esas longitudes de onda (Martin 1998, Dacey, 1999).



células concéntricas de oposición simple

Figura 2.11 Células oponentes simples en la retina y en el cuerpo geniculado. Permiten diferenciar contrastes cromáticos (de Urtubia, 1997).

Interpretación de un color determinado a partir de las ganglionares. Los pares oponentes de Hering son azul-amarillo, rojo-verde y blanco-negro. Como se describió anteriormente, todos los demás colores pueden obtenerse como mezcla de estos. En realidad, algunos colores parecen poder "mezclarse", pero otros no. Puede hablarse de un "verde azulado", de un naranja como mezcla de rojo con amarillo, pero no de un amarillo azulado, ni de un rojo verdoso. Estos colores parecen "opuestos" y de ahí el nombre que les dio Hering. La explicación de la percepción de colores individuales responde a la siguiente organización de los sistemas de conos, por ejemplo en el caso de percibir un amarillo:

La luz roja excita los conos rojos, con lo que se excitan las ganglionares con respuesta al rojo-verde. Una luz amarilla excitará aproximadamente el mismo número de conos rojos y verdes. Los conos rojos y verdes excitan las células

ganglionares amarillo-azules, con lo que su frecuencia de descargas aumentará, mientras que las células ganglionares rojo-verde serán excitadas por el rojo e inhibidas por el verde, con lo que su frecuencia de descarga no cambiará. El cerebro detectará únicamente aumento de la tasa de descarga de las ganglionares amarillo-azules y, por tanto, interpretará el color como *amarillo*. Con esta misma base puede explicarse por qué puede imaginarse un rojo amarillento (naranja), pero no un amarillo azulado. El cerebro percibe el rojo amarillento cuando la actividad de las células ganglionares amarillo-azules y rojo-verdes aumenta. Sin embargo, para percibir un azul amarillento, la actividad de las células amarillo-azules tendría que aumentar y disminuir a la vez, lo cual es imposible. El mismo razonamiento cabe aplicar para un rojo verdoso (Urtubia, 1997 a).

2.4.3 Codificación del color en el cuerpo geniculado lateral

Sistemas parvocelular y magnocelular. En los primates, incluida la especie humana, el 90% de los axones retinianos termina en el cuerpo geniculado lateral, la porción visual del tálamo. Esta estructura subcortical se encarga de transportar la información visual a la corteza cerebral. Al igual que sucede en el sistema somatosensitivo, la representación en el CGL no es idéntica para todas las regiones de la retina, de manera que la representación de la fóvea, el área retiniana con mayor densidad de células ganglionares, es relativamente mayor que la de la retina periférica. La representación de la fóvea y de la región inmediatamente adyacente a ella constituye alrededor de la mitad de la masa del cuerpo geniculado lateral (y de la corteza visual primaria).

Las regiones periféricas de la retina son mucho mayores, pero poseen una densidad menor de células ganglionares y su representación es también mucho menor. Las células ganglionares de la fóvea y la región central de la retina que la rodea se encuentran densamente agrupadas para compensar el hecho de que el área central

de la retina es menor que la periferia (debido a la concavidad del ojo. Dado que esta limitación física deja de existir fuera de la retina, las neuronas del CGL y de la corteza visual primaria se encuentran distribuidas de una forma bastante homogénea y las conexiones (más numerosas) de la fovea se distribuyen sobre una zona más amplia. La relación entre el área del CGL (o de la corteza visual primaria) y el área de la retina correspondiente a un grado del campo visual recibe el nombre de *factor de aumento*. (Kandel, 2001)

El CGL de los primates está formado por seis capas de neuronas, numeradas desde la seis, la más dorsal, hasta la uno, la más ventral. En el ser humano esta estratificación en seis capas se presenta de forma más compleja, y en conjunto el cuerpo geniculado adquiere la forma de un sombrero de tres picos (Fig. 2.12)

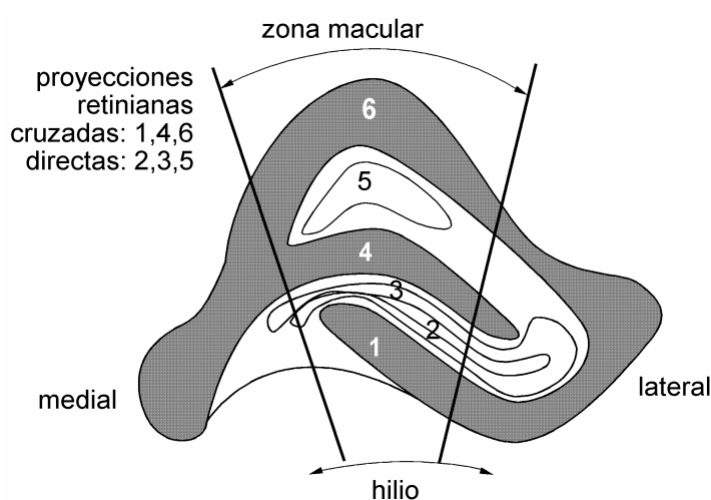


Figura 2.12. Cuerpo geniculado lateral humano (de Urtubia, 1997)

A cada lado, las capas 1, 4 y 6 reciben información del ojo contralateral, en tanto que las capas 2, 3 y 5 reciben información del ojo homolateral. En el cuerpo geniculado lateral se establece una segregación funcional de la información visual.

Las capas dorsales, 3, 4, 5 y 6 contienen células pequeñas ("parvus": pequeño), denominadas *parvocélulas*, mientras que las capas 1 y 2, ventrales, contienen células grandes ("magnus": grande) a veces de hasta 30 μ m de diámetro, llamadas *magnocélulas*.

- *Sistema magnocelular*. Las células ganglionares grandes (M) procedentes en su mayoría de la retina periférica, se proyectan a una zona amplia del cuerpo geniculado lateral, (si bien, principalmente a su porción magnocelular M) y constituyen el llamado *sistema magnocelular*, que se continúa en la capa 4 c alfa de la corteza visual primaria (área 17 o V1), la cual se proyecta a la capa 4 b de esa misma área. De aquí se proyecta directa o indirectamente al *área cortical temporal media (TM)*. Esta vía está relacionada con el bosquejo de la imagen y el movimiento.

- *Sistema parvocelular*. Las células ganglionares pequeñas (*ganglionares enanas*) (P) se proyectan a la porción parvocelular (P), y constituyen el *sistema parvocelular* que proyecta en la capa 4 c beta del córtex visual primaria (V1). Desde esta capa, proyecta hacia las capas II y III de V1 y también hacia una zona del área 18 denominada "corteza estriada pálida" (V2). Por fin, proyecta a las áreas V3 y V4. Esta vía está relacionada con el detalle y el color.

Respuesta fisiológica de las neuronas del CGL. Las mismas respuestas que dan las células ganglionares a estímulos cromáticos se encuentran en el CGL, cuyas neuronas, de las capas 3 a 6 son las capas parvocelulares. Las mismas respuestas a estímulos cromáticos se encuentran en el CGL, cuyas neuronas, de las capas 3 a 6 (parvocelulares), reciben entrada de señales de ganglionares P. De Valois, Abramov y Jacobs (1966) efectuaron varios estudios que esclarecieron la forma en que la información del color se codifica en el cuerpo geniculado lateral. Tomaron registros de células aisladas de mono, animal que presenta una excelente

percepción del color, mientras les presentaban doce diferentes destellos luminosos en secuencia, cada uno con diferente longitud de onda. Muchas de las células que probaron no daban respuesta diferencial a los distintos colores, pero muchas otras sí (75%), las denominadas *células espectrales oponentes*. Descubrieron cuatro tipos diferentes de estas células: una que inhibía su frecuencia de descarga al verde, pero la aumentaba al rojo (+R -V); otra la inhibía al rojo y la aumentaba al verde (+V -R); una tercera la inhibía al amarillo pero la aumentaba al azul (+A -Am); una cuarta la inhibía al azul, pero la aumentaba al amarillo (+Am -A).

Wiesel y Hubel (1966) estudiaron también las propiedades del campo receptor de las células del cuerpo geniculado lateral, para determinar si había solapamiento entre la codificación de la información espacial y la codificación de la calidad del estímulo. Presentaron luces de diferentes colores en diferentes lugares del campo receptor de algunas neuronas del cuerpo geniculado del mono, y descubrieron que algunas de éstas tenían una organización característica (centro-periferia). En ese momento, la célula no sólo respondía a la presencia de una luz en un lugar concreto del campo, sino también a su color. (Fig. 2.13).

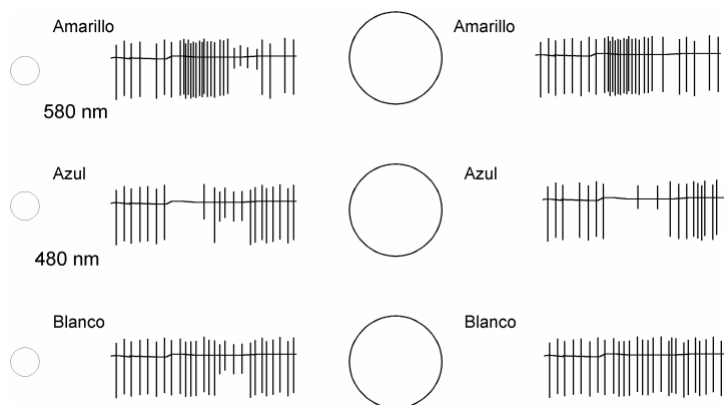


Figura 2.13 Registros celulares en neuronas de oponencia de colores en el cuerpo geniculado lateral del macaco. Una luz amarilla excita la célula. Una luz azul la inhibe y la luz blanca tiene poco efecto. La línea superior indica la duración de la iluminación (adaptado de Wiesel y Hubel, 1966)

Información de las vías parvo y magnocelular a la corteza visual. Las capas parvocelulares y magnocelulares del CGL se proyectan por separado en la corteza visual primaria. Esta espectacular segregación anatómica ha llevado a pensar que estas secuencias separadas de células ganglionares retinianas, geniculadas laterales y de la corteza visual, podrían corresponder a dos vías paralelas, a las que se denomina Vías M y P. Las diferencias entre las células de las vías P y M están muy definidas. En las células del CGL, la más importante de estas diferencias se refiere a su sensibilidad al *contraste cromático*. Las células P responden a los cambios de color (rojo/verde y azul/amarillo) con independencia de su luminosidad relativa, mientras que la respuesta de las células de las células M a los cambios de color es débil cuando la luminosidad es similar.

El *contraste de luminancia* es una medida de la diferencia entre las partes más iluminada y más oscura de un estímulo. Las células M responden cuando el contraste es tan sólo de un 2%, mientras que las células P rara vez responden a contrastes menores a un 10%. Ambos tipos de células se diferencian también por su respuesta a la frecuencia espacial y temporal. Aunque se tratarán estos conceptos en el capítulo siguiente, los resumiremos aquí brevemente. La *frecuencia espacial* es el número de repeticiones de un patrón a una distancia dada. Por ejemplo, la frecuencia espacial de la alternancia de franjas claras y oscuras 10 veces sobre un ángulo visual de un grado es de 10 ciclos por grado. La *frecuencia temporal* es la rapidez de los cambios de patrón en función del tiempo: si se iluminan y se apagan las franjas de una red 10 veces por segundo, se obtiene una frecuencia temporal de 10 Hz. La resolución espacial de las células M tiende a ser menor y su resolución temporal mayor que las resoluciones respectivas de las células P.

Para estudiar con más profundidad las contribuciones específicas de las vías P y M se ha recurrido a la eliminación selectiva de una u otra en monos y después

medir la capacidad del animal para llevar a cabo una tarea que se piense dependa de la vía concreta eliminada (Schiller y col., 1990 en Kandel 2001). Como las células M y P se encuentran en capas distintas del CGL es posible eliminar una de las vías infligiendo lesiones químicas localizadas (Fig 2.14).

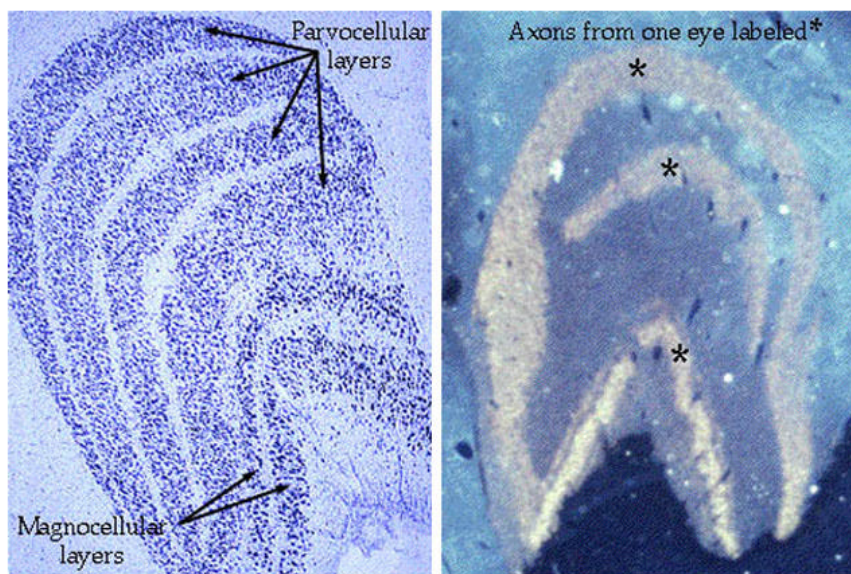


Figura 2.14 Localización de las parvo y magnocélulas en el cuerpo geniculado lateral de primate (de Schiller y col. 1990).

Los efectos de estas lesiones locales en la visión de los colores son espectaculares. La eliminación de las células P provoca la pérdida completa de la visión de los colores, lo que se explica por la sensibilidad de estas células al color (Fig 2.15 D). Las lesiones de las capas de células M no producen este tipo de déficit, lo que concuerda con la falta de sensibilidad al color de estas células. En el mono, las lesiones selectivas de las células M dificultan la percepción de un patrón de franjas claras y oscuras, tanto de frecuencia espacial baja (franjas más separadas) como de frecuencia temporal alta (mayor velocidad de encendido y apagado de las

franjas). Estos animales requieren un contraste de luminancia de las franjas claras y oscuras superior al necesario en los monos normales para que la discriminación sea posible (Fig 2.15 B,C). Las lesiones de las capas de células P producen el efecto opuesto, dificultando la discriminación entre los estímulos tanto de frecuencia espacial alta (franjas más juntas) como de frecuencia temporal baja (menor frecuencia de encendido y apagado de las franjas).

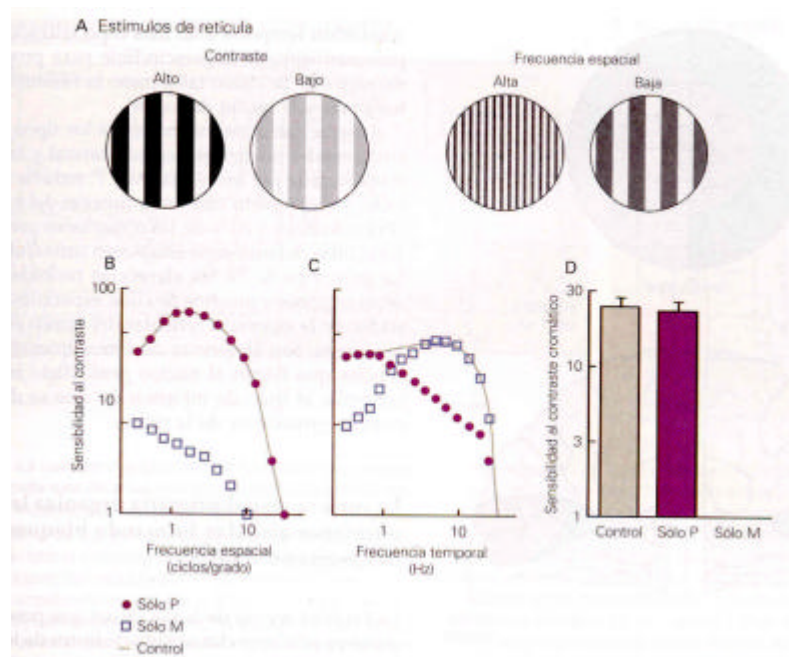


Figura 2.15 Pérdidas visuales tras la provocación de lesiones selectivas de las capas magnocelular y parvocelular del cuerpo geniculado lateral del mono (de Kandel, 2001).

Podemos concluir por tanto, que las células P son esenciales para la visión en color y las más importantes para la visión que requiere una resolución espacial alta y una resolución temporal baja. Las células M contribuyen sobre todo a la visión que requiere una resolución espacial baja y una resolución temporal alta. Esta especialización es fundamental para propiedades de la visión en color como son su resolución espacial y temporal.

2.4.4 Codificación del color en la corteza visual

Corteza cerebral. El *córtex* o *corteza cerebral*, un logro de la evolución, es uno de los capítulos con mayor éxito en la historia de los seres vivos. Se ha calculado que posee unas 10^{10} neuronas, algo más del 90% de todas las del sistema nervioso. Los cuerpos neuronales se disponen en 6 capas celulares numerándose desde la más externa a la más interna. Alternativamente estas capas son pobres y ricas en células. A lo largo del siglo XIX y principios del XX, se cartografió bien la corteza y se vio que según la zona funcional, la estructura de las capas variaba ligeramente en cuanto al contenido celular. Un hallazgo notable de la organización cortical, fue el reconocimiento de la subdivisión en zonas con funciones muy diferentes, dotadas de una tendencia a la cartografía ordenada. El número de tales zonas ha sido motivo de gran especulación. Los anatomistas, han propuesto un número amplio de regiones o áreas (Von Economo, 109; Vogt, 200), mientras que el de los fisiólogos ha sido algo más modesto (Campbell, 20; Brodmann 52). Hoy día se acepta la subdivisión en las 52 áreas funcionales propuestas por Brodmann en 1909 (Fig 2.16).

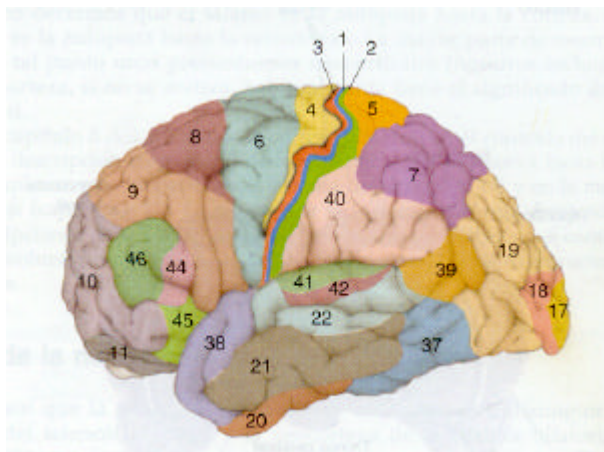


Figura 2.16 Áreas cerebrales según las definió y numeró Korbinian Brodmann en 1909 (de Bear, 1998).

La noción básica a considerar, es que la información sobre cualquier modalidad sensorial, se transmite primero a una zona o *área cortical primaria*, y desde allí, directamente o a través del tálamo, a una serie de zonas superiores o *áreas de asociación*. Respecto a la visión, según Brodmann, el área visual primaria es el área 17 y las de asociación visual las áreas 18 y 19.

Estructura histológica de la corteza visual primaria. La corteza visual se caracteriza por una marcada estratificación orientada paralelamente a la superficie cortical, y es más delgada (1,5 cm aproximadamente) que otras áreas corticales, porque, aunque en este caso sea mayor la población celular, el espacio intercelular es más reducido. Esta zona de la corteza recibe el nombre de *área o corteza estriada*, debido al grosor excepcional de la cuarta capa cortical (capa IV), que es el lugar donde precisamente terminan los axones de las células del cuerpo geniculado lateral. En la capa IV hay una banda de sustancia blanca que la subdivide en dos partes (IVa y IVc). Esta banda intermedia (IVb), constituye la *estria de Gennari-Vick d'Azir* (Fig. 2.17). Numerosas conexiones unen el área 17 con las *áreas preestriadas* (18 y 19) o *áreas de asociación visual (áreas visuales secundarias)*.

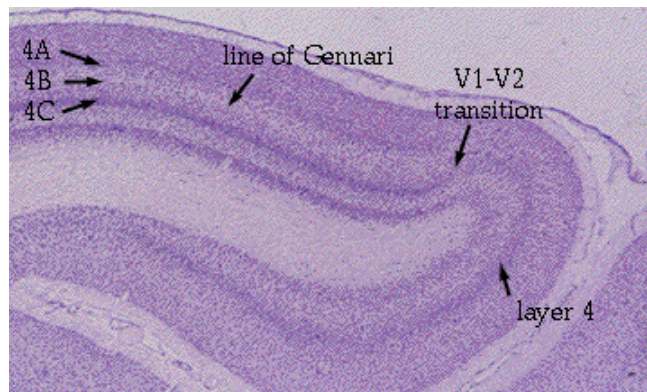


Figura 2.17. Corte histológico de la corteza visual primaria en el primate. Se aprecia a simple vista la estria de Gennari (deHubel y Wiesel 1977; en Kolb y Fernández, 2002).

Del mismo modo que los axones de las células ganglionares proyectan una representación espacial precisa de la retina sobre el cuerpo geniculado lateral, éste proyecta una representación similar, punto por punto, sobre la corteza visual. Como el resto de la neocorteza, la corteza visual se estratifica en seis capas y varias subcapas que han sido numeradas desde el exterior al interior según: I, II, IIIa, IIIb, IVa, IVb, IVc alfa, IVc beta, Va, Vb, VI. Los axones de las neuronas del cuerpo geniculado lateral terminan sobre las células piramidales de la capa IV, concretamente en su zona más profunda, la subcapa IVc. Los axones de la porción magnocelular, 1 y 2 (M) del cuerpo geniculado terminan más superficialmente en la capa anterior, en la capa IV c alfa y además en la capa VI. Los axones de la porción parvocelular, 3,4,5, y 6 (P), lo hacen en su porción más profunda o IV a, IV c beta y además en la capa VI.

Glóbulos, gotas o burbujas. Excepto en la IV, las demás capas de la corteza visual contienen grupos de células de casi 0,2 mm de diámetro que, a diferencia de las células vecinas, contienen una elevada concentración del enzima mitocondrial *citocromo oxidasa*, lo que indica un elevado metabolismo.

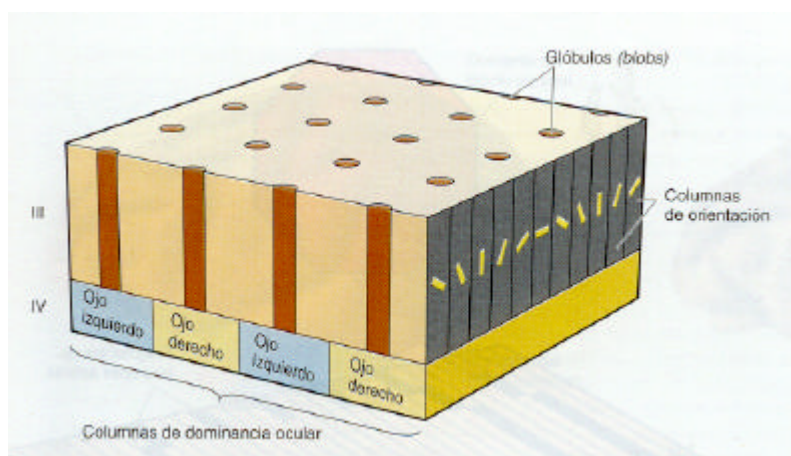


Figura 2.18. Esquema de una hipercolumna o módulo que incluye los "glóbulos". Se muestran asimismo las diferentes proyecciones de las células del CGL (adaptado de Hubel y Livingstone 1983, en Bear 1998).

Los estudios de Hubel y Livingstone (1983) pusieron de manifiesto que la tinción de la citocromooxidasa daba lugar a un patrón punteado de columnas oscuras que se extendían a lo largo de las capa II y III y más vagamente de las capas V y VI (Fig. 2.18). A estos grupos celulares se les ha denominado glóbulos, burbujas, o gotas, del inglés “pegs” o “blobs”, dado que sus límites no están bien definidos. Las zonas entre estos bloques (aproximadamente 0,5 mm) se denominan regiones interglóbulos o interburbujas. En los primates, las células del CGL contactan en primer lugar con células estrelladas. Las células estrelladas de la capa IVc beta se proyectan básicamente a la capa III.

Parece probable que las regiones de glóbulos y de interglóbulos reciban aferencia de subpoblaciones separadas de la capa IVc beta (continuación del parvosistema). Las células de los glóbulos se caracterizan funcionalmente por no responder a estímulos con orientación definida. Un 70 % responden selectivamente a diferentes longitudes de onda, por lo que codifican el color (Livingstone y Hubel, 1988). Sus campos receptores son circulares y concéntricos. Las neuronas de las regiones interglóbulos responden mayoritariamente a estímulos selectivos a la orientación y a la dirección, si bien, algunas células localizadas en los límites con las burbujas parecen responder además a estímulos cromáticos. Los módulos de Hubel y Wiesel (1979) se corresponden con al menos 12 glóbulos. Los glóbulos tienden a ubicarse en el centro de las columnas de dominancia ocular.

Corteza visual circunstriada o de asociación (áreas visuales de asociación). La percepción global de la escena visual no se localiza en la corteza estriada (V1). Además, envía diferentes tipos de información a diferentes regiones de la corteza visual de asociación, cada una de las cuales contiene como mínimo un mapa del campo visual. Así pues, para que se produzca una percepción total de la escena, esta información de los módulos funcionales individuales de V1 debe ser combinada. Esta combinación se produce en la *corteza visual de asociación*. Esta

corteza de asociación se extiende en parte alrededor de la corteza estriada (*corteza preestriada o circunstriada*), en una pequeña porción del lóbulo temporal (*corteza temporal inferior*) y, además, a determinadas regiones de la *corteza parietal*.

División funcional de la corteza circunstriada. Las neuronas de la corteza estriada envían axones a otras regiones de la corteza, y en primer lugar, al primer nivel de la corteza visual de asociación, la *corteza preestriada*. Aunque anatómicamente se sitúe por "delante" de la corteza estriada, el hecho de que el análisis de la información se efectúe "después" del que realiza la corteza estriada, ha hecho que algunos autores se refieran a ella como *corteza circunstriada*. La mayor parte de las investigaciones en la corteza circunstriada han sido realizadas por el equipo de Semir Zeki en el decenio de 1978 a 1988, en paralelo a las de Margaret Livingstone y David Hubel aproximadamente en el mismo período. Actualmente, la corteza estriada (área 17) se denomina V1, ya que es la única zona cortical donde proyecta el cuerpo geniculado lateral dorsal. Las neuronas de V1 envían axones a tres regiones de la corteza circunstriada, denominadas en relación con aquella, *áreas V2, V3 y V5* (Zeki, 1980, 1988). Además otra región de la corteza circunstriada, el *área V3A*, recibe proyecciones de las neuronas de V3, pero no directamente de V1. Otra área, la *V4*, recibe influjo de la V2, pero no directamente de la V1.

Cada una de estas cinco áreas, *V2, V3, V3A, V4 y V5* (Fig 2.19), contiene una o más representaciones del campo visual. Según sus conexiones con las neuronas de V1, o de algunas de ellas a otras, sus neuronas van a responder a rasgos diferentes de la escena visual. Recordemos que las células ganglionares (M) o parasol proyectan a las capas magnocelulares del cuerpo geniculado lateral dorsal y las enanas (P) proyectan a las capas parvocelulares. A su vez, las magnocélulas y las parvocélulas proyectan a diferentes capas de la corteza estriada (V1). Esta

diferenciación de los sistemas magno y parvocelular continúa hasta la corteza circunstriada (Zeki, 1992).

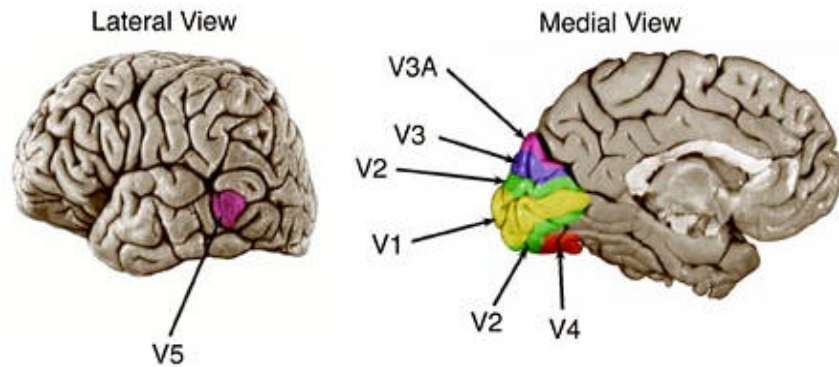


Figura 2.19. Localización del área visual primaria (V1) y de otras áreas del procesamiento de la información visual (V2, V3, V3 a, V4 y V5) en la corteza visual humana de Zeki (2002).

Según Zeki el esquema funcional de la corteza visual circunstriada es el siguiente:

- *Segregación funcional en V2.* Empleando la técnica de la *citocromooxidasa*, varios investigadores revelaron la presencia de bandas delgadas y gruesas en el *área V2*. La porción de corteza circunstriada denominada *V2*, aparece diferenciada en tres tipos de estrías: unas *oscuras*, que según su anchura se denominan *gruesas (anchas)*, y otras *delgadas (finas)*, que están separadas por unas bandas de anchura uniforme *claras (pálidas)*. Como pusieron de manifiesto Livingstone y Hubel (1987), las características de las regiones del *área V2* son muy diversas. Las neuronas de los glóbulos proyectan a las bandas finas, y las de la la capa IV b a las bandas gruesas. Las bandas claras reciben proyección de las regiones interglóbulos. A su vez, las bandas gruesas proyectan en *V3* o en *V5*. Las bandas finas lo hacen a *V4*, donde asimismo proyectan las bandas claras. Esta separación anatómica supondrá una organización funcional en la corteza, que separa en principio los diversos aspectos de la información visual.

- *Análisis de la forma dinámica en V3.* El área V3 es continuación del sistema magnocelular y es posible que realice el análisis de la forma dinámica. Recibe influjo de la capa IVb de la corteza estriada y de las bandas gruesas de V2. Sus neuronas son sensibles a la orientación, pero no al color.

- *Análisis cromático en V4. Sistema cromático puro (color e intensidad luminosa).* Según Zeki (1980), el área V4 parece estar especializada en la percepción del color. Recibe influjo de las bandas delgadas del área V2 y muchas de sus células son selectivas para la longitud de onda. *Sistema de la forma asociada al color.* Pero recibe asimismo influjo de las regiones entre bandas del área V2 (bandas claras) y algunas neuronas muestran sensibilidad a la orientación (Zeki y Shipp, 1988). Parece, pues, que esta región analiza asimismo la forma asociada al color.

- *Análisis del movimiento en V5.* El área V5 (*MT*) se localiza en la ladera posterior del *surco temporal superior* y está especializada en el análisis del movimiento. Esta región recibe influjo únicamente del *sistema magnocelular*. Por su central importancia en el tema que se está tratando haré un apartado propio para la misma.

Corteza temporal inferior (inferotemporal o IT). En primates las ejecuciones que realiza la corteza preestriada son aún un grado intermedio del análisis visual. Su grado más elevado, que corresponde a los patrones visuales y a la identificación de los objetos particulares, parece tener lugar en la *corteza temporal inferior*, que se localiza en la mitad ventral del lóbulo temporal, que se denomina *circunvolución temporal inferior*. Es muy probable que sea en esta región donde converjan los análisis de forma, color, movimiento y profundidad. Sus células parecen responder ante formas que el individuo ha conocido previamente (formas familiares) como el reconocimiento de las caras.

Corteza parietal posterior (CPP). Las áreas V3, V4 y V5 envían información

además de a la circunvolución temporal, a la *corteza parietal posterior*. Esta región parece estar involucrada en la percepción espacial, al recibir influjo a través de dichas conexiones. Las lesiones en el lóbulo parietal impiden la ejecución de tareas que requieren la percepción y el recuerdo de la localización de los objetos.

Células oponentes dobles. En la corteza visual las células con oponencia de color tienen unas propiedades de respuesta al color más matizadas que en la retina y cuerpo geniculado. Responden a la vez excitándose para una determinada longitud de onda e inhibiéndose para la longitud de onda opuesta tanto en el centro como en la periferia aunque de forma antagónica. Se distinguen:

- *Células oponentes dobles sin eje de orientación*. En las *burbujas* de la corteza estriada (V1) se halla un tipo neuronal con campo receptor circular concéntrico, de respuesta más compleja a luces monocromáticas: se denominan *opponentes dobles*. Michael (1987) sugiere que estas células reciben proyección de células estrelladas espinosas de la capa IV c beta, que son asimismo células *opponentes dobles*. Se excitan si en su centro incide un haz de luz de onda larga, se inhiben si el haz es de onda media, y dan las respuestas antagónicas para haces anulares de esas longitudes de onda en su periferia. Otro tipo dará las respuestas exactamente contrarias. Su estímulo óptimo es centro rojo con fondo verde o viceversa. El campo receptor combina oponencia de color en el centro y contraste en periferia. Estas neuronas carecen de eje de orientación (Fig. 2.20).

Estas células desempeñan un importante papel en la percepción del *contraste simultáneo*. Una situación en la que no hay contraste, como un pequeño disco rojo sobre fondo rojo, daría una respuesta mínima o nula, pues el centro R^+ quedaría anulado con la periferia R^- . Pero si existe un marcado contraste, como en el caso de que un disco rojo esté rodeado de fondo verde, la respuesta será máxima, ya que a la excitación del centro R^+ , se sumará la de la periferia V^+ . Perceptivamente,

al rodear el rojo con verde se crea un amplio efecto de contraste simultáneo, y el rojo aparece como más brillante y saturado que si el fondo fuera blanco o gris.

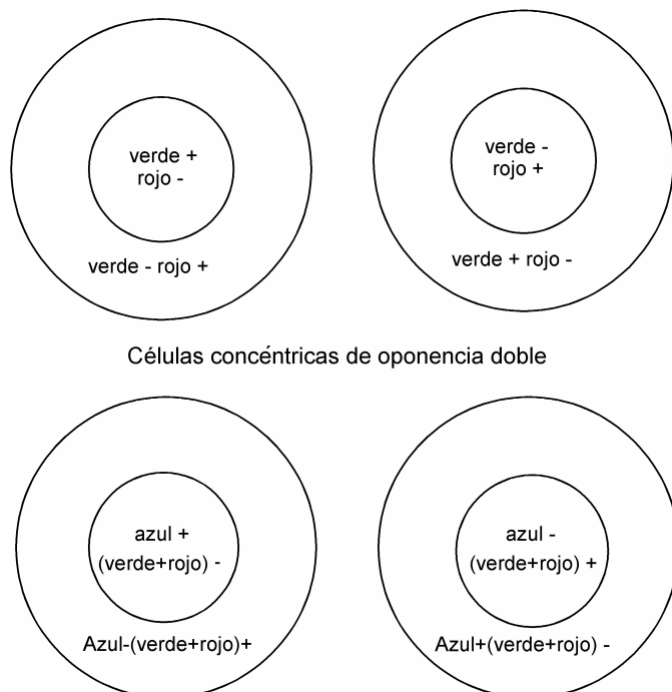


Figura 2.20 Células oponentes dobles sin eje específico de orientación. Su campo receptor combina oponencia de color en el centro y contraste cromático en la periferia (de Urtubia, 1997).

- Células oponentes dobles con eje específico de orientación. Se han encontrado algunas en V1 en las regiones interburbujas que limitan con burbujas, sobre todo en las capas II y III (células simples y complejas) si bien, en la región interburbujas la gran mayoría son selectivas a la orientación pero no responden al color (sistema de percepción de la forma) (Fig. 2.21). Este tipo celular se ha localizado especialmente en V2 y V4, y se supone que reciben aferencias de varias oponentes dobles con campos receptores concéntricos. Corresponden, por tanto, a las

neuronas complejas de V2 y sobre todo de V4, lo que parece indicar que V4 es el área cerebral especializada en el procesamiento de la información relacionada con la forma asociada al color.

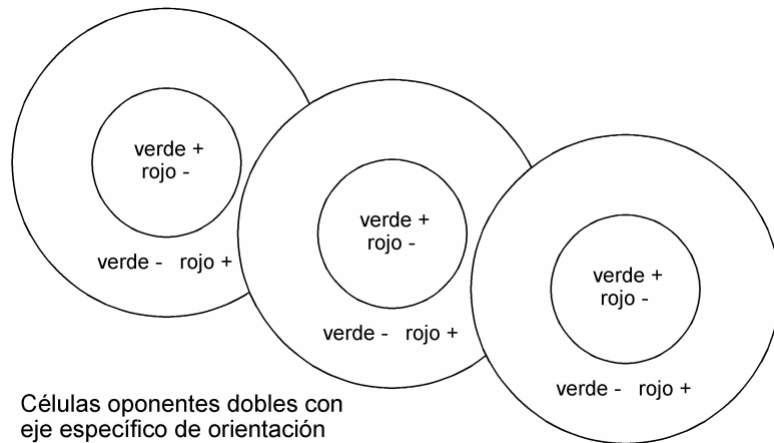


Figura 2.21 Células de oponencia de color con eje específico de orientación. Sus campos receptores quedarían configurados a partir de secuencias rectilíneas de células concéntricas de doble oponencia (de Urtubia, 1997).

Las células oponentes dobles detectan diferencias entre la intensidad de luz de una determinada longitud de onda procedente de una parte del campo receptor, en relación con la que procede de la periferia, pero únicamente para regiones limitadas del campo visual, ya que su campo receptor es muy pequeño.

2.4.5 Teoría *retinex*

Edwind Land ha propuesto la más ambiciosa teoría acerca de la percepción cromática, que no sólo explica la constancia de color, a pesar de los cambios en la composición espectral de la luz que ilumina los objetos del campo visual, sino que resalta la importancia del fondo en la determinación del color de un objeto. La

teoría fue denominada por su autor *retinex* (Land, 1964), de “retina más cortex”, al querer enfatizar el autor los procesos psicológicos que tienen lugar en estructuras neuronales superiores para la percepción del color. Esta teoría ha recibido un fuerte apoyo con los resultados obtenidos al analizar respuestas neuronales de regiones de la corteza cerebral (V1-V2-V4) por Zeki (1980), Zeki y Shipp (1988) Lüeck y col. (1989). Las células de esta región cerebral presentan sensibilidades máximas para una gama mucho más amplia que las respuestas a los tres colores básicos de los conos de la retina (Fig. 2.22).

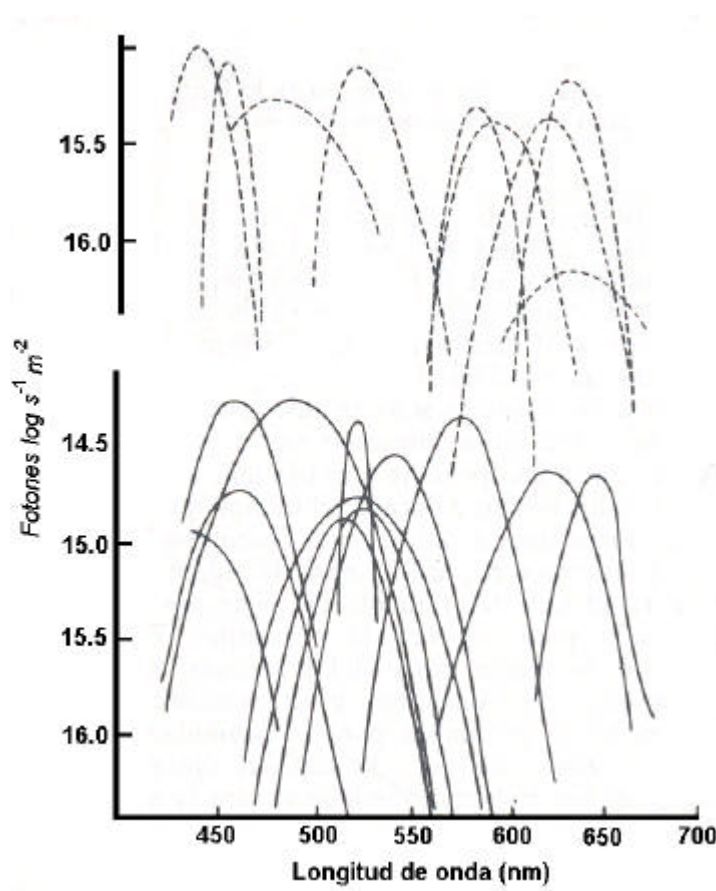


Figura 2.22 Respuestas a varias longitudes de onda en el área V4 (de Zeki, 1980)

La riqueza de la percepción cromática aumenta mucho si el campo visual tiene detalles abundantes de forma y color. Land (1959) probó esto fotografiando en blanco y negro un conjunto de objetos coloreados por duplicado, una vez a través de un filtro rojo y la otra a través de uno verde. Las diapositivas resultantes, en blanco y negro, diferían únicamente en el grado de sombreado de algunas zonas. A continuación se proyectaron las dos diapositivas simultáneamente, haciendo que las dos imágenes se superpusieran exactamente en una pantalla. La imagen filtrada con rojo se proyectó a través del mismo filtro, mostrando sombras rojas y negras. La imagen filtrada con verde se proyectó sin ningún filtro. Cuando se superpusieron las dos imágenes, la escena apareció aproximadamente con sus colores originales, cuando se esperaba percibir tonos rojos más o menos saturados.

Constancia del color. Cuando investigaba la iluminación para el desarrollo de la cámara "polaroid", Land observó que al cambiar la luz con que iluminaba una escena, variaban los colores de una fotografía en color que tomaba con la cámara, pero no se alteraban los colores de la escena para un observador que la viera con esos mismos cambios de luz. El fenómeno se denomina constancia del color, y aún hoy día no se le ha dado una explicación completamente satisfactoria.

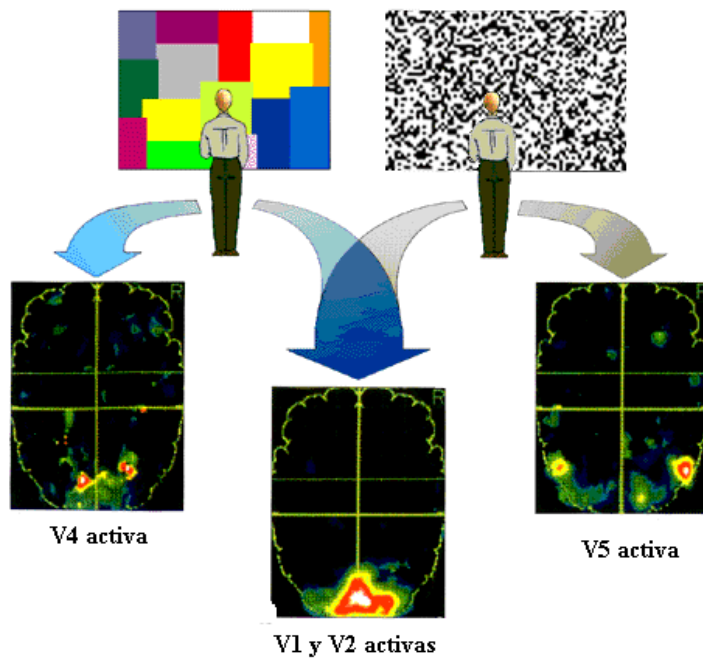
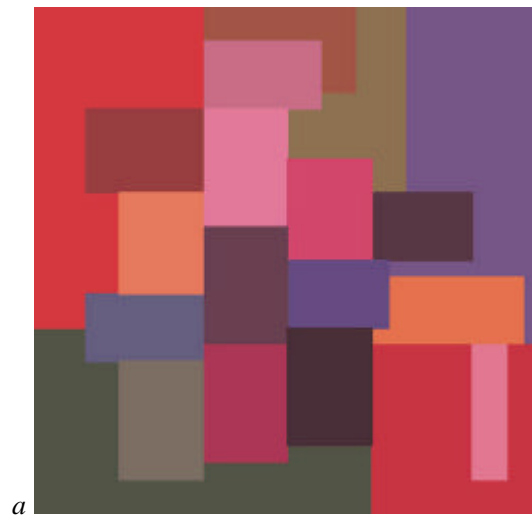
Se supone que el cerebro procesa el color global de la escena a partir de todos sus colores particulares. El mecanismo ha resultado ser más sencillo cuando se conoce que algunas zonas de la escena son blancas. A partir de la información del tono global de color, el cerebro "ajusta matemáticamente" el color cambiado del haz luminoso. No se conoce de forma precisa el mecanismo neural que realiza este ajuste (Hurlbert, 1999). Biológicamente tiene un valor importante, ya que muchos animales deben distinguir su alimento de las plantas venenosas tanto a plena luz del día con una viva luz blanca, como cuando inciden sobre ellas los tonos anaranjados crepusculares.

2.4.6 El centro cerebral del color o Area V4

En el área V4 se encuentra una gran concentración de células selectivas para el color, algunas de las cuales son también selectivas a la orientación, lo que indica que V4 es el área cerebral especializada en el procesamiento de la información de la *forma* asociada al *color*. Esta zona fue denominada el “centro cerebral del color” en atención a un pionero autor del siglo XIX (el oftalmólogo suizo Louis Verrier, quien publicó un único caso de acromatopsia cerebral en 1888), que había propuesto empíricamente su existencia, pero que no emprendió ningún tipo de investigación en ese sentido (Urtubia y Garriga, 2002).

Semir Zeki (1980), Zeki y Shipp (1988), Lueck y col. (1989) mediante electrofisiología en la corteza visual de macaco y Mc Keefry y Zeki (1997); Zeki (2000); mediante fMRI en humanos, confirmaron datos psicofísicos de Land (1977, 1983, 1986), utilizando como estímulo luminoso superficies coloreadas al estilo del pintor Pieter Mondrian (Fig. 2.23).

Zeki en 1980, utilizando un procedimiento ideado por Land, demostró espectacularmente el papel del área V4 en la percepción cromática. Después de localizar una neurona del área V4 que respondía a la luz roja, situó un panel tipo Mondrian delante de un mono. Ajustó las posiciones de manera que uno de los rectángulos de color rojo caía dentro del campo receptor de la neurona. Ésta respondía. Luego iluminó el panel con luz roja. Bajo estas condiciones el rectángulo rojo pierde su apariencia de color rojo vivo para un observador humano. Pero en esta condición, aunque su campo estaba inundado de luz roja, la neurona no respondía. Del mismo modo, la neurona tampoco respondía cuando se iluminaba el panel de exposición con luz verde o azul. Sólo cuando se proyectaban los tres colores sobre el panel (simulando luz blanca) la neurona respondía. La respuesta de la neurona de V4 se correlaciona así con la percepción



b

Fig 2.23 a) Optotipo en forma de cuadro del estilo del pintor Mondrian. b) Observador de un optotipo tipo Mondrian, y de unos puntos al azar en movimiento. Cuando se observa el cuadro de la izquierda se activa el área V4, cuando se observa el optotipo en movimiento de la derecha se activa V5. Sin embargo observando cualquiera de los dos se activan las áreas V1 y V2 que no son específicas (de Zeki, 1995).

del color rojo y no simplemente con la presencia de una longitud de onda determinada (Fig. 2.24).

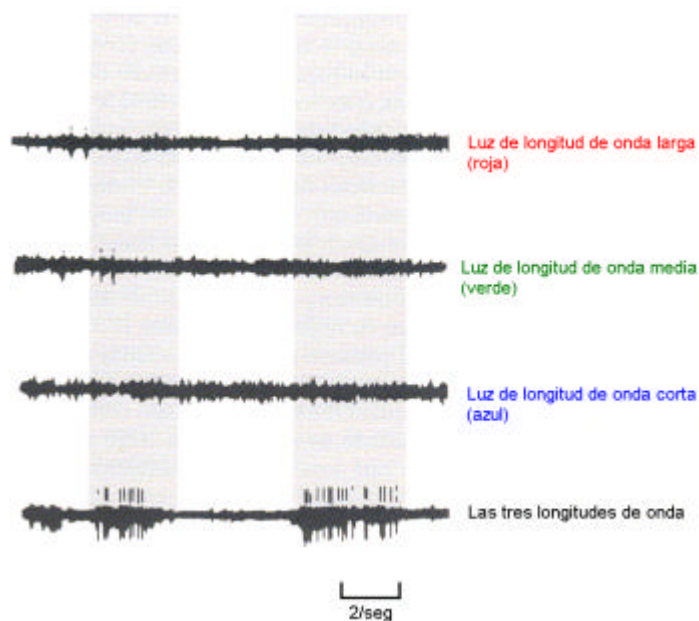


Figura 2.24. Respuesta de una neurona del área V4 de la corteza visual del mono Rhesus, cuyo campo receptor incluía un rectángulo de color rojo dentro de un panel Mondrian multicolor, cuando todo el panel fue iluminado con luz roja, verde o azul, o con todas ellas a la vez (de Zeki, 1980)

Zeki y sus colaboradores, después de estudios en los macacos, localizaron este “centro cerebral del color” en una zona lateral del cerebro humano, denominado *giro fusiforme*. El campo visual superior estaría representado en la zona mediana de dicho giro mientras que el campo visual inferior lo estaría más lateralmente. Zeki y Bartels (1999); Bartels y Zeki (2000) y Moutoussis y Zeki (2002) demostraron que la región definida previamente como “centro cerebral del color” consiste en dos subdivisiones: una posterior, que denominaron V4 y una anterior a la que a su vez denominaron como V4a formando ambas parte del *complejo V4* (Fig. 2.25).

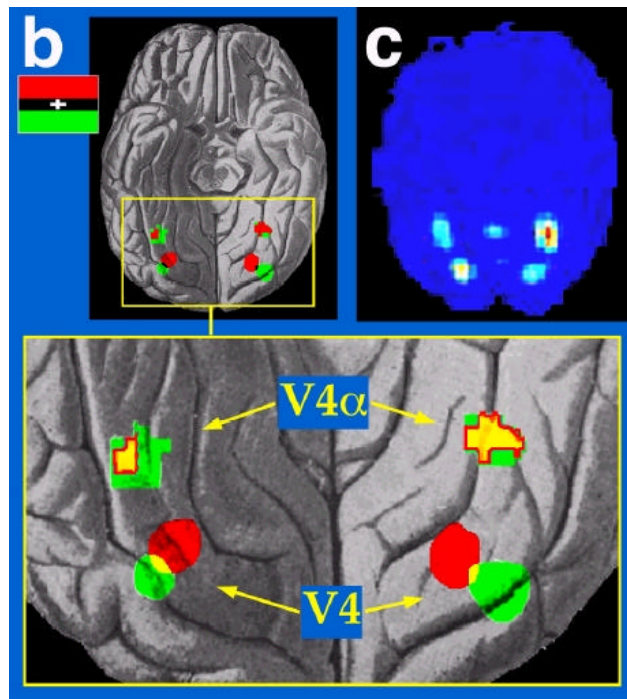


Figura 2.25 Localización del centro cerebral del color y su subdivisión en dos zonas en el ser humano (de Bartels y Zeki, 2000)

Estos investigadores demostraron que el color de una superficie en una escena compleja no depende tan sólo de la λ predominantemente reflejada, sino que el cerebro la compara con las λ reflejadas por su entorno. Ello requiere que la representación punto por punto desde la retina a V1 se amplíe de forma que las neuronas cromáticas puedan ser influidas por información procedente de áreas más grandes del campo visual. Definieron tres nuevas cualidades de la percepción cromática: a) Si bien el color de una superficie depende de la composición en longitudes de onda de la luz reflejada, no hay una relación simple entre tal composición y su color. b) En una escena compleja, la predominancia de luz de una determinada longitud de onda reflejada de una superficie, por sí sola, no determina su color. c) El color de una superficie es determinado también por la composición en longitudes de onda de la luz reflejada por su entorno (Zeki, 1992).

Se sabe, por otra parte, que la mayor parte del campo visual está representado en las áreas V1, V2, V3 y V5. Sin embargo, la representación en V4 es mayoritaria para los 30° centrales del mismo, lo cual subraya la importancia de los campos centrales para la visión del color y el descenso de la agudeza cromática con la visión periférica. Land (1986) demostró que presentando a un hemisferio el estímulo de una superficie de un Mondrian sin luz procedente del resto de las superficies (que no da la sensación de color), y la periferia en el otro hemisferio, con una separación de 3,7°, se produce la percepción de color. Sin embargo, si el experimento se repite en sujetos con lesión del cuerpo calloso, la síntesis no se produce. Se debe a que V4 es la única región que tiene conexiones a través del cuerpo calloso hasta 5°, a ambos lados del meridiano vertical (Fig. 2.26).

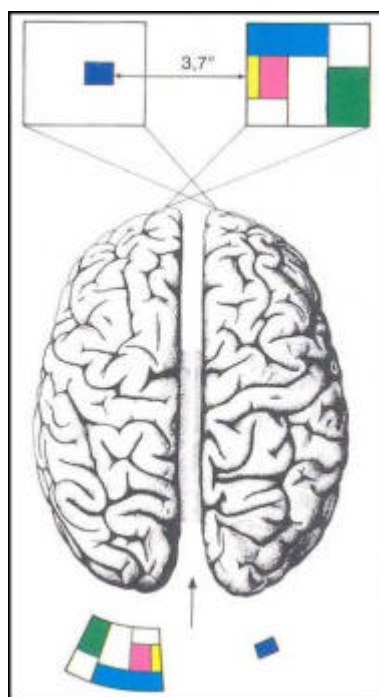


Figura 2.26. Esquema del experimento de Land realizado con individuos que tenían disfunción del cuerpo calloso.(de Zeki, 1995)

2.4.7 Integración final de la información visual

Zeki (1988), a partir de los datos anatómicos de Livingstone y Hubel (1987,1988) y de sus propias experiencias electrofisiológicas (Zeki 1988; Zeki y Moutoussis, 1997; Zeki y Marini, 1998; Zeki, 2000) propuso la existencia de cuatro sistemas de procesamiento de la información visual: uno para el color, otro para el movimiento, cada uno de ellos relacionado además con un subsistema de la percepción de la forma.

No obstante, este esquema conceptual que se ilustra en la figura 2.27 no es del todo estricto, ya que algunas investigaciones recientes aportan datos contradictorios respecto a la especialización precisa de las áreas visuales.

a) *Sistema cromático puro: Parvosistema---V1(capa IV c beta---burbujas)---V2(bandas finas)---V4---corteza íferotemporal.* El otro subsistema, masivamente desde la IV c beta y escasamente desde las interláminas del CGL (*koniocelular*), proyecta en las propias burbujas, donde las células presentan cromoselectividad, pero no responden a la orientación del estímulo. Proyectan a las bandas oscuras finas de V2 y de allí a V4, cuyas células responden selectivamente a la longitud de onda y al contraste cromático. Su función es la *percepción cromática pura*, (detalle en la cualidad cromática).

b) *Sistema de la forma asociada al color: Parvosistema---V1 (capa IV c beta---interburbujas)---V2 (bandas claras)---V4---corteza íferotemporal.* Las neuronas de la capa IV c beta proyectan a la zona interburbujas. Conduce información altamente resolutive sobre los límites constituidos por contrastes de luminosidad. Aunque las neuronas de los primeros estadios de este sistema son selectivas al color, las de los niveles superiores responden a los límites generados por contrastes, pero no llevan información sobre qué colores definen el límite

(contraste acromático). Tampoco responden a direcciones particulares de movimiento. Proyectan a las bandas claras de V2 y desde allí a V4. Dado que gran parte de la información sobre la forma de los objetos puede representarse por sus límites o bordes, puede concluirse que el parvosistema-interburbujas-bandas claras participa en la *percepción de la forma asociada al color*. Su función será el reconocimiento de letras (lectura), determinar la textura de las superficies y, en definitiva, descifrar "qué" es el objeto y su significado.

c) *Sistema de movimiento, estereopsis y localización espacial: Magnosistema---VI (capa IVc alfa-capa IV b)---bandas gruesas---V5 (MT)-corteza parietal posterior; además: VI (IV b)---V5---corteza parietal posterior*. Las neuronas de la capa IV c alfa proyectan a IV b. La mayoría son células simples, con respuesta a la orientación y no selectivas para el color. Las células de la capa IV b tienen campos receptores similares a las de la IV c alfa, pero muchas de ellas son selectivas a la dirección.

Las neuronas de este sistema tienen una resolución temporal muy rápida, pero sus respuestas son fásicas, y decaen inmediatamente aunque se mantenga el estímulo. Estas células no presentan cromoselectividad. Las células de IV b proyectan en las *bandas gruesas*, que muestran selectividad a la orientación. Por otra parte, en su mayor parte manifiestan una enérgica respuesta a las variaciones de *disparidad retiniana*, por lo que deben desempeñar un papel relevante en la estereopsis.

Esta vía analiza las posiciones de objetos en tres dimensiones de las coordenadas alrededor del cuerpo. Además, describe dónde se encuentra el objeto en cada instante y si se está moviendo. En el límite de la corteza parietal posterior (corteza parietooccipital), las señales se solapan con señales procedentes de las áreas posteriores de asociación somática, que analizan la forma y los aspectos tridimensionales de las señales sensoriales somáticas.

d) Sistema de la forma dinámica. Magnosistema---V1 (capa IVc alfa---capa IV b)---V2 (bandas gruesas)---V3---V3 a---corteza íferotemporal. Además: V1 (IV b)---V3---V3 a---corteza íferotemporal. Se ocupa de la percepción de la forma de los objetos en movimiento. Es decir de "qué" son los objetos que se están moviendo. La mayoría de sus neuronas no son sensibles al color, y sí a la dirección y orientación. El hecho de que una cantidad significativa de estas neuronas responda al color, entra en contradicción con el esquema de Zeki.

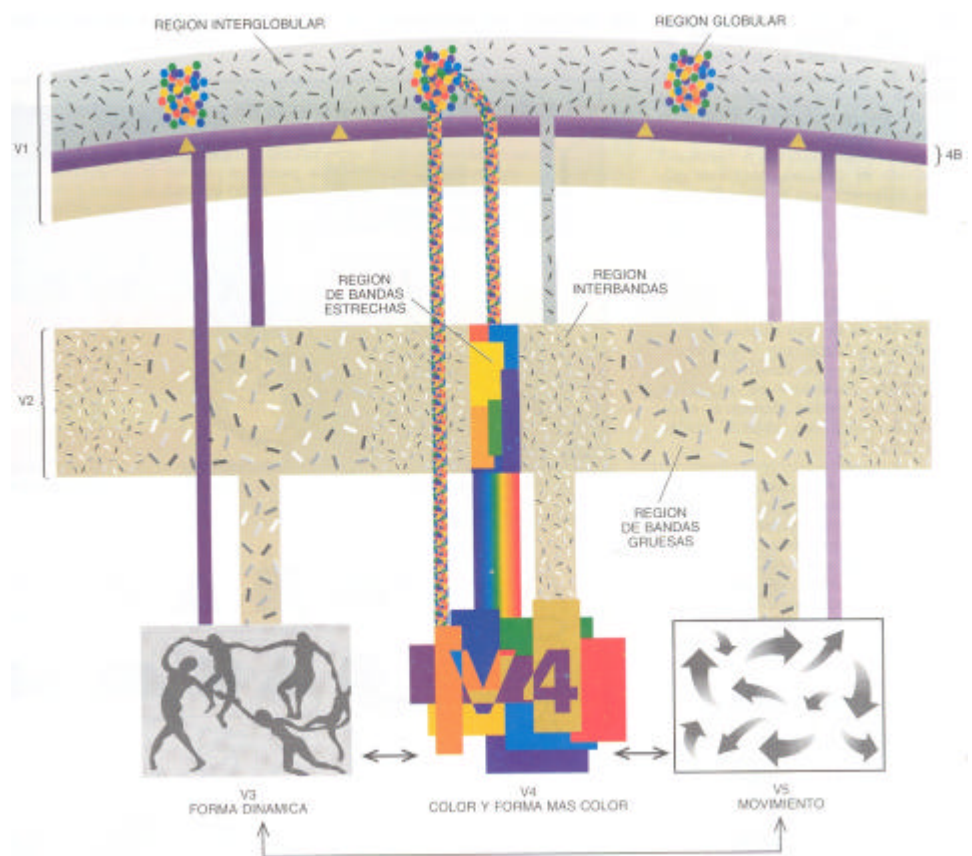


Fig. 2.27. Vías parvo y magnocelulares desde la retina y CGL a través de V1 y V2 hasta las áreas V3, V4, V5 e IT. de Zeki, 1992).

2.4.8 Sistemas parvo y magnocelular y percepción cromática

Según se acaba de exponer, a partir de la corteza estriada (V1) el proceso visual puede ser dividido en dos grandes corrientes: La *corriente dorsal*, dominada por las neuronas que continúan el sistema magnocelular, especializadas en percibir el movimiento. Está destinado al control de los movimientos del ojo y asciende por los giros supramarginal y angular hasta la corteza parietal posterior. La *corriente ventral*, está especializada en la identificación de la forma y desciende para proyectar en la corteza íferotemporal (Fig. 2.28). Hasta hace poco los investigadores creían que la corriente dorsal recibía su información exclusivamente del sistema magnocelular y la ventral del parvocelular, pero las investigaciones de Maunsell en 1992 demostraron que si bien la corriente dorsal recibe preferentemente impulsos magnocelulares, la ventral recibe influjo prácticamente similar de ambos sistemas (Carlson, 2000).

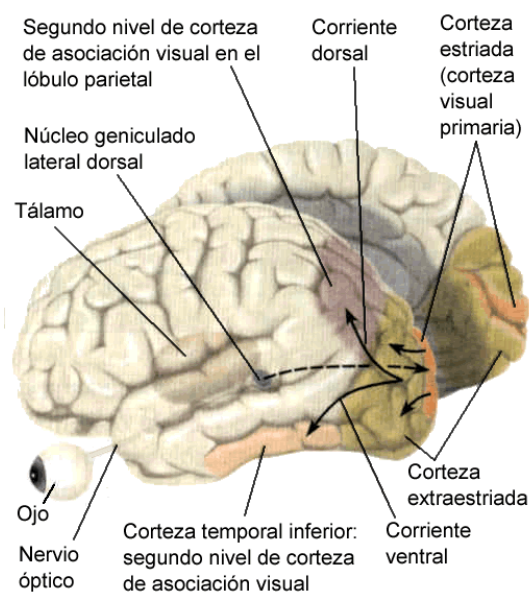


Figura 2.28 Las dos corrientes que conducen la señal visual en el cerebro (de Carlson, 2000).

El *sistema magnocelular*, evolutivamente más antiguo, se halla en todos los mamíferos y está relacionado con la forma, el movimiento y la profundidad. El *sistema parvocelular*, exclusivo de los primates, está involucrado en la percepción cromática y en el análisis fino de la imagen. El sistema visual de los primates, además de la discriminación de la profundidad y el relieve, o el movimiento, puede discriminar matices de color y detalles precisos que no discriminan otros mamíferos (Dacey, 2000). Una ventaja evolutiva, en este sentido, es la distinción de una fruta madura de una verde y de las propias hojas verdes del árbol. Varios autores han propuesto una coevolución del color de los frutos de algunos árboles y del sistema tricromático de los primates.

Livingstone y Hubel (1988) demostraron la independencia de estos dos sistemas en humanos, al observar que las personas no pueden percibir el movimiento o la profundidad utilizando únicamente señales de color. Así, una figura roja sobre un fondo verde puede percibirse estáticamente, mientras que si se mueve sobre un fondo verde de la misma luminosidad no se percibirá su movimiento. En lugar de esto, tendremos la impresión de que desaparece y reaparece de un lugar a otro. Por lo mismo, la percepción de la profundidad desaparece cuando una figura muestra diferencias en el color pero no en la luminosidad.

Esto puede apreciarse muy bien con la figura 2.29. Trazada con líneas en blanco y negro sobre fondo blanco, da impresión de tridimensionalidad. Pero si se reprodujera la figura con líneas rojas sobre fondo verde, daría la impresión de una mezcla de líneas. Si se pretende reproducir la experiencia, por ejemplo con un ordenador, hay que tener en cuenta que no todas las personas tenemos la misma percepción de las intensidades luminosas, por lo cual deberán ajustarse exactamente las luminosidades de los colores rojo y verde, para cada persona, tal y como hicieron Livingstone y Hubel para diferentes personas en sus soberbios experimentos (Livingstone, 1988).

El significado biológico participa tanto de aspectos evolutivos como neurofisiológicos. El sistema parvocelular que detecta los colores ha evolucionado mucho después que el magnocelular, que ya discriminaba la profundidad y el movimiento. La naturaleza, siempre económica en sus logros, no duplicó esta función para este nuevo sistema. Así, cuando se eligen dos colores como rojo y verdes con idéntica luminancia, aparecen exactamente iguales para el sistema magnocelular, ciego al color. Al aparecer como iguales, no los detectará en movimiento ni podrá obtener percepción de profundidad.

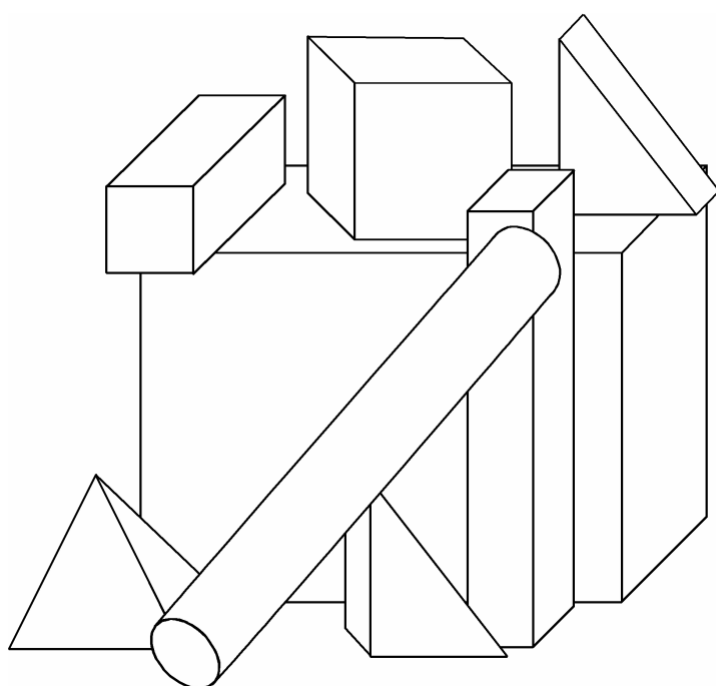


Figura 2.29. Demostración de la ausencia de percepción de la profundidad en el sistema parvocelular. Si esta figura se reproduce en líneas verdes sobre fondo rojo, y se ajustan cuidadosamente las luminancias, desaparecerá su apariencia tridimensional y quedará como un conjunto de líneas (adaptado de Livingstone y Hubel, 1988)

CAPÍTULO 3

Organización perceptiva, contraste y asimilación

3.1 Percepción visual

El estudio de la percepción y más concretamente de la percepción visual es un campo de la investigación que ha interesado a muchos de los pensadores más geniales de la ciencia en general. Los primeros trabajos plenamente experimentales en este ámbito fueron realizados entre los siglos XVII y XIX por Weber y Fechner con su relación de proporcionalidad entre el estímulo y la sensación, la descomposición de la luz blanca en sus componentes monocromáticos por Newton, la formulación del problema de la estereopsis por Kepler y las relaciones entre la frecuencia y la tonalidad por Galileo y Mersenne.

Ya en el siglo pasado, el auge del conductismo supuso un decaimiento en el interés por el estudio de la percepción debido al rechazo de esta escuela por todo aquello que pudiera verse contaminado por el "subjetivismo". Sin embargo, Skinner había hecho una extensa descripción de un aparato al que

denominó "sumador verbal", que presentaba a bajo nivel sonoro breves series de sílabas sin sentido con la finalidad de que su percepción fuese fácilmente influida por las expectativas del oyente (Bruce-Green, 1994).

Algunas de las más recientes líneas de investigación han sido: las investigaciones de Hubel y Wiesel sobre organización, funcionamiento y desarrollo de la corteza visual que valieron a sus autores la obtención del Premio Nobel de Fisiología y Medicina en 1979; las investigaciones de lo que se ha llamado la "Neogestalt", y que se han centrado en determinar las causas de que se produzca el agrupamiento perceptivo; los trabajos de Campbell y Robson en el decenio de los 60 sobre cómo la percepción del contraste puede verse influida por la frecuencia espacial; los trabajos de James Gibson y sus discípulos en lo que se ha venido en llamar "ecología perceptiva".

Sensación. Históricamente se ha hecho una distinción entre *sensación* y *percepción* considerándose que las sensaciones eran experiencias básicas y simples, elicitadas por estímulos simples. Experimentamos la sensación de "rojo" cuando se nos presenta un pequeño punto de luz roja, la sensación de "dolor" en respuesta a un pinchazo o la sensación de "luz" en respuesta a un breve destello luminoso. Además, desde un punto de vista fisiológico se relacionan con los receptores sensoriales. Así, el dolor se relaciona con la estimulación de un receptor para el dolor en la piel, o el destello luminoso con los fotorreceptores de la retina.

Percepción. Normalmente se valora a las percepciones como experiencias más complicadas, elicitadas por estímulos complejos y en general significativos. Podemos hablar de la percepción de un paisaje o de una melodía. Por su complejidad, se dice que las percepciones son el resultado de

procesos de orden superior a las sensaciones y de una integración o adición de sensaciones. El proceso de integración puede implicar procesos como la memoria y estar afectado por las experiencias previas del sujeto perceptor. Se relaciona a las percepciones con la actividad fisiológica del cerebro. Según Piéron (1966):

"La percepción es una gnosia, es decir, una toma de conciencia sensorial de objetos o de acontecimientos exteriores que han dado lugar a sensaciones más o menos numerosas y complejas".

Puede justificarse el reconocer como la base de una percepción o de una gnosia (conocimiento) dadas, un número determinado de sensaciones elementales. En clínica neurológica esta concepción dualista es muy importante, ya que se ha establecido en la percepción visual por ejemplo, una distinción entre la ceguera, en la que toda percepción visual ha desaparecido a consecuencia de la abolición de sensaciones visuales elementales, y la agnosia visual, en la que el paciente no reconoce un objeto a pesar de que las sensaciones visuales elementales son posibles. Según la actual fisiología:

"La percepción es el proceso de nivel superior que incluye la integración, el reconocimiento y la interpretación de las sensaciones". (Pinel, 2001)".

Así pues, la percepción no está determinada exclusivamente por los impulsos sensoriales, sino que depende de la estructura de las actividades del sistema nervioso central en el momento determinado en que ésta tiene lugar. El cerebro impone la percepción de una estructura diferente a la del estímulo físico. La percepción, por tanto, dista mucho de ser un fenómeno pasivo y se manifiesta como un acto de "decisión" con sede en el cerebro, en cuanto a la probable significación de las informaciones sensoriales para el individuo. Esta "decisión", ampliamente condicionada por la experiencia innata o adquirida por el animal, puede tener para éste gran importancia biológica,

como en el caso de reconocer en la lejanía la silueta de un depredador, cuyas formas se confunden con el fondo. Por el contrario, la "decisión" puede ser difícil en el caso de imágenes ambiguas, como es el "cubo de Necker" (Fig. 3.1a) o la ilusión óptica de Jastrow (Fig. 3.1b), en la que el sujeto percibe alternativamente, pero nunca al mismo tiempo, el perfil de un pato o de un conejo.

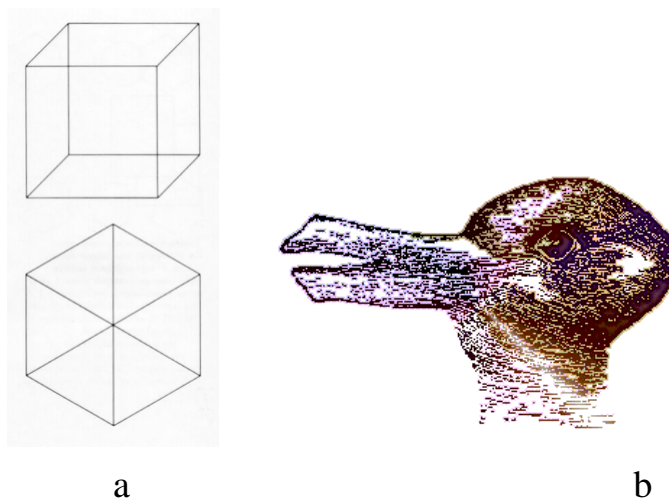


Fig 3.1. a) Cubo de Necker. Si observamos el dibujo inferior sin haber visto el de arriba nos parece un hexágono en el que se han trazado las bisectrices. Gracias a la figura de superior, nos hacemos la idea de que es un cubo, en perspectiva. Por otra parte si miramos cualquiera de las dos figuras durante un tiempo nos cambia de forma alternativa la perspectiva de la cara que nos ofrece el cubo como más próxima (de Rock, 1995).

No obstante, la división entre ambos procesos no es clara. Así, la experiencia producida por un único destello de luz sería clasificada como simple y por lo tanto como sensación. Pero si son dos los destellos luminosos, ¿debe considerarse como percepción la experiencia resultante? Podría matizarse algo la cuestión si hubiera que decidir si los dos destellos se experimentan como luces separadas o como un grupo de dos luces. De hecho, dependerá de un cierto número de factores entre los que se incluyen su color y la distancia que las separa. Por todo ello, se utiliza en general el término *percepción* para referirse a las experiencias producidas por la

estimulación de los sentidos.

En la percepción visual de un objeto podemos distinguir las a) La luz alcanza al objeto y se refleja en él alcanzando el ojo; b) atraviesa el aparato dióptrico del ojo y forma una imagen en la retina; c) se generan señales eléctricas en los fotorreceptores de la retina; d) se transmiten los impulsos nerviosos al cerebro a través de los fascículos ópticos; e) los impulsos nerviosos alcanzan el cerebro y son procesados por éste; f) se percibe el objeto al descodificar el mensaje del impulso nervioso. Actualmente, se enfoca la cuestión de la percepción desde dos aproximaciones fundamentales, la fisiológica y la psicofísica.

Enfoque fisiológico. Se estudian aquí los mecanismos internos de los sistemas perceptivos (pasos *b* a *e* en el ejemplo). Uno de los ejemplos más conocidos es el estudio del Sistema Visual de David H. Hubel y Torsten N. Wiesel, que registraron la actividad de las neuronas en la corteza visual de gatos y monos, hallando que muchas de ellas sólo respondían a franjas de luz orientadas en una determinada dirección. No obstante, aunque las aportaciones de estos autores tienen una importancia científica considerable, dicen muy poco en sí de la percepción, ya que las neuronas no perciben nada. Sólo una persona o un animal percibe, y por ello para que los estudios de Hubel y Wiesel sobre las neuronas corticales aporten algo sobre percepción, deben combinarse esos resultados con los obtenidos mediante experimentos conductuales. Existen algunas experiencias de este tipo, como la que se hizo de criar a un gato en un ambiente formado exclusivamente por líneas verticales. Algunos investigadores como J.J. Gibson, piensan que el enfoque fisiológico aporta muy poco a la percepción.

Enfoque psicofísico. Se estudia la relación existente entre el estímulo (paso *a* del ejemplo) y la percepción (paso *f*). La psicofísica es un conjunto de

métodos para medir la respuesta conductual al estímulo perceptivo. En una experiencia psicofísica se puede querer medir la relación existente entre la intensidad de una luz y la claridad con que es percibida. Podríamos encontrarnos, por ejemplo, con que para conseguir duplicar la claridad percibida de la luz tuviéramos que cuadruplicar su intensidad física. En efecto, la claridad no depende sólo de la distancia sino de una serie de factores, como por ejemplo la transparencia del medio. Dado que asociamos la claridad con la distancia, si un escenario lo percibimos dentro de una atmósfera muy nítida, nos parece que está mas cercano.

Los métodos psicofísicos son las mejores herramientas de que dispone el investigador en percepción. La manera más sencilla de medir percepciones es preguntar al observador por lo que percibe, ya que lo primero en cualquier campo de investigación sobre percepción es establecer el fenómeno a estudiar. Así, en sus estudios sobre los colores del espectro, en 1660, el primer paso de Isaac Newton fue el de describir adecuadamente el espectro de color, asignando nombres a las diferentes bandas de longitudes de ondas. Este paso abrió el camino para investigaciones más cuantitativas sobre los mecanismos de la visión del color que hoy en día todavía continúan.

3.2 Breve Panorama de la Psicología de la Percepción Visual

En el capítulo anterior se introdujeron algunos conceptos surgidos del estudio de la neurofisiología de la visión en general y de la visión en color en especial. El nivel neurofisiológico ha dejado al descubierto algunas propiedades importantes de las células de la vía visual, pero una adecuada comprensión de las tareas que están llevando a cabo estas células requiere considerar los procesos de la percepción visual en un nivel diferente, más «computacional», razonamiento que fue expresado enfáticamente por Marr

(1976, 1982). Marr defendió que deben distinguirse tres niveles diferentes en la teoría, si se quiere comprender una tarea de procesamiento de información compleja como la percepción visual.

En opinión de Marr (1982):

“para cualquier proceso (y la visión consiste en muchos procesos), primero debe formularse una *teoría computacional*, que describa lo que se está procesando y por qué. A continuación habrá que considerar los *algoritmos* para lograr la computación, las *representaciones* que constituyen la entrada y la salida de estos algoritmos. Finalmente, se debe describir la *implementación* del algoritmo, ya sea en el tejido neuronal o en un ordenador”.

Estos niveles más altos de la teoría son esenciales para dar sentido a algunos de los descubrimientos psicológicos y para permitir que se exploren aspectos de la percepción en los que los mecanismos neuronales son todavía desconocidos. Es a la psicología de la visión, más que a la fisiología, hacia la que se debe dirigir la atención.

En casi todos los estudios sobre percepción visual se ha visto la imagen retiniana como la entrada sobre la que operan procesos posteriores. Se tratarán en primer lugar aquellos descubrimientos y teorías que han surgido dentro de esta aproximación «tradicional» a la percepción visual. El núcleo de gran parte de esta investigación se ha centrado en la percepción humana y esto se debe indudablemente, al menos en parte, a que de forma tradicional se ha apuntalado la ciencia de la Psicología dentro de la filosofía de la mente.

Durante los siglos XVII y XVIII, los estudiosos interesados en la filosofía natural hicieron descubrimientos acerca de la luz y de los ojos, y trataron aspectos epistemológicos por vías que tuvieron al color como idea última acerca de la percepción visual hasta bien entrado el siglo pasado. En la parte física, la comprensión de la formación de la imagen por las lentes y la observación por Descartes de la imagen retiniana formada en la parte posterior del ojo de un buey, condujeron a la creencia, ampliamente difundida,

de que el ojo funciona más o menos como una cámara (o cámara oscura en tiempos de Da Vinci y Kepler), y de que el punto de partida para la visión es una imagen. No obstante, era obvio, que las imágenes producidas por las cámaras y por los ojos carecían, naturalmente, de muchas de las cualidades que percibimos en el mundo. Las imágenes son planas, estáticas y sin sentido. La *percepción visual* nos revela por el contrario un mundo sólido, móvil y lleno de sentido. La percepción debe, por tanto, implicar procesos que van más allá de la información presente en la imagen.

Desde una perspectiva filosófica, los empiristas, como Locke, y Berkeley (1709), afirmaron que la percepción estaba construida, de algún modo, a partir de sensaciones más primitivas, a través de un proceso de aprendizaje por asociación. Sin embargo las denominadas filosofías nativistas proponían que el conocimiento de entidades tales como «espacio» o «tiempo» eran innatos, o “concedidos por la divinidad”. Por tanto, puede prácticamente afirmarse que es la tradición empirista la que ha dominado el pensamiento moderno en Psicología. La postura empírica, dominante en el siglo XIX, condujo a las tentativas de análisis de las percepciones basándose en sus sensaciones componentes por parte de los *estructuralistas*, y a un debate considerable acerca de qué elementos o atributos deberían considerarse fundamentales. Mediante el análisis de las sensaciones elementales, se esperaba que las complejidades del pensamiento humano podrían, finalmente, desentrañarse, dado que todas las ideas complejas deben, en último extremo, de haberse derivado de la experiencia sensorial. También se discutieron los mecanismos por los cuales se construían las percepciones a partir de las sensaciones, mediante la referencia al conocimiento, previamente adquirido mediante el aprendizaje, y de forma más notable por parte de von Helmholtz (1866), de cuya idea de la percepción, que implica una inferencia inconsciente o unas conclusiones, todavía se hacen eco los teóricos

contemporáneos. Actualmente, los métodos utilizados para estudiar la percepción se han hecho más sofisticados, y se han divulgado algunas ideas bastante diferentes sobre la percepción. Mencionaremos aquí, muy brevemente, algunas de las más destacadas en lo relativo al método y a la teoría.

Hacia el final del siglo XIX, el contenido de la percepción se estudiaba comúnmente mediante el uso de métodos de introspección analítica, aunque los métodos psicofísicos de Fechner vieron el principio de una vía más «objetiva» para estudiar los sentidos. No obstante, los métodos introspectivos fueron, en gran medida, abandonados en los Estados Unidos, siguiendo la dirección de J.B. Watson en 1912 (Bruce-Green, 1994). Watson expuso su conductismo, en el que las nociones mentalistas, tales como «sensaciones» y «percepciones», eran reemplazadas por las «respuestas discriminativas», observables objetivamente. Los conductistas argumentaron que nunca podemos conocer cómo experimentan el mundo los animales, u otros seres, y por lo tanto, debería observarse solamente su conducta para examinar cómo se relacionan sus respuestas con las variaciones de los estímulos presentados.

Paradójicamente, mientras el conductismo clásico proporcionaba las herramientas metodológicas para el estudio comparativo de la percepción, consideraba ilegítima la explicación de cualquier diferencia observada en las capacidades perceptivas de diferentes especies en función de procesos internos. Los métodos de la psicología contemporánea están todavía influidos por la tradición conductista, aunque los estudiosos de la percepción, en su totalidad, consideran ahora que los informes verbales de la propia experiencia perceptiva de los sujetos son «respuestas» legítimas para ser registradas y analizadas.

Más o menos al mismo tiempo que Watson desarrollaba el conductismo, los psicólogos europeos de la Gestalt (ver más adelante) reaccionaban en contra de los supuestos estructuralistas, según los cuales, la percepción podía reducirse a las sensaciones. Éstos conservaron una aproximación introspectiva aunque fenomenológica. Fueron nativistas en cuanto a la filosofía, manteniendo que la experiencia perceptiva era el resultado de cierto campo magnético de fuerzas dentro del cerebro.

Además de los gestaltistas, la mayor parte de los otros movimientos en la psicología de la percepción han tenido un cierto enfoque empirista, y han asumido, implícita o explícitamente, que la percepción debería considerarse como algún proceso de interpretación o construcción a partir de la información incompleta proporcionada por la imagen retiniana. Dos movimientos estrechamente relacionados entre sí, que enfatizaban tales complejidades de la percepción humana, florecieron pasajeramente durante los decenios 1940 y 1950.

El primero de éstos, el «funcionalismo transaccional» de Kilpatrick, se apoyó en las demostraciones de Ames que incluían una ventana trapezoidal que parecía rectangular, una colección de palos que podían verse como una silla y, quizá la más conocida, una habitación curiosamente construida que (cuando se veía estática y monocularmente) parecía tener forma de habitación, pero producía cosas extrañas con el tamaño aparente de la gente que permanecía o andaba en ella (Fig. 3.2).

Tales demostraciones se utilizaron para ilustrar el número aparentemente infinito de objetos que podían dar origen a una imagen retiniana simple, y para enfatizar la naturaleza probabilística e inferencial de la visión. Lo que uno ve será lo que uno espera ver, dada la vida propia de la experiencia perceptiva. Mientras que el denominado *funcionalismo transaccional* subrayó la

historia de una persona como factor importante en la determinación de su percepción, el movimiento de la *New Look* subrayó la importancia de las diferencias individuales en cuanto a motivación, emoción y personalidad al influir en lo que podía verse.



Figura 3.2 Habitación de Ames. La habitación se percibe como si fuera de una forma convencional, con los rincones en ángulo recto y con ventanas rectangulares. Las personas que están en el interior parecen tener tamaños anómalos. De hecho, es la habitación la que está extrañamente dimensionada -las dos personas son de una altura normal (de Goldstein, 1988).

Así, Cantril, afirmaba que una observadora, cuyo marido paseara a través de la habitación de Ames, continuaría viéndolo con su tamaño constante, mientras que un extraño que le estuviera acompañando menguaría o crecería ante sus ojos; Wittreich confirmó esta observación con algunos matrimonios que él mismo examinó (Bruce-Green, 1994).

Durante el decenio de 1960, las explicaciones asociacionistas del aprendizaje perceptivo y de la respuesta discriminatoria dieron paso a una nueva

«psicología cognitiva» de la percepción, de la atención y de la memoria. Se hicieron intentos para describir los estadios que intervenían entre el estímulo y la respuesta. La revolución en la tecnología de la información proporcionó una nueva metáfora para la psicología, en la que se consideró que la información que provenía de los sentidos debía ser procesada de un modo no distinto al procesamiento de la información en un ordenador. Se trataron los procesos de codificación sensorial, el almacenamiento y la recuperación de la información, y se pensó que el desarrollo de modelos computacionales de algunos de estos procesos era un objetivo legítimo de la teorización psicológica. Si podía diseñarse una máquina que pudiera «ver», su programa de ordenador podía constituir la ejecución de una teoría de cómo logran la visión los humanos (inteligencia artificial). La teoría de Marr (1982) representa quizá, todavía, el intento más sofisticado de explicar las operaciones del procesamiento de la información implicado en la visión, dentro de un marco que rebasa los límites de la fisiología, la psicología y la inteligencia artificial (I.A.).

Hay además una teoría bastante diferente, y polémica, que fue primeramente propuesta por Gibson en 1950, y matizada en posteriores trabajos en 1966 y 1979 (Goldstein, 1988). Esta teoría sugiere que la «entrada» de un sistema perceptivo está estructurada en el orden óptico total y en las transformaciones del orden a lo largo del tiempo. Gibson niega que la percepción implique construcción, interpretación o representación. No obstante, pueden trazarse algunos paralelismos entre algunas de las ideas de Gibson y las de gestaltistas y conductistas, dos escuelas diametralmente opuestas.

Siguiendo a V. Bruce y P. Green, (1994), veremos hasta dónde puede explicarse el logro perceptivo de las personas y de los animales cuando estas

actividades perceptivas *se* consideran como los productos finales del procesamiento de imágenes retinianas, que es la corriente principal de las teorías de la percepción visual. Un principio unificador de la psicología de la percepción visual consiste en que la percepción no es posible, a menos que el receptor haga suposiciones acerca del mundo físico que da lugar a una imagen retiniana particular. La única discrepancia radica en lo específicos que necesitan ser tales supuestos.

Para algunos teóricos contemporáneos, estos supuestos han de ser bastante específicos y pueden aprenderse a través de la experiencia vital del individuo: por ejemplo, el supuesto de que las ventanas o las habitaciones son rectangulares. Para otros, tales supuestos pueden ser más generales y firmemente establecidos (es decir, construidos en el sistema nervioso central y no dependientes del aprendizaje), como el supuesto de que los elementos de una textura orientados similarmente deberían agruparse. Muchos psicólogos han sostenido que se logra la economía perceptiva, haciendo uso del conocimiento específico del mundo para inferir partir de los datos sensoriales, qué es lo que da lugar a esos datos.

Muchos modelos de la I.A. sobre la percepción se hallan dentro de esta categoría. Otros modelos (Marr, 1976) han sido desarrollados ampliamente a lo largo de lo que se ha venido en llamar líneas *bottom-up* o “dirigidas-por-los-datos”. En estas teorías se incorporan restricciones muy generales dentro de cada estadio del procesamiento de la información, pero el conocimiento específico del mundo se requiere en el acto de la visión sólo cuando los estadios del procesamiento de la información, relativamente de bajo nivel, producen resultados ambiguos.

Uno de entre los numerosos logros de Marr es su demostración de que puede lograrse una gran cantidad de procesamiento de imágenes sin recurrir a un conocimiento específico del mundo. De todas las teorías que han surgido dentro de la tradición del «procesamiento de información», la de Marr es la más compatible con el objetivo de dar cuenta de la percepción animal, así como de la humana. Aunque su objetivo fue proporcionar una teoría que pudiese ser aplicable a la percepción humana, y, por lo tanto, depende, al menos en parte, de la evidencia psicofisiológica humana para fundamentar sus aseveraciones, Marr recalcó que el mismo tipo de análisis podía aplicarse a la percepción visual en otras especies:

“En pocas palabras, la visión se utiliza en tal ingente variedad de formas que los sistemas visuales de diferentes animales deben de diferir significativamente unos de otros. ¿El tipo de formulación que yo he estado defendiendo en términos de representaciones y procesos puede, tal vez, demostrar ser adecuado para todos ellos? Yo pienso que sí. La cuestión general aquí es que, puesto que la visión se utiliza por parte de diferentes animales para tal amplia variedad de propósitos, es inconcebible que todos los animales con visión usen las mismas representaciones; decididamente, puede esperarse que cada uno utilice dos o más representaciones que estén bien elaboradas para el propio propósito (Marr, 1982, pág. 32)”.

3.3 Organización perceptiva y teoría de la Gestalt

3.3.1 Teoría de la Gestalt, orígenes y conceptos fundamentales

El término alemán *Gestalt*, equivale a *forma* o *figura* aunque su intención significativa se traduce mejor por *configuración*. La *Psicología de la Gestalt* liderada por Max Wertheimer, Kurt Koffka y Wolfgang Kohler se originó cuando, en 1912, Wertheimer, del Instituto de Psicología de Frankfurt am Main, publicó un artículo sobre una ilusión visual denominada *movimiento aparente* (Rock y Palmer, 1991). Se trata de la percepción de movimiento resultante de mirar una secuencia de imágenes estacionarias, como ocurre en el cine. Este fenómeno indicó a Wertheimer que la percepción de un todo (el

movimiento) era radicalmente diferente de la percepción de sus componentes (las imágenes estáticas). La idea de que el todo es diferente de la suma de sus partes – tesis central de la psicología gestáltica – fue un auténtico desafío a la entonces dominante teoría del *estructuralismo*. Así pues, como muchos otros movimientos científicos importantes, el de la *Psicología de la forma (Gestalt)*, nació de una rebelión contra la ciencia establecida en su época.

En particular, los gestaltistas rechazaban el *elementalismo*, supuesto básico de los estructuralistas según el cual las percepciones complejas solo podían entenderse identificando las partes elementales de la experiencia. La idea de los estructuralistas era que un observador bien entrenado podía llegar a distinguir los elementos básicos de la percepción y reducirlos a sensaciones primitivas, como los puntos que forman un cuadrado o las diferentes notas de una melodía. Para ellos, una melodía era la experiencia de distintos tonos que se asociarían en la mente de quien los oía. Esta teoría ha sido descrita también como *atomista* o *química mental*, ya que supone que las percepciones pueden analizarse componente a componente, del mismo modo que las moléculas pueden dividirse en átomos (Palmer, 1992). Pero para los gestaltistas lo que percibimos no es una mera suma de o serie de sensaciones, sino la configuración total de la que forman parte (percibimos escenarios no objetos independientes en una escena). Para ellos, las partes de un cuadrado o las notas de una melodía interactúan unas con otras, con lo que se percibe un todo que resulta distinto de la mera suma de sus partes. La figura y la melodía constituyen ejemplos de lo que denominaron *propiedades emergentes*: cualidades del conjunto de una experiencia que no son inherentes a cada uno de sus elementos. Esto no ocurre sólo en los fenómenos mentales sino en otras muchas otras situaciones. El agua difiere completamente en su aspecto y propiedades de sus componentes el hidrógeno y el oxígeno y las características de una determinada sociedad son

muy diferentes de las de los individuos que la componen.

La *qualidad emergente* ilustra un significado del concepto gestáltico de organización ya que para los gestaltistas, la organización era necesaria para explicar porqué los seres humanos vemos el mundo como compuesto de objetos distintos. Hicieron notar que, siendo la imagen retiniana tan sólo un conjunto de varias intensidades y frecuencias luminosas, los rayos procedentes de las mismas partes de un objeto no tienen entre sí mayor afinidad que la que posean los que provienen de dos objetos diferentes. Por lo tanto, la capacidad de percibir objetos ha de deberse a una organización efectuada por el sistema nervioso. La idea de que la percepción de objetos separados no la producía por sí sola la “imagen“ reflejada en la retina, fue una de las más importantes contribuciones de los gestaltistas.

Para explicar cómo se forman las percepciones de los objetos, Wertheimer propuso la teoría de que el sistema visual organiza las partes según unas *leyes de agrupación*. Se tiende a agrupar perceptivamente aquellos elementos que están próximos unos a otros, se parecen entre sí, forman un contorno cerrado o se mueven en la misma dirección. Estas leyes conducen en general a una representación exacta de los objetos de una escena, pero también pueden originar representaciones confusas o menos nítidas como es el caso del camuflaje (Fig. 3.3).

Edgar Rubin, psicólogo danés, acuñó el concepto *organización figura-fondo* en 1921 (Rock y Palmer, 1991). Puso de manifiesto que aún cuando todas las partes de una región conectada se agruparan adecuadamente, podían interpretarse tanto como objeto o como fondo. Estableció un conjunto de leyes que describen las condiciones en virtud de las cuales una región tiende a percibirse como figura y no como fondo.

Además, los gestaltistas descubrieron que ciertas estructuras determinan un marco de referencia con respecto al cual se perciben otros objetos. Por ejemplo, si una persona se encuentra dentro de una habitación inclinada, las paredes de la misma definen los ejes vertical y horizontal del enmarque, haciendo que una lámpara que cuelgue del techo parezca estar ladeada. Incluso el cuerpo del propio observador parece estar inclinado aunque una y otro estén perfectamente alineados con la gravedad. El sistema visual utiliza una amplia estructura circundante para definir el patrón perceptivo (quietud o verticalidad) e interpreta otros objetos, incluido el propio sujeto, en términos de esos patrones.



Figura 3.3. Camuflaje o cripsis. Determinadas leyes de agrupamiento como la similaridad, la proximidad y la cohesión pueden ocultar a unos animales, como es el caso de estos caballos, cuya silueta apenas se distingue del entorno que los rodea (de Rock y Palmer, 1991).

Otro aspecto de la concepción gestaltiana es el denominado *principio de pregnancia o coherencia estructural (Prägnanz)*. Según este principio, la percepción es “tan buena” como las “condiciones actuales” lo permitan. Condiciones actuales se refiere a la información que la retina va registrando. Lógicamente, el sistema visual no convierte cualquier figura en la forma más simple. Así, un triángulo irregular no se ve como un círculo, ya que la percepción debe corresponder a la naturaleza de la imagen retiniana. Sin embargo, en los casos en los que la imagen es ambigua, como cuando una figura está parcialmente oculta, el observador tiende a percibir la forma más simple que concuerde con la información de que dispone.

Los gestaltistas trataron de interpretar éste y otros fenómenos perceptivos en términos fisiológicos. Su doctrina del isomorfismo implica una conexión muy directa entre experiencia y fisiología, cuando afirma que una experiencia subjetiva y el evento nervioso subyacente tienen estructuras similares. Si varias luces situadas próximas entre sí se encienden y se apagan alternativamente a un ritmo apropiado, apreciamos una luz que se mueve de un lado a otro. Para Wertheimer esta percepción se debería a la energía eléctrica que fluía entre las dos localizaciones cerebrales estimuladas por las luces. Es decir, el episodio fisiológico tendría la misma estructura que la percepción producida por él. Sin embargo, tal flujo de energía eléctrica a través del cerebro no aludía a la transmisión de señales eléctricas de unas neuronas a otras, como ha demostrado la actual neurofisiología.

Este tipo de sistema neuronal no era capaz de explicar el tipo de interacción y organización concebido por los gestaltistas, por lo que sugirieron que la corriente fluía directamente a través del tejido cerebral. Sostenían que los estímulos creaban en el interior del cerebro unos campos eléctricos que interactuaban unos con otros y convergían hacia un estado de energía

mínima. Köhler, buen conocedor de la física de su tiempo, el cerebro era sólo un ejemplo de muchos sistemas físicos que él llamó *Physiker Gestalten* (Configuraciones físicas), que evolucionaban hacia un estado de equilibrio. Por ejemplo, las burbujas de jabón empiezan siendo de varias formas, pero al cabo de un tiempo siempre se vuelven esféricas, ya que ese es su estado de mínima energía. Conforme a su doctrina del isomorfismo, los gestaltistas creían que el mecanismo para que tuviera lugar la *pregnancia* consistía precisamente en la convergencia de los campos eléctricos cerebrales hacia el estado de energía mínima: las percepciones se simplificaban cuando el subyacente evento cerebral alcanzaba un estado de equilibrio.

David Navon, entre otros autores que han proporcionado modos de comprobar la tesis gestáltica de que los conjuntos son perceptivamente dominantes, diseñó el experimento que se describe a continuación (Rock y Palmer, 1991). Quería este autor determinar si se percibían los todos antes que las partes o viceversa. Sirviéndose de unas letras grandes compuestas de letras pequeñas midió el tiempo que necesitaban los observadores para identificar las letras grandes (“globales”) o las pequeñas (“locales”) En algunos casos, las letras grandes eran las mismas que las pequeñas (consistentes) y en otros, eran distintas (estaban en conflicto) (Fig. 3.4). Si el conjunto o todo es perceptivamente primario, según sostenían los gestaltistas, las letras globales deberán percibirse antes que las locales; si las partes priman en la percepción, será cierto lo contrario. Otro principio gestáltico dice que, si primero se percibe el todo, las letras locales conflictivas no afectarán en nada el reconocimiento de las letras globales, mientras que unas letras conflictivas al nivel global retardarán el reconocimiento de las locales. Los resultados obtenidos por Navon en ambos casos corroboran las predicciones gestálticas. Sin embargo, posteriormente, otros autores han cuestionado estos resultados al demostrarse que las respuestas dependen,

entre otros factores, del tamaño absoluto y relativo de las letras.

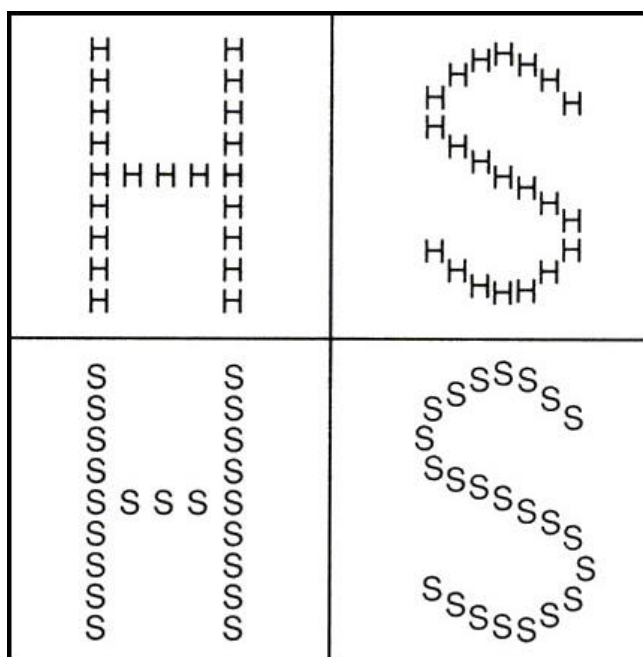


Figura 3.4 En virtud de la precedencia de la forma global: podemos reconocer las letras mayores más rápidamente que las pequeñas, sean éstas coherentes o no. La identificación de las letras pequeñas lleva más tiempo cuando están en conflicto con la letra global (de Rock y Palmer, 1991).

A pesar de estos logros y de su reconocido influjo en varios campos de la psicología, el movimiento de la *Gestalt*, siempre ha sido contemplado con bastante escepticismo desde la ciencia oficial. Existen varios motivos: primero, la psicología de la forma trató de investigar la experiencia subjetiva, por ejemplo, en percepción, lo cual era rechazado por los conductistas como objeto impropio para la investigación científica. Segundo, aunque los gestaltistas llevaron a cabo muchos experimentos bien controlados, sus fenómenos mejor conocidos los presentaban a menudo como demostraciones directas, haciéndolo, por ejemplo, con las figuras con las que ilustraban las

leyes de agrupación. Tercero, sus teorías solían expresarse en términos cualitativos, sin ajustarse a los patrones de precisión corrientemente admitidos. Por otro lado, sus opiniones respecto al funcionamiento del cerebro han sido superadas por los hallazgos de la moderna neurofisiología. Además, el enfoque teórico que propugnaban parece negar uno de los principios básicos del método científico: el de que los todos pueden entenderse mediante su reducción a un conjunto de partes.

Todo esto deberá contrapesarse con sus considerables logros como son los importantes fenómenos perceptivos que los psicólogos de esta escuela contribuyeron a dilucidar: agrupación, organización figura-fondo, marcos de referencia, idoneidad de configuración y movimiento aparente entre otros muchos. Si bien las ideas gestaltistas acerca de los campos eléctricos del cerebro eran erróneas, la tesis más general de que el cerebro es un sistema dinámico que converge hacia el equilibrio en su funcionamiento energético (*Physiker Gestalten*) puede ser correcta. El notable auge del interés por los modelos de redes y circuitos neuronales pone de manifiesto que las teorías de la *Gestalt* siguen teniendo hoy mucha validez y ocupan un lugar seguro en la historia de la Psicología.

3.3.2 Modernas teorías acerca de la percepción de la Gestalt

Si bien nadie acepta ya la teoría de los campos eléctricos cerebrales, hay muchas ideas emanadas de la *Gestalt* que siguen influyendo actualmente en los teóricos de la percepción. Los puntos de vista se han ampliado o revisado, pero en ningún libro de texto actual sobre percepción faltan ideas que tuvieron su origen en la teoría de la *Gestalt*. En este sentido las leyes de agrupación enunciadas por Wertheimer han resistido el paso del tiempo. De hecho ninguna de ellas ha sido refutada, ni tampoco se habían añadido otras

nuevas a su lista original antes de las que en los últimos veinticinco años han sido propuestas por varios autores y que aparecen recopiladas en dos excelentes trabajos de revisión de Palmer (Palmer, 1992; Palmer 1999). Stephen Palmer, de la Universidad de San Diego, intentó en su tesis doctoral investigar las ideas de la Gestalt en términos informáticos. Juntamente con Irving Rock han llevado a cabo numerosos proyectos de investigación encaminados a ampliar y revisar las teorías gestálticas sobre la agrupación perceptiva y el marco de referencia.

Palmer (1975) sugirió una *ley de inclusión* o de *región común*, refiriéndose a la tendencia de un observador a agrupar los elementos situados dentro de lo que se percibe como una misma región. Otra ley postulada por Rock y Palmer o de *cohesión* es probablemente el principio de agrupación más fundamental propuesto hasta la fecha. Se refiere a la fuerte tendencia del sistema visual a percibir toda región uniforme y conectada (un punto, una línea o un área más extensa) como una sola unidad. Es una buena ley de agrupación ya que probablemente sea la propiedad más característica de los objetos que nos rodean.

Aunque no se ha puesto en duda la validez de las leyes de agrupación se está reconsiderando en qué fase del proceso visual operan. Para la *Gestalt* la agrupación se da al principio del proceso visual. Pero es muy posible que los principios de agrupación operen en fases tardías del proceso, luego de haberse percibido las condiciones de relieve y de iluminación. Rock y Broscole (Rock y Palmer, 1991) colocaron unos focos luminosos en unas cintas paralelas y las suspendieron en la oscuridad, de modo que el conjunto pareciese un retículo de puntos brillantes (Fig 3.5 a). Al estar los focos más juntos unos a otros en el sentido vertical que en el horizontal, los observadores los veían organizados en columnas. El sistema fue luego girado

hacia atrás de forma que las imágenes retinianas de los focos se acercasen más unas a otras horizontalmente, debido a la percepción de la perspectiva de alejamiento (Fig. 3.5 b). Sorprendentemente, los observadores seguían percibiendo los focos en columnas, lo cual indicaba que la agrupación se basaba en la proximidad percibida en el espacio tridimensional, más que en la que pudiera darse realmente en la retina. Se concluye pues que la agrupación por proximidad debe ocurrir después de la percepción del relieve. Estos mismos autores con experimentos similares, llegaron a parecidas conclusiones respecto a los principios de región común y de cohesión.

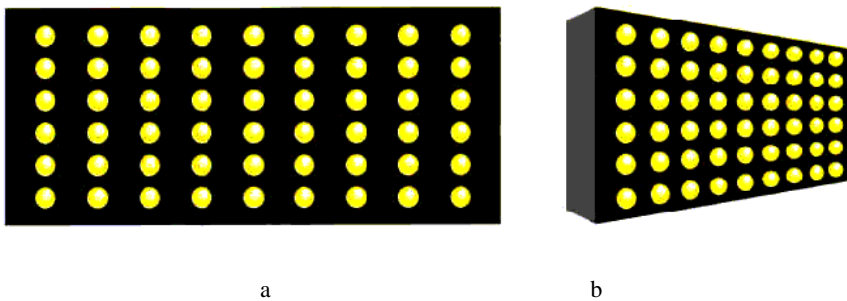


Figura 3.5. Retículo de focos luminosos a) Organizado verticalmente en columnas. b) Cuando se le empuja hacia atrás por un lado, los observadores siguen percibiendo columnas, aunque las imágenes retinianas de los focos estén ahora más juntas horizontalmente (de Rock y Palmer, 1991).

Palmer (1992) describe en su recopilación de las nuevas teorías de la *Gestalt* una interesante teoría relacionada con la frecuencia espacial propuesta por Luis Jenez en 1983, y basada en una propuesta original de Arthur Ginsburg (1971,1986). Ginsburg proponía que los fenómenos *Gestalt* tales como los efectos del contexto, pueden ser explicados en términos de contenido de imágenes en *frecuencias espaciales bajas*. La teoría de Ginsburg se basa a su vez en una idea formulada y probada por Campbell y Robson en 1968: en esencia, que los primeros estadios en el sistema visual contienen canales separados para procesar información con diferentes frecuencias espaciales y orientaciones. La idea es que a pesar de la aparente unidad de los perceptos

espaciales complejos, el sistema visual los descompone, de hecho, en series individuales de patrones espaciales primitivos (denominados redes sinusoidales) en los que la cantidad de luz varía como una onda sinusoidal a lo largo de una orientación. Algunos ejemplos de redes sinusoidales se muestran en la figura 3.6.

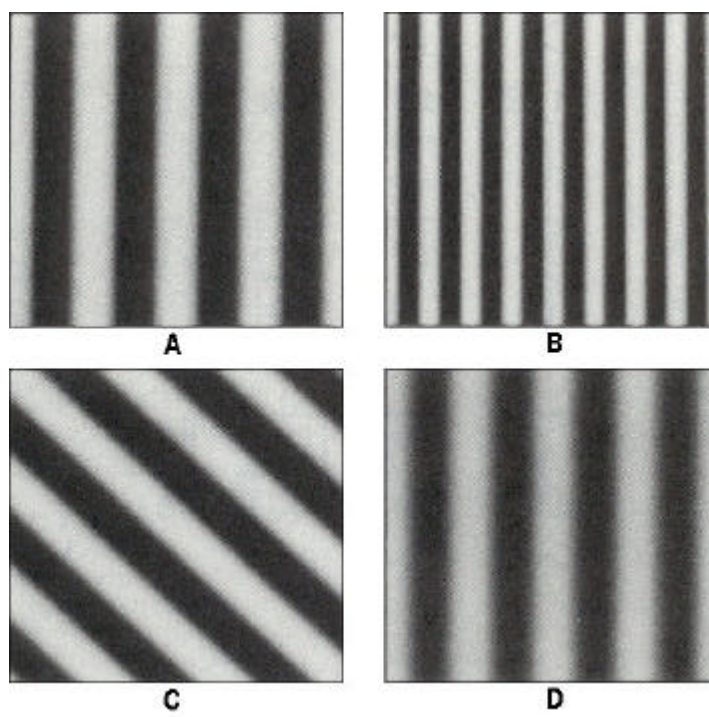


Figura 3.6. Algunos ejemplos de redes sinusoidales que varían en: frecuencia espacial (A respecto a B), orientación (A respecto a C), y contraste, (A respecto a D) (de Palmer, 1992).

Es un hecho matemáticamente comprobado en el Teorema de Fourier, que cualquier patrón bidimensional puede ser analizado como una suma de muchas de tales redes con diferentes frecuencias espaciales, orientaciones y amplitudes. Por ejemplo, la figura 3.7 muestra cómo un patrón de red cuadrada puede ser construido juntando varias redes sinusoidales. Actualmente existe una evidencia casi total tanto desde la psicofísica como

desde la fisiología que sostiene la hipótesis de que el sistema visual analiza las imágenes retinianas a partir de respuestas dentro de los canales visuales definidos por frecuencia espacial y orientación.

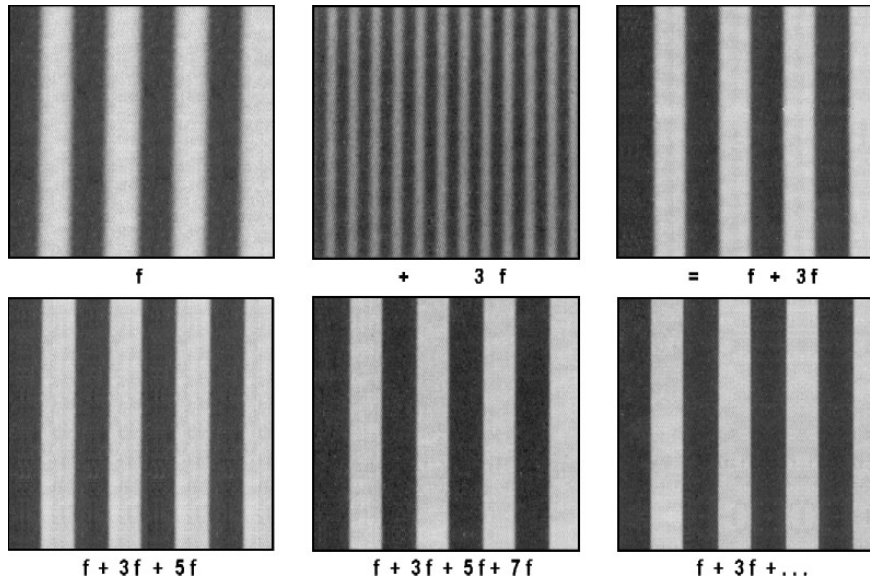


Figura 3.7 Síntesis de una red sinusoidal cuadrada a partir de la suma de componentes sinusoidales (de Palmer, 1992).

Ginsburg propuso que los efectos configuracionales de la *Gestalt* corresponden al patrón de salida en los canales visuales sintonizados selectivamente a *bajas frecuencias espaciales*. Demostró, con varios experimentos bien controlados, que cuando se filtran imágenes mediante filtros de baja frecuencia, de forma que sólo queden los componentes de la red con bajas frecuencias espaciales, se hacen explícitas en las imágenes filtradas, las “propiedades emergentes” a las que se referían los teóricos de la *Gestalt*. Ginsburg concluyó a partir de varias demostraciones experimentales en esta línea que las propiedades *Gestalt* corresponden a la información transmitida en canales de baja frecuencia espacial del sistema visual humano.

Uno de los autores modernos que mejor ha estudiado las teorías de la Neogestalt aplicadas a la visión, Lothar Spillman, (Spillmann y Werner, 1990) recoge en su revisión de 1997 (Spillman, 1997) desde los clásicos estudios sobre contraste y asimilación hasta estudios sobre el color muy actuales poniendo énfasis en las cualidades fenomenológicas de la percepción visual. Muestra cómo el traslado desde los resultados locales a los globales en unidades registradoras reconsidera la “apariencia” en experimentos visuales, no sólo en color sino también en la percepción del movimiento. Relata Spillman cómo las ideas Gestalt colocadas en el contexto de los conceptos modernos ha inspirado a psicofísicos, neurofisiólogos y científicos de “visión computacional” (como Marr y otros). Conceptos tales como *alimentación directa*, *interacciones horizontales* y *retroalimentación* son discutidas por este autor como mecanismos potenciales neuronales para explicar fenómenos tales como las “superficies uniformes”, llenando y desgajando los procesos más allá del clásico campo receptor.

Spillman, en su reciente trabajo publicado en 1999, revisa los últimos hallazgos en la investigación de la neurofisiología de la visión para ilustrar el progreso habido desde los primeros intentos en relacionar las respuestas de células aisladas con la percepción visual. Si bien, inicialmente, las propiedades del campo receptor de clases de células individuales (contraste, longitud de onda, orientación, frecuencia espacial, etc...) se utilizaron para explicar procesos visuales relativamente simples, actualmente las percepciones complejas se interpretan en términos de interacciones de amplio rango, implicando muchas neuronas. Este cambio, en el paradigma de proceso local a proceso global, ha sido posible gracias a los recientes hallazgos en la corteza cerebral de interacciones horizontales y propagación retrógrada (circuitos de retroalimentación) además del clásico esquema jerárquico (alimentación anterógrada).

3.3.3 La “aproximación ecológica” de Gibson

En la segunda guerra mundial, a J.J. Gibson se le planteó el problema de cómo entrenar a pilotos rápidamente y cómo distinguir antes del entrenamiento los potencialmente buenos de los malos. El punto clave era conseguir una visión óptima en las operaciones de despegue y aterrizaje, maniobras difíciles, probablemente las de máximo peligro. Al comprobar que con gráficas, diapositivas, etc. de espacios tridimensionales y de perspectivas abstractas que respondían al modelo geométrico de la escuela de Gestalt, los resultados eran pobres y lentos, sustituyó los conceptos básicos de esta escuela por otros puntos de partida, espacios limitados por superficies con una determinada textura, con los que obtuvo mejores resultados.

Esta sustitución fue el principio de un continuado trabajo de más de 30 años en los que sentó las bases de una nueva estructuración de la respuesta visual que llamó *aproximación ecológica*. Gibson insiste a lo largo de toda su obra en que tanto la superficie de los objetos como la de los terrenos que las sustentan, tienen texturas características muy diferenciadas; texturas que olvidamos al hablar de planos y espacios dimensionales. La importancia de la diferencia superficie-plano en la comprensión de la respuesta visual la expresa Gibson (1979) de forma clara y escueta cuando escribe:

“Una superficie es sustancial; un plano no. Una superficie es texturada; un plano no. Una superficie nunca es perfectamente transparente; un plano sí lo es. Una superficie puede verse, un plano solamente puede visualizarse.”

En opinión de Aguilar (1996), este breve párrafo es suficiente para convencernos de la superioridad que tienen en cuanto a fuentes de información, las superficies con textura frente a los planos en el proceso de la percepción visual; convencimiento que exige sustituir la geometría basada en abstracciones tales como puntos y planos, propios de la geometría

convencional, por una geometría ecológica más apropiada para describir el entorno partiendo de las superficies existentes y de sus texturas. Consecuente con esta idea, Gibson sustituye la aproximación clásica *percepción de la profundidad o del espacio* por una aproximación que resalta la *percepción de superficies en el ambiente*. Si bien, para los gestaltistas, la información contenida en la radiación visible consta esencialmente de puntos y líneas que una vez plasmadas en la imagen retiniana, un procesado posterior, las convierte en las formas y figuras de los objetos presente en el campo visual, para los seguidores de Gibson, la información es más directa, la que llaman el “Orden óptico ambiental”. Por *orden óptico ambiental* se entiende la luz difundida en dos grandes superficies, una de ellas uniforme (gradientes suaves), el firmamento o el techo de los espacios cubiertos, y la otra, el terreno o suelo, provista de una textura más o menos regular. En la primera de estas superficies, en ocasiones está presente el sol o cualquiera de las otras luminancias que envían directamente la luz al resto del escenario visual, la segunda se subdivide en una serie de estructuras muy diferenciadas fijas o móviles correspondientes a los objetos y seres vivos presentes en el escenario.

La percepción de Gibson no parte de la imagen retiniana sino del orden óptico ambiental (más cercano al entorno que los puntos y rayas) que el observador muestrea activamente. Este punto de partida *se registra* en la imagen retiniana en lugar de *procesarse*. El *orden óptico* contiene información invariante sobre la situación, posición y forma de objetos del entorno en circunstancias en que los psicólogos tradicionales sólo las identifican de modo ambiguo o insuficiente. El mayor o menor cambio en la densidad de textura nos indica con bastante precisión la distribución de las superficies en nuestro entorno. La figura 3.8 muestra cómo un aumento en la densidad de la textura puede dar la impresión de superficies que retroceden

en la distancia.

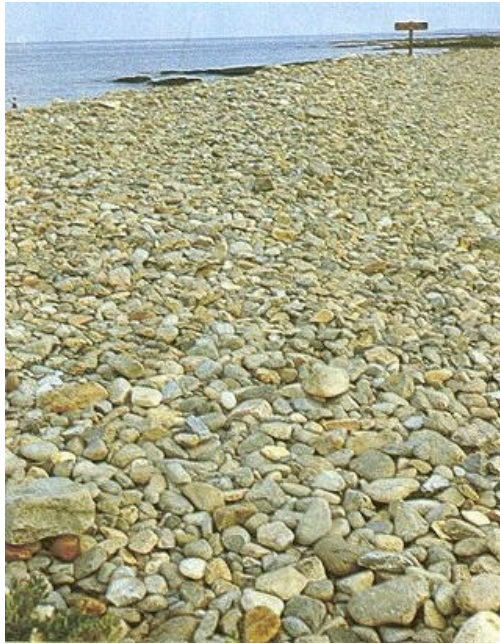


Figura 3.8 Gradiente de densidad textural en la fotografía de una playa. (de Rock, 1985)

La perspectiva aérea de que se valen los gestaltistas para deducir el tamaño de un objeto, es bastante ambigua, por considerar al objeto en estudio, aislado en el espacio sin más referencia que el ángulo sólido que subtiende desde el ojo del observador, que como es sabido, depende no sólo del tamaño, sino también de la distancia y de su posición (más o menos inclinado respecto al observador) (Fig. 3.9). En dicha figura está representado el tipo de dibujo que suele ser utilizado por los estudiantes de percepción visual para ilustrar las ambigüedades de la imagen retiniana. Gibson (1979) hace patente su desacuerdo con este tipo de deducciones, en que las imágenes se tratan como si fueran proyectadas por objetos artificialmente planos escribiendo:

“La distancia no es una línea desde un punto hasta el ojo”, como el obispo Berkeley pensó. Pensar así, es confundir la geometría abstracta del espacio con el espacio vivo del entorno. Es confundir el eje Z del sistema de coordenada con el número de pasos a lo largo del terreno hacia un objeto fijo”.

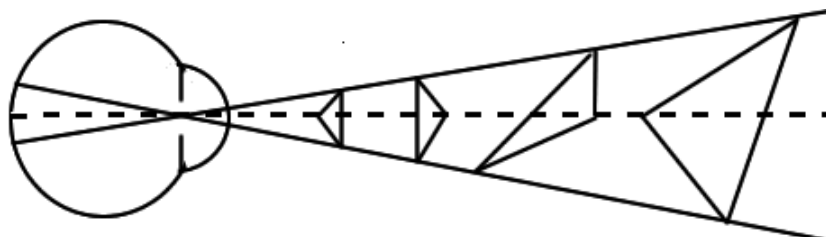


Figura 3.9 Dibujo utilizado por los estudiantes de percepción visual para ilustrar las ambigüedades de la imagen (de Aguilar, 1996)

Consecuente con su pensamiento, sustituye la perspectiva aérea por la “perspectiva terrestre” en la que deduce la distancia por la variación en la densidad de la textura de la superficie horizontal que une la distancia ojo-objeto y la posible inclinación (o volumen) por las variaciones en la textura del objeto. Gibson (1979) en su entusiasmo por las texturas, llega a afirmar que su información especifica las ofertas del campo visual, hipótesis radical, ya que implica que los “valores” y significados de un objeto dentro de su entorno puede percibirse directamente.

3.4 La percepción del contraste

En Psicofísica se han realizado numerosas investigaciones sobre la relación entre la experiencia fenomenológica de la visión y la naturaleza objetiva de los estímulos físicos que la producen. El hecho es que el conocimiento previo de estos fenómenos surgidos en la investigación psicofísica ha suscitado, y dirigido, una parte importante de la investigación neurobiológica de los últimos años. Los neurobiólogos han tratado, en efecto, de encontrar los fundamentos y mecanismos biológicos que explican por qué el sistema visual produce los fenómenos psicofísicos previamente descritos (Montserrat, 1998). En primer

lugar, se hará referencia a algunos conceptos psicofísicos; después, se tratará la investigación suscitada por los fenómenos psicofísicos de contraste que conducen al descubrimiento de la *inhibición lateral* en la retina; por fin, se considerará la investigación psicofísica sobre la frecuencia espacial del contraste que ha suscitado la experimentación, hipótesis y teorías sobre el procesamiento neuronal de las frecuencias espaciales en las diversas zonas del sistema visual.

3.4.1 Medidas fotométricas y percepción de luminosidad

Radiación electromagnética, o flujo luminoso, es la emisión, transmisión o recepción de energía en forma de ondas electromagnéticas o fotones. La *iluminación* es la cantidad de luz que incide sobre una superficie. La *luminosidad* mide la luz reflejada por una superficie. La *iluminación retinal* mide la luz que estimula la retina. La *luminosidad fenométrica* mide la impresión subjetiva de la intensidad de luz; esta última medida es más psicológica que física.

Estudios psicofísicos muestran que la percepción de luminosidad depende de varios factores:

a) La sensibilidad del ojo a la luz depende, de la progresiva *adaptación* a una situación fotópica o escotópica. Los bastones necesitan un tiempo para activarse al pasar de la luz a la oscuridad, mientras que con los conos sucede lo contrario.

b) Del *lugar de la retina* en que se proyecte el objeto. Así, en condiciones escotópicas, el objeto tendrá más luminosidad en zonas de la retina con más bastones.

c) De la *longitud de onda* de la luz; no todos los colores son igualmente luminosos sea en condiciones escotópicas o fotópicas. Es lo que se conoce como *fenómeno Purkinje*.

d) Del *tiempo de observación* y del *área visual* de los objetos.

3.4.2 Contraste de luminosidad.

Debe distinguirse entre el contraste en sí mismo y la frecuencia en que este contraste se produce. El hecho es que tanto el contraste como la frecuencia producen efectos psicofísicos específicos. Si se colocan uno junto a otro, varios cuadros que contienen en su interior un cuadrado más pequeño pintado siempre con la misma claridad de gris. El resto de la superficie envolvente de los cuadros se pinta, en cada uno de ellos, con diferentes claridades de gris: desde un gris casi negro a un gris más tenue que la claridad empleada para el pequeño cuadrado interior (Fig 3.10).

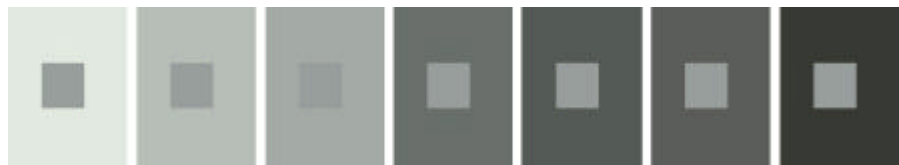


Figura 3.10 El cuadrado central tiene en todos los casos la misma claridad de gris, pero lo percibimos diferente por el influjo del fondo distinto en cada caso (de Rock, 1985).

Al contemplar y comparar simultáneamente los cuadrados tendremos la percepción subjetiva de que el pequeño cuadrado envuelto por un gris negro es mucho más claro, más luminoso, que el envuelto por un gris muy tenue.

Bandas de Mach. Ernst Mach estudió en el siglo pasado un fenómeno que se produce cuando observamos un rectángulo alargado pintado con gris negro en el extremo izquierdo y que comienza a ganar progresivamente luminosidad en un punto hasta alcanzar un nivel constante que mantiene en el extremo derecho. La percepción subjetiva de este patrón visual muestra la aparición de una banda negra más pronunciada en el punto en que comienza el aumento de luminosidad y otra banda luminosa más pronunciada en el punto en que comienza a estabilizarse la luminosidad en el extremo derecho del patrón (Fig 3.11)

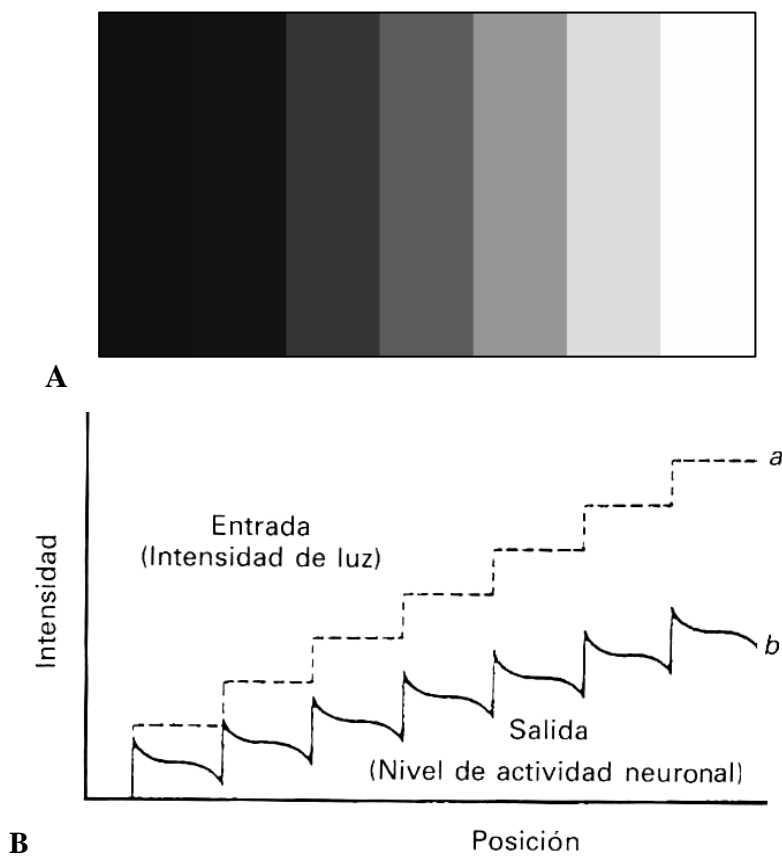


Figura 3.11. *Bandas de Mach (A) y escala de energía luminosa correspondiente (B) (de Artigas et al., 1995).*

La percepción del contraste, depende de tres factores principales:

Inhibición lateral. Estos fenómenos se expresan por el mecanismo neurobiológico que conocemos como *inhibición lateral* en las células retinianas, tal como fue investigado por Hartline et al.(1956) y Ratliff et al., (1959) en el *Limulus polyphemus* o cangrejo “herradura“, la “cacerola de las Molucas” (Fig. 3.12).

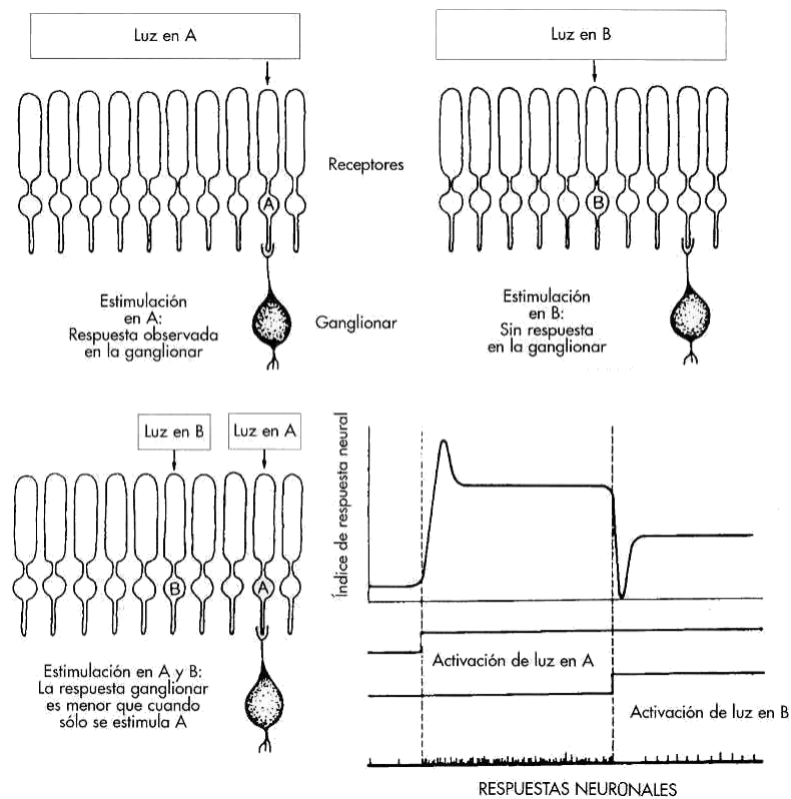


Figura 3.12. Interacción lateral, demostrada por Hartline en *Limulus polyphemus*, el cangrejo “herradura” (de Montserrat, 1998).

Registraron una célula ganglionar (A) cuyo campo receptor se procedía a iluminar, midiendo la respuesta correspondiente. Seguidamente iluminaron el

campo receptor de otra célula ganglionar adyacente (B) y comprobaron que entonces se producía un descenso de la actividad de respuesta de A ante la iluminación de su campo receptor. A este fenómeno se le conoce como *inhibición lateral* en la retina. Puede explicar los fenómenos anteriores, ya que un marco de menor luminosidad (gris negro) inhibe menos lateralmente que un marco muy luminoso. En las bandas de Mach la línea negra puede indicar que, al comenzar mayor luminosidad, se inhiben más las células adyacentes (y aparece un negro más fuerte); la línea blanca, en cambio, significa que en la zona fronteriza del cambio de luminosidad, se inhibía menos y aparece una mayor luminosidad.

Factores cognitivos. El contraste de luminosidad se ve influido también por la atención cognitiva a una de las luminosidades en contraste. La otra tiende a acercarse o asimilarse a ésta. Este fenómeno se explica también por la inhibición lateral.

Agudeza visual. Es la capacidad de distinguir con precisión el contraste entre dos superficies acromáticas de máximo contraste (blanca y negra). Se mide por los resultados perceptivos del sujeto ante las diferentes cartas de examen visual (letras, círculos, redes, líneas, etc.). Existe un ángulo visual mínimo para las imágenes que pueden distinguirse en la visión que depende, entre otros factores, de la proyección de la imagen en la retina (es mayor en la fovea que en la periferia) o de las condiciones fotópicas o escotópicas de iluminación

3.4.3 Frecuencia espacial del contraste.

Los estudios neurobiológicos realizados acerca del contraste constituyen una de las evidencias experimentales que apoyan la teoría de que la clave del

procesamiento de la información visual usa un código de frecuencias espaciales. Russell y Karen De Valois (1988) propusieron que la corteza visual funciona según un código de frecuencia espacial y no según un código de líneas rectas y bordes, como habían propuesto Hubel y Wiesel (Pinel, 2001).

El hecho que apoya la teoría de la frecuencia espacial es la observación de que las neuronas de la corteza visual responden con mayor fuerza a redes de ondas sinusoidales (redes periódicas) situadas en determinados ángulos de sus campos receptores que a las barras o a los bordes. La teoría de la frecuencia espacial se basa en dos principios físicos. El primero, es que cualquier estímulo visual se puede representar mediante un dibujo de la intensidad de la luz a lo largo de las líneas que lo atraviesan (Fig. 3.13). El segundo es que cualquier curva, independientemente de lo irregular que sea, se puede descomponer en sus ondas sinusoidales constituyentes por medio del *Análisis de Fourier*.



Figura 3.13 Estímulo visual representado por el gráfico de los cambios en la intensidad lumínica a lo largo de las secciones que lo atraviesan. Por ejemplo, aquí se muestran los cambios de intensidad a lo largo de una sección de una escena que interesaría a un depredador hambriento (de Pinel, 2001).

La *red periódica y su forma ondulatoria*. Este patrón visual está constituido por una serie de franjas luminosas separadas por franjas oscuras (Fig 3.14). Al percibirlo visualmente, captamos el contraste entre sus franjas luminosas y oscuras. Si trazamos una línea de puntos que cruce la red de forma perpendicular a las franjas y cuantificamos la intensidad de la luz en cada punto, podemos obtener una representación sinusoidal (que según los valores podría llegar a ser una onda cuadrada, con sólo dos valores de intensidad, una, para las franjas oscuras y otra, para las luminosas). Cada red sinusoidal puede describirse por cuatro parámetros: *Frecuencia espacial* es el número de franjas por unidad de longitud. Así, una baja frecuencia presenta franjas muy amplias, mientras que una alta frecuencia, franjas muy estrechas. Se mide en ciclos por grado de ángulo visual. *Orientación*: el ángulo que forman las franjas con la vertical del campo visual. *Amplitud*: la diferencia de intensidad entre los puntos más luminosos y más oscuros de la sinusoide; esta diferencia es, pues, la medida del contraste. *Fase*: posición de las bandas en relación a un punto de referencia arbitrario; si éste coincide con el punto en que comienza la sinusoide decimos que la fase es cero grados.

Análisis de Fourier de imágenes reales. El *teorema de Fourier* establece que toda imagen luminosa bidimensional puede ser descompuesta en la suma de un conjunto de patrones de franjas sinusoidales que difieren en sus parámetros de frecuencia espacial, orientación, amplitud y fase. Así, toda onda periódica puede ser descompuesta en sus llamados armónicos; o, lo que es lo mismo, sintetizada por composición de sus armónicos, calculados a partir del llamado *armónico fundamental* para esa onda. El análisis de Fourier puede, por tanto, aplicarse a una sencilla onda sinusoidal, y por su alcance teórico, también a cualquier imagen. Las imágenes de nuestro entorno pueden, así, descomponerse en una serie finita de patrones de franjas

diferenciados en sus parámetros. Obviamente, la descomposición de estas imágenes en las sinusoides elementales supondría un proceso de enorme complicación. Sin embargo, existen técnicas para ver como sería una imagen compuesta, por ejemplo, sólo con bajas frecuencias (con áreas blancas y negras muy amplias) y con altas frecuencias (con el detalle de los ángulos más pronunciados y el punteado intenso de los detalles).

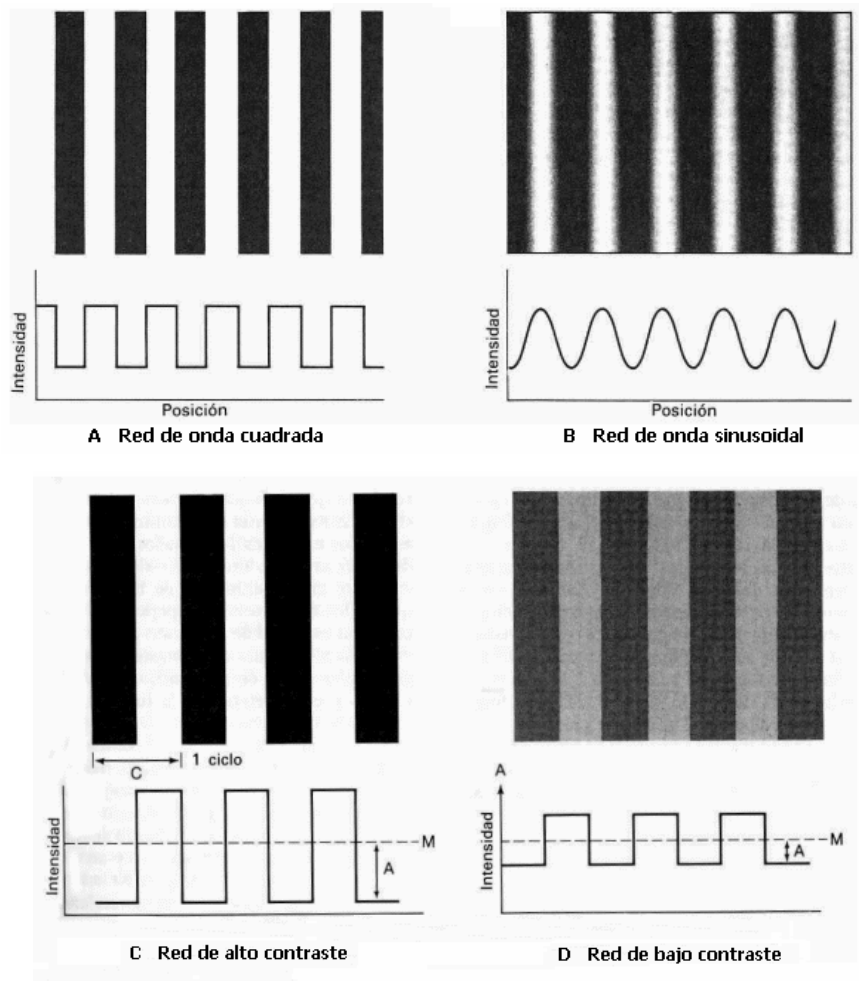


Figura 3.14. Diversos tipos de redes cuadradas y energías luminosas de las zonas más claras y más oscuras debajo de cada una de ellas (de Goldstein, 1988).

Funciones de sensibilidad al contraste (FSC). Estas funciones tienen carácter psicofísico y tienen una medida de la sensibilidad en la detección de patrones de franjas con frecuencias diferenciadas. Una vez establecida una frecuencia se va aumentando (por ejemplo, mediante un monitor de TV) el contraste entre las franjas hasta detectar cuando se produce la sensación de red (y no la de un gris uniforme indiferenciado). La función se construye colocando en un eje las frecuencias y en el otro, las medidas de las sensibilidades en que, para cada una de ellas, se produce la percepción de la red. Estas funciones muestran que las frecuencias con mayor sensibilidad están en torno a los 6 ciclos por grado (Goldstein, 1988) (Fig 3.15).

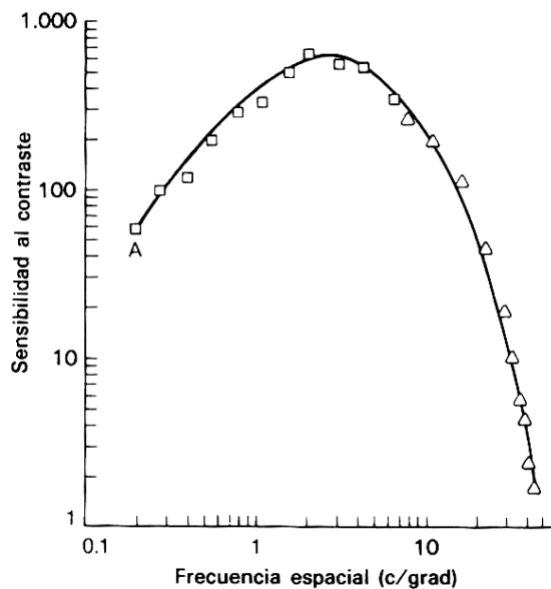


Figura 3.15 Función de sensibilidad al contraste (FSC) para redes de onda sinusoidal medida por Campbell y Robson (1968) (de Goldstein, 1988).

Canales neuronales de frecuencia espacial. Las redes periódicas son, pues, un simple patrón visual. Su importancia radica en que son patrones

visuales de distribuciones sinusoidales de luminosidad, con sus frecuencias propias.

Por ello, han servido para investigar cómo reacciona el sistema visual humano ante diferentes patrones sinusoidales o frecuencias espaciales en la distribución de luminosidad. La cuestión es: ¿discurre la información luminosa correspondiente a diferentes frecuencias espaciales por diferentes vías o canales del sistema neuronal, desde la retina hasta a las proyecciones corticales? Algunas investigaciones, que han utilizado redes periódicas como estímulos visuales, parecen sugerir que efectivamente es así. Si lo fuera, podría quizá decirse que el sistema visual humano clasifica la información luminosa de las imágenes reales procesándola por diferentes vías, correspondientes a diversas frecuencias espaciales; o al menos, sería un indicio de que podría ser así. Esta descomposición en frecuencias sería algo así como una implementación neurobiológica del análisis de Fourier. Y esto, en último término, parece también conducir a pensar que el mismo sistema visual debería en algún lugar realizar una síntesis Fourier de las frecuencias elementales para componer las imágenes resultantes (Montserrat, 1998).

Experiencias de adaptación al contraste. Campbell fue el primero en exponer la idea de que el sistema visual podría realizar el análisis de Fourier. Justificó su propuesta en experimentos sobre lo que se conoce como adaptación al contraste (Campbell y Robson 1968; Blakemore y Campbell 1968; Blakemore y Campbell 1969). Primero se procedió a construir para un sujeto su “función de sensibilidad del contraste”. Seguidamente, se le situó ante un patrón visual de cierta frecuencia y se le pidió que fuera recorriendo la red con la mirada atenta de un lado para otro, y volver a empezar, durante algunos minutos. Por último, se volvió a construir la FSC del mismo sujeto, comprobando que disminuía la sensibilidad del contraste de la frecuencia

observada (Fig 3.16).

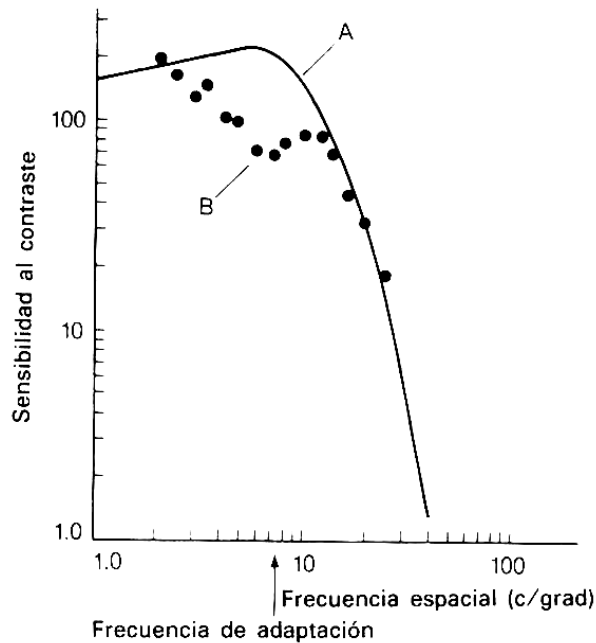


Fig 3.16. Resultados de un experimento de adaptación selectiva. La línea continua (A) indica la FSC determinada antes de la adaptación. Los datos punteados (curva B) indican la FSC determinada tras la adaptación a una red de 7,5 ciclos por grado. La adaptación produce un decremento máximo en la sensibilidad al contraste ante la frecuencia de 7,5 ciclos por grado (de Blakemore y Campbell, 1969) (de Goldstein, 1988).

Esto se apreció como una fatiga de los canales de entrada de esa frecuencia. Si unos canales de procesamiento se veían afectados y otros no, es porque estos canales existían y estaban neuronalmente diferenciados. Había, pues, adaptación selectiva por diferenciación de canales. Al menos así lo interpretaron estos investigadores.

Respuestas neuronales a frecuencias espaciales. Una primera aproximación a la posibilidad de un procesamiento selectivo de frecuencias espaciales por las neuronas la encontramos ya en la estructura de los campos receptores de las células ganglionares que conocemos. Así, una ganglionar cuya región central del campo receptor (bien sea éste “on” u “off”) tuviera

una amplitud que coincidiera con la frecuencia de un patrón de franjas determinado, ofrecería una respuesta vigorosa. Ahora bien, dada la variedad de los campos receptores de las ganglionares, así como su diferenciación en “on” y “off”, cada célula podría ser canal diferenciado de una frecuencia determinada (Fig 3.17).

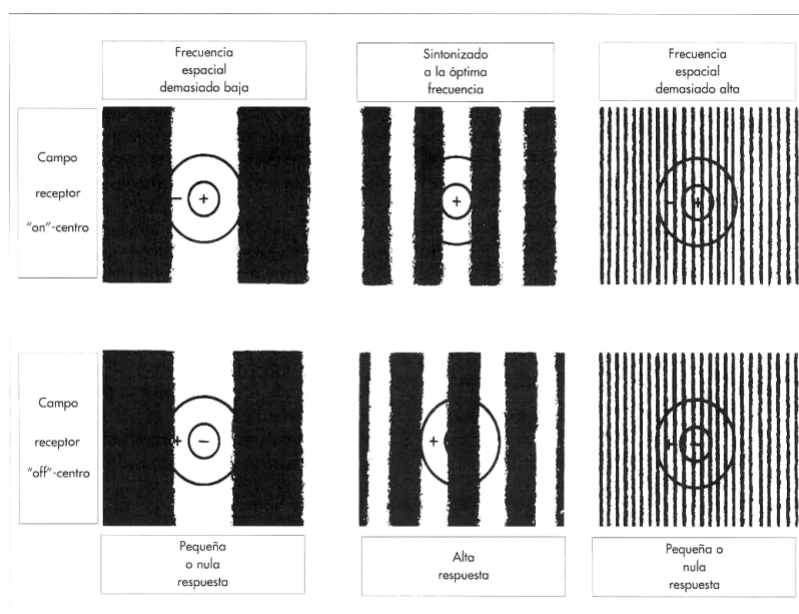


Figura 3.17 Los patrones visuales en forma de red se utilizan para investigar cómo procesa el sistema visual las diferentes frecuencias. Este proceso depende del modo en que éstas inciden sobre los campos receptores de las neuronas. El que las señales se filtren depende de cómo las franjas de la frecuencia coinciden con la estructura centro-periferia (de Montserrat, 1998).

En el estudio citado anteriormente, De Valois y De Valois (1988), realizaron un mapa de las células simples y complejas del área V1 de la corteza occipital. Demostraron la existencia de células de V1 sintonizadas a frecuencias bajas y altas, e incluso a la orientación en que se presentan los patrones de franjas. Además, unas células están sintonizadas con toda precisión y fuerza y otras de forma más tenue. Las frecuencias sintonizadas

en las células del macaco resultaron congruentes con los resultados de la FSC, establecida previamente para los mismos macacos. Igualmente, encontraron que las células que responden una misma frecuencia parecen estar localizadas en columnas perpendiculares a las de orientación en las hipercolumnas de la corteza estriada.

3.4.4 Contraste cromático

En la visión en color se produce también una estimulación por contraste, es decir, una sensación creada a partir de una información anterior. Se trata de la oposición de dos sensaciones cromáticas, de las cuales una resalta sobre la otra. El fundamento biológico son las interacciones entre las células retinianas que se agrupan constituyendo los campos receptores. Este hecho permite definir *contraste simultáneo* y *sucesivo*.

Contraste sucesivo o consecutivo. Se basa en que después de que un estímulo ha dejado de actuar sobre un receptor, la sensibilidad del mismo para ese estímulo disminuye y aumenta para el estímulo opuesto. En este caso se trata de presentar los colores en rápida sucesión, obteniéndose un efecto similar.



Fig. 3.18. Si miramos durante treinta segundos este dibujo y luego un papel blanco veremos la auténtica bandera de la Unión Europea.

El fenómeno de las *postimágenes cromáticas*, además de confirmar la teoría de los procesos oponentes, es un exponente de los fenómenos de contraste. Si se mira fijamente durante unos treinta segundos un objeto de colores bien iluminado, y luego se mira un papel blanco, aparece casi inmediatamente una postimagen negativa de los colores complementarios. Si lo hacemos así en el caso de la figura 3.18 nos aparecerá durante breves segundos la postimagen con los colores reales de la bandera de la Unión Europea. Fisiológicamente se explica por la adaptación de los sistemas neurales situados en los primeros estadios del proceso visual, es decir la retina y cuerpo geniculado (Eizner Favreau y Corballis, 1977).

Contraste simultáneo. Se origina por el efecto del fondo. Dos colores aparentemente idénticos, observados por separado, aparecen distintos si se presentan uno al lado del otro. Si se yuxtaponen una lámina incolora y otra en color, se da una acentuación del color en la línea de separación. Un objeto gris sobre un fondo rojo, tiende a aparecer con un tono verdoso, mientras que si el fondo es verde, adquiere un tono rojizo. La sombra de un objeto producida por una luz de color, se ve, al iluminarlo además con luz blanca, como una “sombra coloreada” del color antagonista. Cuando se yuxtaponen dos láminas del mismo color pero de distinta pureza, la del color más puro hace disminuir la sensación de pureza de la otra. Si se muestran un anaranjado junto a un amarillo, aquel aparecerá algo rojizo, mientras que éste último parecerá verdoso. En general, el objeto adquiere un tono complementario al correspondiente del fondo.

El *fenómeno de Fuchs* es un ejemplo claro de contraste simultáneo: la yuxtaposición de dos colores opuestos puede dar lugar: a) a una acentuación de la diferencia, si las purezas son débiles, o b) una disminución de esta diferencia, si los colores son vivos, (Fig. 3.19). Los círculos rojos son

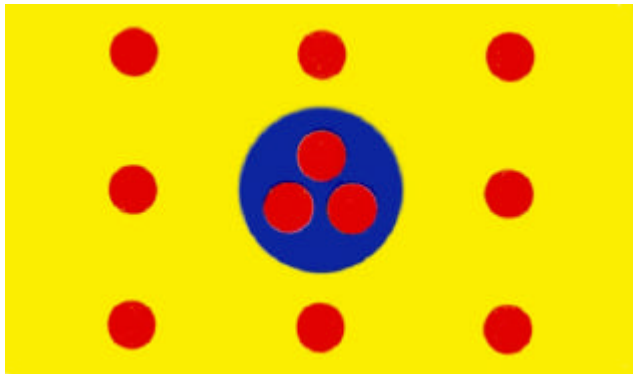


Figura 3.19 Los círculos rojos tienen los tres parámetros cromáticos exactamente iguales, pero debido al fondo parecen tener diferente tonalidad (de Saraux, 1973)

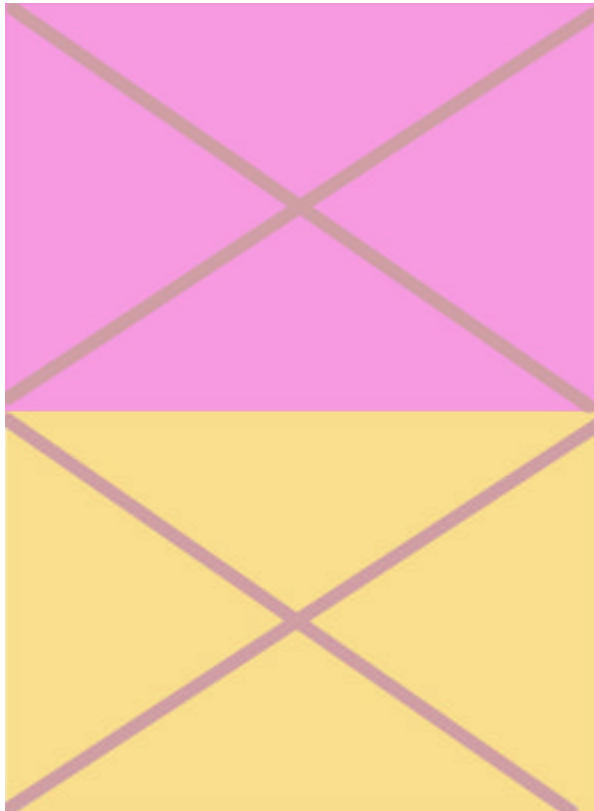


Figura 3.20. La X tiene el mismo tono (la misma lambda dominante), saturación y claridad tanto en la figura inferior como en la superior. El contraste simultáneo con el fondo hace que percibamos más oscura la que tiene un fondo más claro (de Albers, 1998).

físicamente iguales, pero su apariencia se modifica según el fondo sobre el que se encuentran.

En la lámina en color realizada por Josef Albers (1998) (Fig. 3.20) podemos apreciar este efecto. Si bien ambas están pintadas con la misma tinta, y por tanto, ambas reflejan exactamente la misma longitud de onda de la luz, la X de arriba parece amarilla, mientras que la de abajo parece gris o violeta. Puede comprobarse que tienen el mismo color mirando en el lugar de confluencia de ambas.

La explicación fisiológica del contraste simultáneo es, como se vió anteriormente, la *inhibición lateral*. Las células estimuladas por la luz circundante envían una gran cantidad de inhibición a través de las células horizontales y amacrinas, a las células estimuladas por la X de abajo con lo cual la X queda oscurecida. Por su parte, las células estimuladas por el área circundante oscura envían menos inhibición a las células estimuladas por la X arriba. Por eso, esta X está menos oscurecida que la de abajo. La inhibición lateral no sólo afecta a la oscuridad de ambas X, sino que también influye en sus colores, dando lugar a que la X de abajo parezca ligeramente violeta y la X de arriba ligeramente amarilla. Así pues, la percepción del color no viene determinada únicamente por la longitud de onda dominante, sino que el fondo también la afecta.

3.4.5 Efecto de asimilación, expansión, o efecto Bezold

Sin embargo, no siempre la variación de luminancia o la cromaticidad entre dos regiones yuxtapuestas mejora la percepción de los objetos, sino que también existen efectos de interacción contrarios, que tienden a disminuir las diferencias existentes. Estos efectos se conocen con el nombre de

asimilaciones. El contraste lleva a un incremento de las diferencias percibidas entre campos vecinos, mientras que la asimilación conduce a una reducción de la misma. Es relativamente fácil demostrar estos efectos, pero la localización precisa de esos efectos en nuestro sistema de percepción aún no es posible. La *asimilación* (también conocida como expansión) en percepción implica la tendencia a percibir el objeto como si éste incluyera, o incorporara, las propiedades de ciertos elementos próximos o del fondo en el caso de la visión. Por ejemplo, en fonética es muy frecuente que unos sonidos tomen rasgos de sonidos vecinos, con lo que se asemejan más, ya que se aproximan en algunos aspectos. Puede darse por contacto (la más frecuente) o a distancia (metafonía) (Martínez Celdrán, 1994).

En percepción visual, la adición de franjas finas de diferente claridad a un campo homogéneo afecta a la claridad con la que se percibe éste. Las franjas claras lo aclaran y las oscuras lo oscurecen (Wandell, 1995). Cuando el estímulo aumenta su frecuencia espacial, o se hace cada vez menor, el efecto del contraste simultáneo directo desaparece y es reemplazado por el *contraste simultáneo inverso* o *asimilación* (Fig. 3.21). En general la

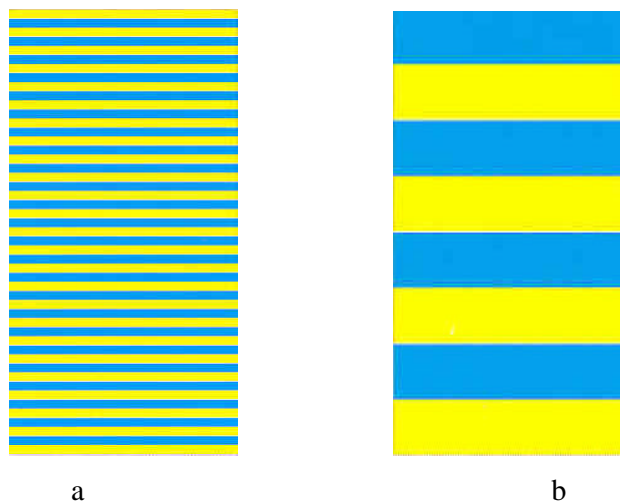


Figura 3.21. Comparación del contraste inverso asimilación (a) y contraste simultáneo (b) (de Wandell, 1995).

nomenclatura utilizada suprime la palabra directo en el primer caso y la palabra simultáneo en el segundo, de forma que se utilizan dichos conceptos como *contraste simultáneo* y *contraste inverso* respectivamente.

En percepción cromática, la asimilación es la mezcla aparente de un estímulo de color con su entorno. Un ejemplo histórico puede ilustrar muy bien los efectos del contraste cromático inverso. A principios del siglo XIX existía en París un reputado taller de tapicería a cargo de Mr Gobelín. Los tapiceros de dicho taller notaban que la lana teñida de negro que utilizaban aparentaba estar descolorida. Se solicitó ayuda técnica al químico M.E. Chevreul (1839) (Fig. 3.22) quien comparó el tinte negro utilizado en dicha factoría, con uno similar utilizado por otros tapiceros.

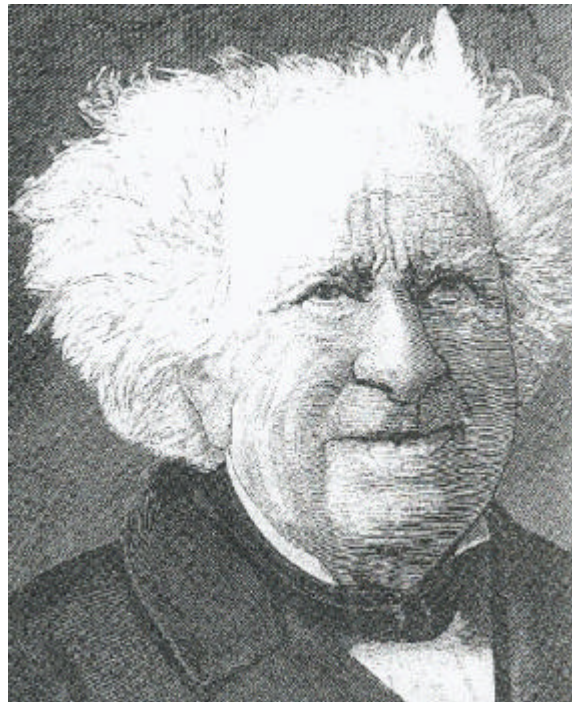


Figura 3.22. Rostro de Chevreul hecho con una técnica de grabado en la que la mayor o menor proximidad de las líneas negras sobre fondo blanco, definen las sombras de la cara. Precisamente esta técnica se basa en el fenómeno de la asimilación (de Faber Birren, 1987).

Se concluyó que el tinte de Gobelin era tan negro como los demás tintes y que la causa de la aparente decoloración estribaba en el color de las lanas adyacentes al negro en el propio tapiz y no en la propia lana negra. El negro “aparecía desteñado” por el efecto de los colores circundantes. Los estudios de Chevreul (1839) exploraban la importancia de la expansión y el contraste en el diseño de tapices (Fig. 3.23). Se trataba de que la apariencia del color original se preservara incluso si los diseños cambiaban en la configuración espacial o en el color del fondo. Se llegó incluso al punto de que los diseñadores de tapices necesitaban cambiar físicamente el color original para preservar la apariencia del color requerida.. Respecto a la percepción cromática, este efecto parece contradecir el contraste simultáneo de color.



Figura 3.23 Diseños hechos para tapices en la época de Chevreul. En su obra hace comentarios sobre las combinaciones adecuadas de los colores. En todos los casos, el motivo central tiene el mismo tono cromático aunque aparece más oscuro o más claro según el fondo de color que lo rodea (de Faber Birren, 1987 a partir del original de Chevreul, 1839).

En la figura 3.24 original de Von Bezold (1876) se han utilizado la mismas tonalidades de tintas roja y azul. Por causa del contraste simultáneo, cabría esperar que la tinta negra del rojo hiciera aparecer a éste más claro, o que el

blanco al lado del rojo produjera un rojo más oscuro. Sin embargo, por efecto de la asimilación sucede lo contrario. El azul rodeado de blanco aparece menos saturado que el rodeado de negro. Asimismo, el aparente oscurecimiento del rojo se debe a la presencia de las líneas negras; su clarificación en el centro se debe a la presencia de líneas blancas. Parece como si la oscuridad del negro se expandiese, haciendo más oscuro al rojo y también hiciera lo propio la claridad del blanco, haciendo más claro al rojo.

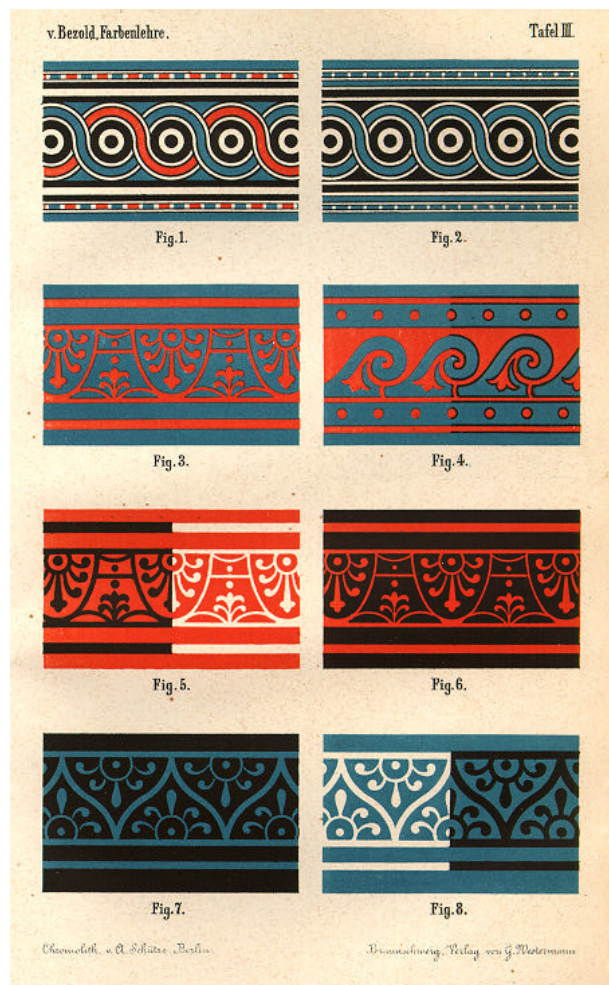


Fig 3.24 El tono, saturación y brillo del azul y rojo en cada lado de las cenefas, es el mismo. Sin embargo, el efecto de asimilación hace que los percibamos diferentes (de Von Bezold, 1876 en Hans Jrtel Color Vision, 2002).

Von Bezold, que describió este efecto en 1876, lo denominó *efecto de expansión*, y posteriores investigadores se refieren a él como *efecto Bezold* o *efecto de asimilación*. Otras denominaciones son: *contraste inverso* o *contraste anómalo*.

Chevreul, a quien se recuerda como un eminente químico y una de las mentes más preclaras de su época, tuvo sin embargo, gracias a sus estudios sobre el color, (clásicos en percepción cromática) una gran influencia en los artistas impresionistas y neoimpresionistas como, Monet, Seurat , Pissarro y Van Gogh (Fig. 3.25).

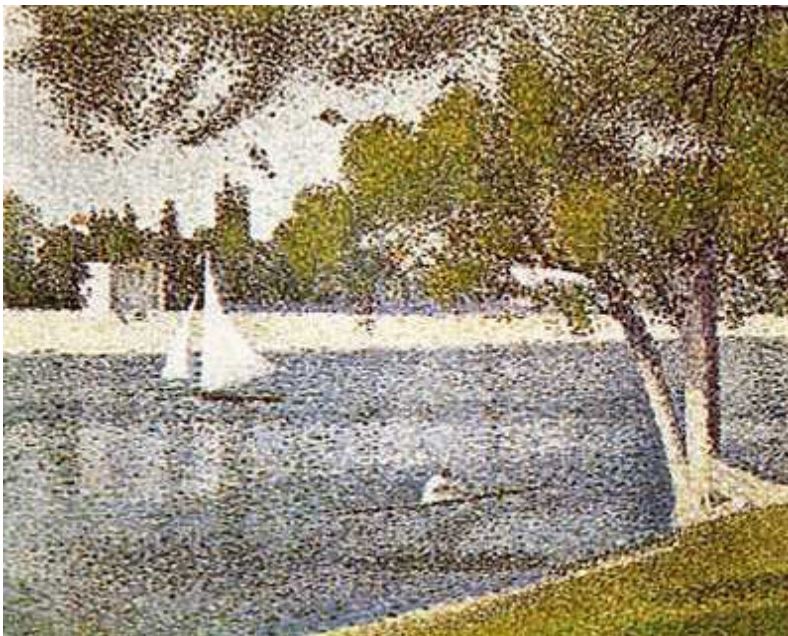


Figura 3.25. Muestra representativa de la técnica del puntillismo. Hermoso paisaje con el Sena de fondo pintado por Seurat.

El divisionismo impulsado por Seurat, aspiraba a dotar a la pintura de una fundamentación científica al proponer que el proceso pictórico estuviera regulado por las leyes de la óptica. A partir de las teorías de Chevreul, cuyo

libro *Contraste simultáneo de los colores* alcanzó una amplia difusión en los medios parisienses del siglo XIX, el divisionismo propugnó el empleo exclusivo de los colores puros y complementarios aplicados mediante pequeños toques de pincel a modo de puntos, de donde deriva la otra denominación con que se conoce dicho movimiento: *puntillismo*.

Desde los estudios de Chevreul en 1839, son escasas las investigaciones respecto a la asimilación en percepción visual. Helson en 1963 publicó un interesante trabajo acerca del contraste anómalo y la asimilación basados en los estudios de Chevreul y von Bezold, que demostraban que las franjas blancas clarean y las negras oscurecen zonas contiguas. Helson efectuó diversas experiencias probando cómo el efecto depende de la anchura absoluta y relativa de las franjas, de las áreas intermedias y de sus respectivas reflectancias. Por otro lado, hay una continuidad de contraste inverso a contraste clásico, en el que existe un intervalo en el que no se da asimilación ni contraste. Para grises de aproximadamente un 36% de reflectancia, la asimilación aparecía con franjas superiores a 8-10 mm, mientras que con grises del 80% y del 14% de reflectancia, la asimilación ocurría cuando las franjas blancas y negras superaban los 29 mm de anchura (Fig 3.26).

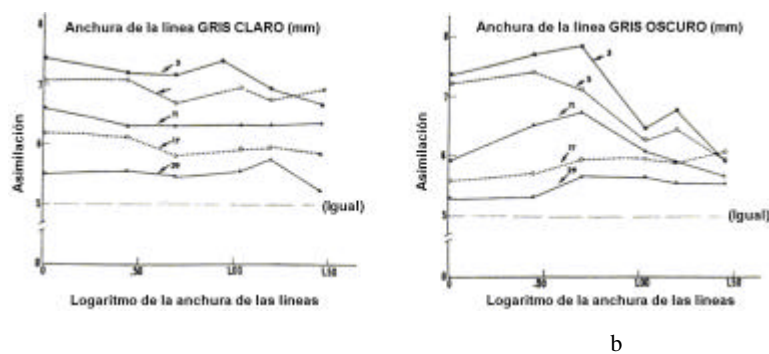


Figura 3.26 a) asimilación en función de la anchura de la franja con un fondo del 80% de reflectancia. b) asimilación en función de la anchura de la franja para un fondo del 14% de factor de luminancia (β) (de Helson, 1963).

Festinger en 1970 explicó la existencia de la asimilación o el contraste en términos de percepción de primer término/fondo: si una parte del estímulo es considerada como 1º término, el contraste se produce entre esta parte y el fondo, pero si la misma parte del estímulo es vista como fondo, la asimilación tiene lugar dentro de esta parte. Esto implica que la existencia de la asimilación no precede a la separación entre la figura y el resto del dibujo, o como mínimo, depende sólo hasta cierto punto de esta separación. En el caso extremo, esto significa que la asimilación sólo tiene lugar después de la separación entre la figura y el resto del dibujo, lo cual es poco probable que sea un fenómeno de retina.

Kanizsa en 1979 (Kanizsa, 1986) describió un aspecto particular del efecto de asimilación: la influencia de la actitud del observador. Los efectos de la asimilación son muy distintos si el observador no fija la vista de forma continuada. De hecho, él afirmó que un observador no entrenado percibe claramente la asimilación, mientras que un observador entrenado, como por ejemplo un pintor, está menos seguro de si lo que tiene lugar es asimilación o contraste (Kanizsa fue a la vez pintor y estudioso de la percepción visual). Kanizsa atribuyó esta diferencia a la distinción que los observadores entrenados hacen entre las características cromáticas de los objetos y la naturaleza de la iluminación, y supuso que un observador no entrenado ignoraba completamente esta distinción.

Más recientemente, el equipo de Charles M.M. de Weert en Holanda ha llevado a cabo varios estudios relacionados con el contraste y la asimilación. En el primero de ellos (de Weert , 1991) enfatiza que los fenómenos perceptivos no pueden ser explicados exclusivamente por procesos arriba-abajo (botton-up). Propone que si bien el contraste es un fenómeno muy importante, no lo son menos otros fenómenos que no deben ser relegados a

un segundo orden. Nos recuerda que en el texto de Russel y Karen De Valois (1988), éstos matizan cómo la asimilación podría ser un fenómeno más corriente en la vida cotidiana que el contraste simultáneo clásico. Un ejemplo muy común es la diferencia de color percibido en los ladrillos de una pared con o sin cemento en las juntas. Posteriormente, De Weert y Spillmann (1995) experimentaron con unos optotipos en blanco y negro y de colores, formados por segmentos de arco con gris de fondo. Las figuras centrales (áreas en gris), rodeadas por cuatro segmentos de arco, parecen ser más oscuras cuando están rodeadas por arcos negros y más claras, cuando los arcos son blancos (Fig. 3.27).

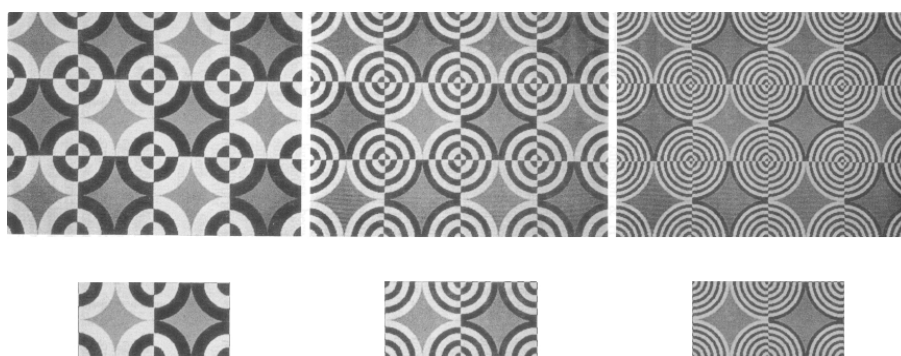


Figura 3.27 Optotipos en forma de mosaico contruidos a partir de segmentos de arco que dejan en el centro áreas grises (arriba). Abajo, detalle de dos de estas zonas para las diferentes anchuras en las que se aprecia cómo las áreas grises parecen más oscuras al estar rodeadas de arcos negros y más claras si lo están por arcos blancos (de De Weert y Spillmann, 1995).

Pero en uno de sus experimentos de igualación de luminancias, demostraron que esta diferencia de apariencia era relativa. Mientras la figura aparentemente más oscura requiere una igualación de luminancia que es inferior a la del fondo (asimilación), la que parece más clara es curiosamente igualada para un valor “más oscuro que el del fondo” (contraste simultáneo). Se aprecia un giro hacia una mayor luminancia sólo en el caso del contraste

más bajo. El decremento requerido para igualar la claridad de los optotipos aumenta cuando aumenta el contraste de los estímulos inducidos, tanto como con la distancia a que son observados. Estos autores habían titulado su trabajo: “Asimilación, ¿asimetría entre la claridad y la oscuridad?” entendiéndolo por asimetría, el hecho de que las zonas oscuras oscurecieran las claras contiguas y viceversa.

En otro trabajo (De Weert y Kruysberger, 1997) discuten estos autores los efectos periféricos y centrales de la asimilación.: En uno de sus experimentos, la fuerza de los efectos de asimilación fueron modificados al añadir interferencias visuales (Fig. 3.28).

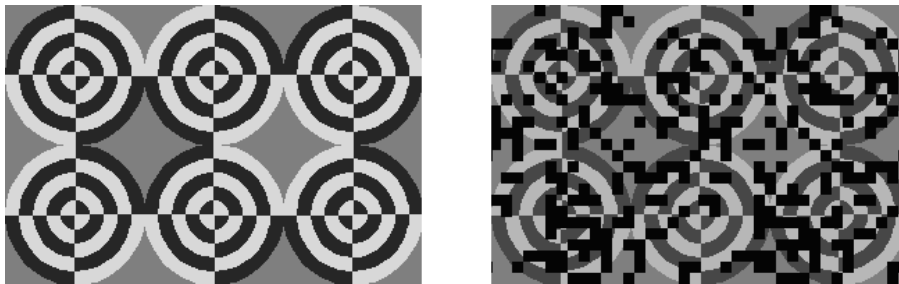


Figura 3.28. A la izquierda, el mismo optotipo que en el estudio anterior y a la derecha, la misma figura menos contrastada y a la que se han añadido interferencias (de De Weert y Kruysberger, 1997)

Variando la localización de las interferencias añadidas en el espacio percibido (presentando el modelo de interferencia con diferentes disparidades binoculares), el efecto enmascarador de estas interferencias se puede influenciar. El emmascaramiento causado por una interferencia binocularmente dispar es menor que el causado por una interferencia binocularmente no dispar. Se concluye entonces, que el efecto, al menos en parte, ocurre más allá del punto (binocular) de separación en diferentes planos de profundidad. Se presenta un planteamiento similar que incluye

también interferencias en movimiento. Finalmente, diversas pruebas demuestran que imágenes que son periféricamente similares, pueden dar lugar a diferencias en el grado de asimilación percibida si se hace intervenir el sistema central, como por ejemplo mediante efectos de estereopsis.

En la figura 3.29 vemos un estímulo estereográfico que produce un cambio en la apariencia dentro de un único plano. El plano "rojo" y el "plano" verde se cruzan en profundidad a lo largo de la línea vertical del medio y con este cruce la apariencia del fondo cambia. Con una cuidadosa observación de uno de los estímulos monoculares, se puede observar una escisión de los planos de profundidad, e incluso, una inversión de orden. Los sujetos observaron un cambio en la apariencia de la figura del fondo percibida si la percepción de la figura dibujada en rojo ("el fondo parece rojizo") se alternaba con la percepción de la figura dibujada en verde ("el fondo parece verdoso"); o, en el caso de los estímulos acromáticos si la percepción de la figura dibujada en blanco ("el fondo parece más luminoso") alternaban con la percepción de la figura dibujada en negro ("el fondo parece más oscuro").

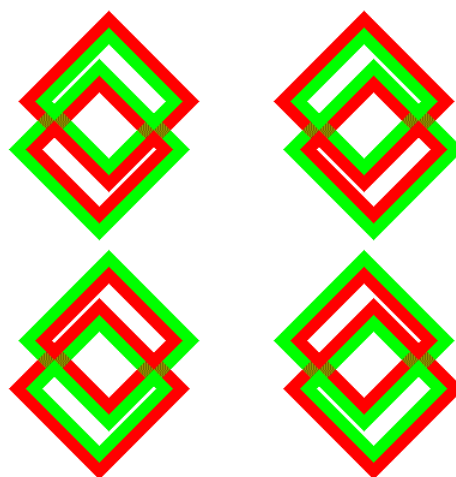


Figura 3.29. La combinación estereoscópica lleva a la percepción de dos figuras en profundidad y a diferentes patrones de asimilación (de De Weert y Krusberger, 1997).

En estudios anteriores, ellos mismos (de Weert y van Kruysbergen 1987; de Weert 1991) habían propuesto que los efectos de asimilación pudieran estar basados en la zona limítrofe de color y/o luminancia dentro de grandes campos receptores. A partir de los nuevos resultados desecharon esta idea, ya que estos últimos experimentos muestran claramente que la asimilación ocurre después de la separación del dibujo entre figura y fondo, o, como mínimo, después de la separación en diferentes planos de profundidad. Las demostraciones presentadas en este estudio implican que cualquiera que sea la naturaleza precisa del proceso de asimilación, este no puede ser puramente un proceso de inversión de la retina. La explicación más plausible es que el proceso de asimilación (y posiblemente también el de contraste) sea en principio un efecto periférico, pero con un gran efecto recíproco en un nivel central (Gove et al 1995). La idea de que los efectos centrales pertenecen al fenómeno de contraste, también ha sido dada por De Valois y De Valois (1988). Por otra parte, Sugita (1995) aporta pruebas de que la asimilación tiene un origen cortical, pero no lo hace en el caso del contraste.

Un efecto relacionado con la expansión, pero más complejo, conocido como *efecto expansión de neón* ha sido estudiado por varios grupos de investigación (incluido el propio De Weert), entre los que destacan las investigaciones llevadas a cabo recientemente por el equipo de Paola Bressan (Bressan, 1993,1995; Bressan, Mingolla, Spillmann y Watanabe, 1997; da Pos y Bressan 2003) en la Universidad de Milán (Fig. 3.30).

Asimismo, son interesantes los estudios de este efecto (también basados en percepción estereoscópica), realizados por el equipo de Marja Linasuo en la Universidad de Helsinki (Linasuo et al., 2000) (Fig. 3.31). El efecto expansión de neón fue descrito, en primer lugar, por van Tuijl 1975 y estudiado posteriormente por van Tuijl y De Weert en 1979. La expansión

neón es una interesante combinación de percepciones de expansión y transparencia.. Para de Weert, (1997) el efecto de expansión de neón, también parece apuntar a la idea de que el análisis figura-fondo (o más probablemente, una escisión de las propiedades del material y la iluminación) tiene que haber ocurrido antes de que la asimilación tenga lugar, pero no al revés.

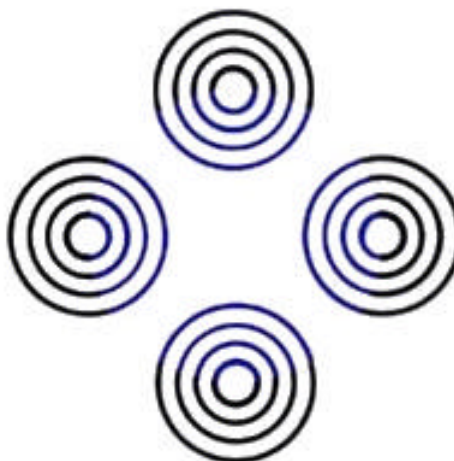


Figura 3.30 Un bello ejemplo del efecto de expansión de neón. El efecto de la asimilación parece originar una zona difuminada a modo de neblina, al igual que la iluminación con lámparas de neón de donde le viene el nombre (de Bressan, 1997)

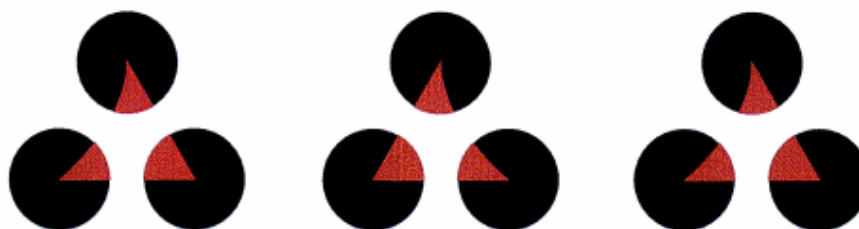


Figura 3.31 a) Si fusionamos (estereopsis) la figura central con la de la izquierda, se produce la ilusión de un triángulo convexo ilusorio con una superficie rojiza por encima de los inductores negros. Si se fusionan la figura central con la de la derecha, se percibirá un triángulo rojo cóncavo con efecto expansión de neón (de Linasuo et al. 2000).

Para concluir esta breve incursión en el ámbito del efecto expansión, haré una breve referencia a los experimentos que llevaron a cabo Kingdom y Moulden en 1991 acerca de la denominada *Ilusión de White* (White, 1979, 1981) (Fig. 3.32). Este autor había observado que los segmentos grises que reemplazan a franjas negras (figura de la izquierda en blanco y negro) parecen más claros que los segmentos grises que reemplazan a las franjas blancas (figura de la derecha). De esta forma, los segmentos grises de la parte derecha de la figura están rodeados de blanco a todo lo largo de sus bordes, lo que hace que se perciban más oscuros, mientras que en la parte izquierda aparecen más claros, por estar rodeados de negro en sus bordes longitudinales.



Figura 3.32. *Ilusión de White* (de Kingdom y Moulden, 1991).

Kingdom y Moulden piensan que la ilusión o “efecto White” puede ser debida tanto a la asimilación como al contraste clásico, siendo para ellos mucho más marcado este último. Su razonamiento es el siguiente: Los segmentos grises que reemplazan a las franjas negras están integrados espacialmente con las barras blancas intermedias, y realmente, los segmentos blanco+gris son más claros que los segmentos negro+gris, con lo que no tendría efecto la inhibición lateral, propia del contraste clásico, de forma que el efecto sería de expansión o asimilación.

Sin embargo, cuando estos autores diseñaron un optotipo semejante pero con colores, (figura de la derecha) lo que se percibe es que los segmentos grises situados entre las franjas naranjas y rosas, parecen teñidos de azul y verde respectivamente, (complementarios al naranja y al rosa) tal y como predice el contraste clásico (que implica inhibición lateral). No aparece aquí ningún proceso de asimilación que “tiña” los segmentos grises de naranja y rosa.

PARTE II

Metodología experimental

CAPÍTULO 4

Metodología experimental

4.1 Introducción

Las magnitudes psicofísicas de una muestra cromática varían en función de que la visión sea central o lateral, tamaño, tiempo de observación, luminancia de fondo y adaptación, tanto temporal como espacial. En esta investigación se pretende analizar por una parte la variación en la percepción del oscurecimiento de un test cromático periódico (secuencia lineal de pequeños cuadrados rojos) con una *red cuadrada blanca-negra de Ronchi* (red de Ronchi de contraste máximo) como fondo, cuya anchura de banda es la misma que la de los cuadrados rojos. Por otra parte, demostrar para qué tamaño del test desaparece dicho efecto asimilación a partir del acercamiento del observador al optotipo. El efecto expansión origina una disminución en la claridad (influencia de las franjas negras intercaladas).

Sin negar la posibilidad de que el efecto expansión pueda justificarse fisiológicamente, como afirman Hurvich y Jameson, por la existencia de unidades receptoras de distintos tamaños en la zona en que se forma la

imagen retiniana, este efecto puede explicarse psicológicamente dentro del marco de la *teoría gestaltiana*, aplicándola no sólo a la interpretación de las formas y detalles de la escena visual, sino también a la visión de su colorido. En este caso, la secuencia espacial de cuadros negros (virtuales) y rojos, no sólo da lugar a la percepción de una línea (principio de continuidad), sino también a la percepción de un color más oscuro, expandiendo el negro a lo largo de dicha línea.

4.2 Objetivos

El objetivo de este proyecto es en un primer término cuantificar *el efecto expansión* o *efecto Bezold* que se conoce también como *contraste de asimilación* o *contraste inverso*, en una secuencia lineal de pequeños cuadrados rojos de 1cm de lado (ángulo visual de 12,5') situados en una red cuadrada de contraste máximo (*red de Ronchi*) con la misma anchura de banda que el lado de los cuadrados rojos y con orientación horizontal. En otras palabras, cuantificar la cantidad de "negro" que un entorno reticular (red cuadrada) hace que nuestro cerebro "añada", desde un punto de vista perceptivo, a un determinado color.

El fundamento neuropsicológico es la organización perceptiva innata en nuestro cerebro, que tiende a representarse los escenarios como formas conocidas. En efecto, puesto que en cada franja blanca hay únicamente un cuadrado rojo, el observador verá una línea de puntos negros y rojos; línea que oscurece el rojo de los puntos consecuencia del *contraste de asimilación* (*efecto Bezold*). Este oscurecimiento es aumentado por el contraste normal debido a las franjas blancas que actúan individualmente sobre cada punto.

En un segundo término, se ha comprobado a qué distancia de observación desaparece *efecto Bezold*. Es decir, valorar la pérdida de percepción del oscurecimiento en función del ángulo subtendido (tamaño del optotipo).

4.3 Metodología

Con el propósito de fijar las variables para el desarrollo de la fase experimental propiamente dicha, se hizo una *fase preexperimental*, a partir de la cual se decidió cambiar algunas de las variables y añadir la nueva variable tamaño, tal y como se justificará a continuación. Se describirán en paralelo los sujetos y los procedimientos para las dos etapas, ya que salvo dichas variaciones, se ha procedido de la misma forma en ambas.

Fase preexperimental. Observando las medias de los umbrales para todos los observadores, se pone de manifiesto que el *punto de igualdad subjetiva* (valor percibido del efecto Bezold), en casi todas las condiciones de iluminación, se encuentra cuando el porcentaje de ennegrecimiento está próximo al 15 %. En efecto, en el cambio de respuesta de “menor que” a “mayor que” los sujetos tienden a cambiar los juicios sensoriales en el intervalo 10 %-15 % de ennegrecimiento.

En general se observa en esta fase previa que el umbral diferencial se ve poco afectado por la iluminación. Al menos ésta no ejerce un efecto sistemático ni lineal sobre la discriminación. En todas las condiciones el umbral se sitúa en torno a un porcentaje de ennegrecimiento del 12% al 15%.

Por debajo del 10 % y por encima del 20 % los juicios perceptivos discriminan sistemáticamente las presentaciones experimentales con

referencia al estímulo estándar como menores o mayores respectivamente.

4.3.1 Sujetos

En la fase preexperimental se eligieron 5 observadores. Si bien es deseable un mayor número de observadores, dada la naturaleza del trabajo experimental en el que cada observador debe hacerlo durante un relativamente largo período de tiempo (dos cursos académicos en nuestro caso), se pensó que era un número suficiente. Por otra parte, las investigaciones en psicofísica de la visión se efectúan generalmente con uno, dos o tres observadores, siendo excepcionales las que superan el número 10. Así pues, los observadores son cinco personas, tres mujeres y dos varones con edades comprendidas entre los 21 y los 45 años. En esta primera etapa se trabajó con optotipos en los que los cuadrados tenían 1cm de lado.

OBSERVADOR 1: Ana Isabel Megino Quesada (23 años). Alumna de tercer curso de la Escuela de Optica y Optometría de Terrassa.

OBSERVADOR 2: Joan Gómez Lara (22 años). Alumno de tercer curso de la Escuela de Optica y Optometría de Terrassa.

OBSERVADOR 3: M^a Carme Blasi Ramírez (42 años). Auxiliar de laboratorio de la Escuela Universitaria de Optica y Optometría de Terrassa.

OBSERVADOR 4: Juan Carlos Ondategui Parra (35 años). Profesor de Optometría de la Escuela Universitaria de Optica y Optometría de Terrassa.

OBSERVADOR 5: Guadalupe Götzens García (45 años). Profesora de Fisiología y Bioquímica Ocular de la Escuela Universitaria de Optica y Optometría de Terrassa.

Las edades están referidas al comienzo del trabajo experimental de la investigación en 1999. La colaboración de las personas es gratuita y todos ellos han realizado previamente diversas pruebas visuales para comprobar que no padecen ninguna disfunción visual, especialmente respecto a la percepción cromática.

Etapa experimental.

Dado que los resultados de uno de los observadores discrepaban significativamente del resto del grupo, se ha optado por prescindir de los datos del observador 5. Por otro lado, el observador 4, se ve obligado a abandonar la experimentación por motivos personales. Permanecen pues los observadores 1, 2 y 3, con los que se ha llevado a cabo la segunda parte del proyecto de investigación.

4.3.2 Materiales

Como parámetros variables para la medición estadística, se decidió comparar en un primer término la incidencia de dicho efecto con al menos 5 iluminaciones diferentes. Iluminaciones: 250 luxes, 500 luxes, 1000 luxes, 1500 luxes, 2000 luxes. Estas iluminaciones se eligieron como referencia a diversas situaciones cotidianas de iluminación. Así, 250 luxes viene a ser la iluminación de unas escaleras con luz natural, prácticamente el umbral de visibilidad. 500 luxes correspondería al vestíbulo de una casa. 1000 luxes la iluminación con que se trabaja en un garage o en un taller de corte y confección. 1500 y 2000 luxes serían iluminaciones en las que se requiere una perfecta visibilidad, sobre todo cuando se requiere distinguir bien los colores, como por ejemplo en el caso de un escaparate o en la tintorería.

Visto el efecto poco significativo de la iluminación con iluminaciones próximas, se añade la variable tamaño y se utilizan iluminaciones que dupliquen en luminancia la precedente. Se trata de acotar la diferencia de iluminaciones para ver si con mayores diferencias se observa algún cambio en la respuesta del observador.

Las iluminaciones elegidas son: 500 luxes, 1000 luxes, 2000 luxes. Los diversos tipos de iluminación se han obtenido a partir de la combinación de las emisiones de luz de uno o dos proyectores de diapositivas REFLECTA con dos tipos de filtro COKIN uno de los cuales filtra el 50% la luminancia (A 152), y el otro el 25% (A 153). El control de la iluminación se efectuó con un luxómetro GOSSEN, modelo MAVOLUX digital (Fig. 4.3).



Figura 4.3. Luxómetro digital Mavolux utilizado para la medición de la iluminación.

Características de la red cuadrada y del colorímetro.

El color rojo de partida tiene una *I dominante* de 620 nm y una *pureza* de 0,56, siendo su *factor de luminancia* β : 0,20. Todas estas mediciones han sido llevadas a cabo con un telecolorímetro “photoresearch P.R. 650 SPECTRASCAN” que tiene un rango espectral comprendido entre 380 y 780 nm (Fig. 4.1).



Figura 4.1 Telecolorímetro “Spectrascan 650” utilizado en la determinación del color investigado.

Para cuantificar el “oscurecimiento perceptivo” se colocan enfrente de cada observador (a distancias diversas que se justifican más adelante) dos optotipos que deben compararse según se describe a continuación:

A una altura aproximada de 50 cm sobre el plano horizontal (encima de una mesa o plataforma) se coloca la red cuadrada, e inmediatamente por debajo de la red en sentido vertical, un círculo (*colorímetro*) del mismo color que el color a investigar (Fig. 4.2 b), y el cual se superpone mediante sendas incisiones hasta el centro, con otro círculo negro que permite que se pueda entremezclar con el de color en proporciones variables (segmentos de círculo), de modo que el observador tiene enfrente los dos optotipos, la red cuadrada y el colorímetro en el mismo plano vertical (Fig. 4.2 a). De esta forma los optotipos quedan aproximadamente a la altura de la mirada del observador que estará sentado y apoyado en la plataforma de observación.

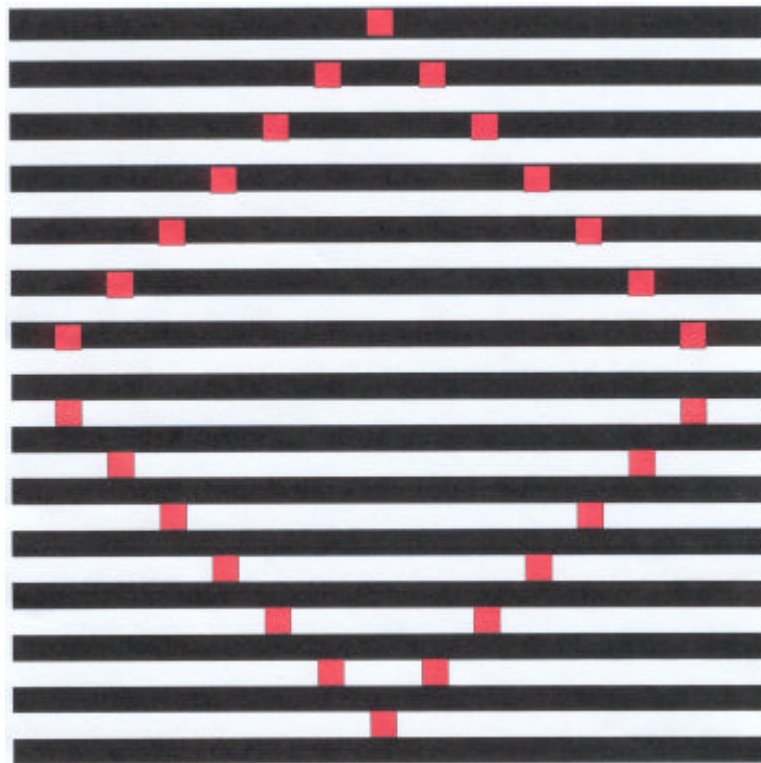
En la red se han perforado unos cuadrados en diagonal en las franjas blancas, en su parte inferior y en las negras, en su parte superior. El color a investigar se observará en los huecos que dejan dichos cuadrados dentro de las franjas blancas ya que en el plano de detrás de la red se pone una cartulina del color a investigar, (por tanto, los cuadrados tienen físicamente el mismo tono que dicho color) cuyo lado mide lo mismo que la anchura de la red.

Sólo se tendrán en cuenta para la experiencia los cuadrados perforados en las franjas blancas, ya que es en estos cuadrados en donde se percibe el efecto de oscurecimiento al tener cada cuadrado encima y debajo una franja negra y estar flanqueado por blanco en su propia franja. Los perforados en las franjas negras pueden servirnos de referencia para ver la gran diferencia de claridad con que se perciben unos y otros, aunque como es evidente pertenecen a la misma lámina de color.

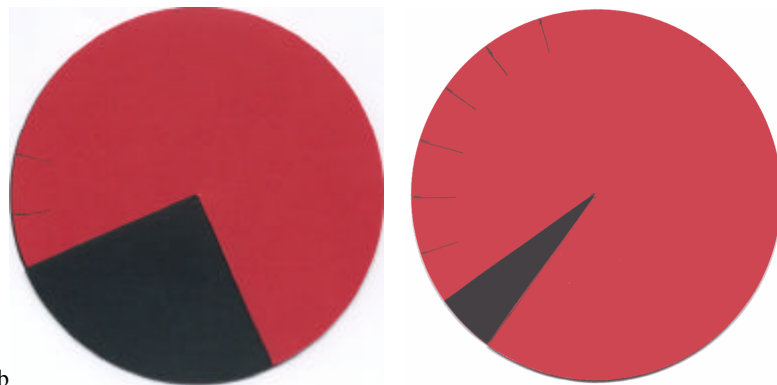
Esta disposición permitirá una comparación entre el "color perceptivo" que integra nuestro cerebro (grado de oscurecimiento por el efecto de asimilación) y la cantidad de negro real que se le va añadiendo al círculo de color, conjunto al que se le hace girar hasta una velocidad que supere la frecuencia crítica de fusión del sistema visual humano, de forma que no se perciban dos colores sino sólo un rojo oscurecido según las gradaciones de segmentos circulares negros que se le añadan.

En la figura 4.2 se muestra un ejemplo de lo que observa cada sujeto: la red cuadrada en la que se aprecian las claridades subjetivas de los cuadrados superiores (en franja negra que no será utilizado para el experimento) y los inferiores (en franja blanca). Debajo aparecen dos imágenes del colorímetro correspondientes a dos de las seis posiciones del segmento de círculo negro que se superpondrá con el rojo, sistema al que se le hará girar para oscurecer de forma diferente el color rojo a investigar. Estas divisiones se han efectuado dividiendo el círculo rojo en cien partes y en cada presentación se tomarán tres (3%), cinco (5%), diez (10%), quince (15%), veinte (20%), o veinticinco (25%). Estos porcentajes reales de cantidad de negro serán los estímulos que en secuencias totalmente al azar, serán presentadas el mismo número de veces a los observadores en cada sesión.

Por otro lado, el motivo de aplicar la variable tamaño (distancia del optotipo medida en minutos de arco) es cuantificar para qué tamaño del cuadrado (red cuadrada) desaparece el *efecto Bezold* o de *asimilación*. Se ha decidido que el tamaño del cuadrado de la red se duplique (para que sea significativo), en cada serie de mediciones, lo que equivale a acercar el optotipo a la mitad de la distancia que es lo que se hará en la práctica, salvo en la primera duplicación en que realmente se construye un optotipo con unas medidas de la red exactamente el doble que las estudiadas en el primer caso.



a



b

Figura 42 Optotipo que se presenta al observador para la comparación: arriba (a): red cuadrada en el original con un cuadrado de 1 cm de lado.; abajo (b), el colorímetro en posición para un 25% de ennegrecimiento (izda) y para un 5% de ennegrecimiento (dcha).

4.4 Procedimiento

Sesión experimental. Cada sesión de observación consta de 50 mediciones correspondientes a la presentación de esa cantidad de estímulos, con varios valores de ennegrecimiento comprendidos entre un mínimo de un 3% y un 25%; en total seis estímulos diferentes. Previamente en sesiones de prueba más cortas, se descartó un valor de ennegrecimiento superior al 25% ya que en un 100% de los casos se apreciaba como más oscuro que el cuadrado de la red. Desechando rutinariamente los dos primeros estímulos de cada sesión (de lo que no tienen noticia los observadores) al observador le es presentado exactamente 8 veces el mismo valor de estímulo en cada sesión. Como se ha comentado antes, en cada sesión se ha preparado la secuencia de la presentación de los estímulos completamente al azar. Para ello nos hemos servido de un sistema de papeles escritos con esos seis valores y colocados boca abajo, y que mediante su mezcla, subsiguiente a cada elección de los seis, queda garantizado el que no haya secuencias repetidas ni tendencias en la presentación de las secuencias.

Número de estímulos para cada valor de ennegrecimiento. Dado que en la metodología experimental en psicofísica es recomendable que cada valor de estímulo (en nuestro caso porcentaje de negro) sea presentado un mínimo de 100 veces, para comodidad de los cálculos *sesión / n° de presentaciones*, se decide efectuar para cada iluminación (y para cada uno de los tamaños) 15 sesiones de observación, con lo que cada estímulo diferente (cada valor de ennegrecimiento) es presentado en total 120 veces, que supera aceptablemente el mínimo.

Duración de las sesiones. El tiempo empleado en una sesión de observación (oscila entre los 35 y los 40 minutos. No obstante, el observador habrá sido sometido previamente a un período de adaptación a la iluminación

de prueba de 10 minutos, que deberán sumarse al tiempo de observación, con lo que cada sesión experimental supone aproximadamente una hora de trabajo.

Protocolo de las respuestas del observador. El protocolo de la experiencia consiste en que el observador conteste con un “+”, “un”, “-” o un “0” si ve el disco (que gira con un cierto porcentaje de negro), más, menos o igual de oscuro que la secuencia de puntos rojos situados en la franjas blancas.

Distancia de observación. La distancia para las observaciones del primer optotipo (tamaño T) es de 3 metros medidos desde el ojo del observador al optotipo. Para los sucesivos tamaños, que denominaremos 2 T, 4 T y 8 T, se operó de la forma siguiente: para conseguir que el cuadrado de la red tuviera un tamaño doble, se fabricó un optotipo similar al anterior pero con esa condición, es decir que cada cuadrado tenga 2 cm de lado. Se mantuvo la misma distancia de tres metros. Para obtener los sucesivos tamaños y dadas las dificultades de la fabricación y observación de un optotipo muy grande, se opta por trasladar dicho optotipo cada vez a una distancia mitad de la anterior. Así pues se obtienen los siguientes valores expresando los diversos tamaños en minutos (ángulo visual):

Tamaño 1 (T): Red de Ronchi con cuadrados de 1 cm de lado observada a 3 m de distancia ($12,5^\circ$).

Tamaño 2 (2T): Red de Ronchi con cuadrados de 2 cm de lado observada a 3 m de distancia (25°).

Tamaño 3 (4T): Red de Ronchi con cuadrados de 2 cm de lado observada a 1,5 m de distancia (50°).

Tamaño 4 (8T): Red de Ronchi con cuadrados de 2 cm de lado observada a 0,75 m de distancia (100°).

4.5 Resultados

ECUACIONES DE REGRESIÓN (media de los tres observadores)

TAMAÑO T	LINEAL	P.I.S.	I.I.	U.D.
500 lux:	$Z = -2,974 + 0,231* E$ Coef. correlac.: 0,987492 R-cuadrado: 97,514 %	12,93	5,86	2,93
1000 lux:	$Z = -2,328 + 0,213* E$ Coef. correlac.: 0,998976 R-cuadrado: 99,7954 %	10,98	6,35	3,17
2000 lux:	$Z = -2,752 + 0,225* E$ Coef. correlac.: 0,995474 R-cuadrado: 99,0969 %	12,23	5,99	2,99

TAMAÑO 2 T	LINEAL			
500 lux:	$Z = -2,395 + 0,231* E$ Coef. correlac.: 0,959216 R-cuadrado: 92,0095%	10,41	5,86	2,93
1000 lux:	$Z = -2,202 + 0,218* E$ Coef. correlac.: 0,963174 R-cuadrado: 92,7704%	10,14	6,21	3,10
2000 lux:	$Z = -3,054 + 0,252* E$ Coef. correlac.: 0,962126 R-cuadrado: 92,5686%	12,11	5,34	2,67

TAMAÑO 4 T **LINEAL** **P.I.S.** **I.I.** **U.D.**

500 lux: $Z = -1,781 + 0,200* E$ **8,95** **6,70** **3,35**
 Coef. correlac.: 0,961237
 R-cuadrado: 92,3976%

1000 lux: $Z = -1,610 + 0,190* E$ **8,47** **6,90** **3,45**
 Coef. correlac.: 0,952821
 R-cuadrado: 90,7868%

2000 lux: $Z = -1,447 + 0,187* E$ **7,74** **7,10** **3,55**
 Coef. correlac.: 0,966922
 R-cuadrado: 93,4939%

TAMAÑO 8 T **(DOBLE RECÍPROCA)**

500 lux: $Z = 1/ (0,097 + 3,749/ E)$
 Coef. correlac.: 0,983225
 R-cuadrado: 96,6732%

1000 lux: $Z = 1/ (0,205 + 2,057/ E)$
 Coef. correlac.: 0,983807
 R-cuadrado: 96,7876%

2000 lux: $Z = 1/ (0,277 + 0,910/ E)$
 Coef. correlac.: 0,983908
 R-cuadrado: 96,8075%

OBSERVADOR 1 (A.M.)

TAMAÑO T	LINEAL	P.I.S.	I.I.	U.D.
500 lux:	$Z = -3,135 + 0,235* E$ Coef. corelac.: 0,978735 R-cuadrado: 95,7922%	13,34	5,74	2,87
1000 lux:	$Z = -4,211 + 0,285* E$ Coef. correlac.: 0,996098 R-cuadrado: 99,2211%	14,78	4,73	2,36
2000 lux:	$Z = -3,412 + 0,252* E$ Coef. correlac.: 0,985337 R-cuadrado: 97,089%	13,54	5,35	2,67

TAMAÑO 2 T	LINEAL			
500 lux:	$Z = - 4,246 + 0,319* E$ Coef. correlac.: 0,973475 R-cuadrado: 94,7653%	13,31	4,22	2,11
1000 lux:	$Z = - 4,506 + 0,316* E$ Coef. correlac.: 0,964821 R-cuadrado: 93,088%	14,26	4,26	2,13
2000 lux:	$Z = - 4,809 + 0,319* E$ Coef. correlac.: 0,932583 R-cuadrado: 86,971%	15,08	4,23	2,11

TAMAÑO 4 T **LINEAL** **P.I.S.** **I.I.** **U.D.**

500 lux: $Z = - 4,079 + 0,311 * E$ **13,12** **4,33** **2,16**
 Coef. correlac.: 0,979889
 R-cuadrado: 96,0182%

1000 lux: $Z = - 4,335 + 0,318 * E$ **13,63** **4,24** **2,12**
 Coef. correlac.: 0,974087
 R-cuadrado: 94,8846%

2000 lux: $Z = - 3,939 + 0,311 * E$ **12,67** **4,33** **2,16**
 Coef. correlac.: 0,97465
 R-cuadrado: 94,9943%

TAMAÑO 8 T

500 lux: $Z = 1 / (0,0776218 + 4,01459/E)$ (DOBLE
 RECÍPROCA)
 Coef. correlac.: 0,982203
 R-cuadrado: 96,4722%

1000 lux: $Z = \exp (1,39323 - 4,90045/E)$ (CURVA S)
 Coef. correlac.: - 0,981959
 R-cuadrado: 96,4244%

2000 lux: $Z = 1 / (0,248739 + 1,44096/E)$ (DOBLE
 RECÍPROCA)
 Coef. correlac.: 0,977528
 R-cuadrado: 95,556%

OBSERVADOR 2 (J.G.)

TAMAÑO T	LINEAL	P.I.S.	I.I.	U.D.
500 lux:	$Z = - 4,175 + 0,308* E$ Coef. correlac.: 0,966353 R-cuadrado: 93,3838%	13,56	4,37	2,18
1000 lux:	$Z = - 2,881 + 0,258* E$ Coef. correlac.: 0,979936 R-cuadrado: 96,0275%	11,17	5,02	2,51
2000 lux:	$Z = - 3,306 + 0,249* E$ Coef. correlac.: 0,987147 R-cuadrado: 97,4459%	13,28	5,41	2,70

TAMAÑO 2 T	LINEAL			
500 lux:	$Z = - 4,406 + 0,322* E$ Coef. correlac.: 0,967352 R-cuadrado: 93,5771%	13,68	4,19	2,09
1000 lux:	$Z = - 4,234 + 0,319* E$ Coef. correlac.: 0,971966 R-cuadrado: 94,4717%	13,27	4,23	2,11
2000 lux:	$Z = - 4,467 + 0,311* E$ Coef. correlac.: 0,960422 R-cuadrado: 92,241%	14,36	4,33	2,16

TAMAÑO 4 T **LINEAL** **P.I.S.** **I.I.** **U.D.**

500 lux: $Z = - 4,288 + 0,313 * E$ **13,70** **4,30** **2,15**
 Coef. correlac.: 0,977395
 R-cuadrado: 95,5301%

1000 lux: $Z = - 4,148 + 0,305 * E$ **13,60** **4,42** **2,21**
 Coef. correlac.: 0,970566
 R-cuadrado: 94,1999%

2000 lux: $Z = - 4,063 + 0,308 * E$ **13,19** **4,38** **2,19**
 Coef. correlac.: 0,978837
 R-cuadrado: 95,8122%

TAMAÑO 8 T

500 lux: $Z = - 0,12639 + 1,07285 * \ln E$ (LOGARÍTMICA)
 Coef. correlac.: 0,900361
 R-cuadrado: 81,065%

1000 lux: $Z = \exp (1,36982 - 4,48969/E)$ (CURVA S)
 Coef. correlac.: - 0,982563
 R-cuadrado: 96,5429%

2000 lux: $Z = 3,30247 - 4,80355/E$ (X- RECÍPROCA)
 Coef. correlac.: -0,983439
 R-cuadrado: 96,7153%

OBSERVADOR 3 (C.B.)

TAMAÑO T	LINEAL	P.I.S.	I.I.	U.D.
500 lux:	$Z = - 2,432 + 0,191* E$ Coef. correlac.: 0,992649 R-cuadrado: 98,5352%	12,73	7,02	3,51
1000 lux:	$Z = - 1,161 + 0,182* E$ Coef. correlac.: 0,960565 R-cuadrado: 92,2684%	6,38	7,40	3,70
2000 lux:	$Z = - 2,141 + 0,202* E$ Coef. correlac.: 0,995192 R-cuadrado: 99,0406%	10,60	6,68	3,34

TAMAÑO 2 T **LINEAL**

500 lux:	$Z = - 1,289 + 0,191* E$ Coef. correlac.: 0,948136 R-cuadrado: 89,8962%	6,75	7,06	3,53
1000 lux:	$Z = -2,67104 + 1,23202* \text{sqrt}(E)$ (RAIZ CUADRADA) Coef. correlac.: 0,949023 R-cuadrado: 90,0644%			
2000 lux:	$Z = - 2,022 + 0,227* E$ Coef. correlac.: 0,975126 R-cuadrado: 95,087%	8,91	5,94	2,97

TAMAÑO 4 T

500 lux:	$Z = \exp(1,50295 - 9,76228/E)$ Coef. correlac.: - 0,985739 R-cuadrado: 97,1682%	(CURVA S)
1000 lux:	$Z = 3,47188 - 9,36868/E$ Coef. correlac.: - 0,909682 R-cuadrado: 82,7521%	(X- RECÍPROCA)
2000 lux:	$Z = \exp(1,37686 - 4,63875/E)$ Coef. correlac.: - 0,981637 R-cuadrado: 96,3611%	(CURVA S)

P.I.S.: *punto de igualdad subjetiva*

II.: *Intervalo de incertidumbre*

U.D.: *Umbral diferencial*

Discusión e interpretación de resultados

Las funciones psicométricas obtenidas con los datos observados se han transformado en puntuaciones Z normalizadas (Gescheider, 1976; Blanco, 1996) y basándose en éstas se han calculado las rectas de regresión. A partir de estos parámetros ecuacionales se han calculado los valores correspondientes al *punto de igualdad subjetiva* así como al *intervalo de incertidumbre*. A partir de las ecuaciones de regresión se ha calculado el valor de E , con lo que se ha obtenido el *punto de igualdad subjetiva* (*valor del efecto Bezold*) para Z asociada a una probabilidad del 50%. Del mismo modo, los valores de Z asociada a una probabilidad del 25% y Z asociada a una probabilidad del 75% nos dan los límites del *intervalo de incertidumbre*. En este caso nos referiremos al *umbral diferencial* como a la mitad del *intervalo de incertidumbre*. De esta forma, añadiendo el valor del *umbral diferencial* al *punto de igualdad subjetiva*, se obtendrá el valor a partir del cual el sujeto emitirá juicios de discriminación “mayor que”.

a) Promedio de los tres sujetos

Tamaño 1 (T). Si consideramos las medias de los umbrales para los 3 observadores para el tamaño T (12,5'), se aprecia que el *punto de igualdad subjetiva*, en las tres condiciones de iluminación, se corresponde con un porcentaje de ennegrecimiento próximo al 12 %. En el paso del tipo de respuesta “menor que” a “mayor que” los sujetos muestran incertidumbre en sus juicios perceptivos en un intervalo comprendido entre un 8 %-15 % de ennegrecimiento. Efectivamente, para valores de ennegrecimiento bajos, próximos a 3 % y 5 % o muy altos, próximos a 20 %, 25 % la variabilidad es relativamente pequeña, mientras que la mayor variabilidad se da para valores de ennegrecimiento entre 10 % y 15 %.

TAMAÑO 2 (T). Para el tamaño 2 T (25') el *punto de igualdad subjetiva* se sitúa ligeramente más bajo, en torno a un porcentaje de ennegrecimiento del 11%. El *intervalo de incertidumbre* para este tamaño es algo mayor, situándose entre un 7 % y un 15 %.

TAMAÑO 3 (4T). Cuando aumentamos el tamaño a 4 T (50') se observa una apreciable disminución en el valor del *punto de igualdad subjetiva*, que se sitúa en torno al 9%. De acuerdo con la disminución del punto de igualdad subjetiva, el *intervalo de incertidumbre* disminuye en los dos valores límites, estando estos situados entre el 4 % y el 12 % de ennegrecimiento.

TAMAÑO 4 (8T). En el tamaño 8T (100') incluso para los valores más bajos (3% y 5%) la práctica totalidad de los juicios son del tipo "mayor que" haciéndose asintótica la representación gráfica a partir de un 5 % de ennegrecimiento. De aquí que no pueda hablarse de *intervalo de incertidumbre* para este tamaño.

b) Sujetos independientes

SUJETO 1 (A.M.). Para los tres tamaños en los que el efecto Bezold se pone de manifiesto, este observador se muestra muy consistente en sus juicios de discriminación en las tres condiciones experimentales de iluminación, ya que el umbral se sitúa en una zona muy similar.

El *punto de igualdad subjetiva* no muestra apenas modificación cuando incrementamos el tamaño para los valores T, 2T y 4T, en los que se sitúa en torno al 3%. Sin embargo para el tamaño 8T se observa una rápida desaparición del efecto Bezold, ya que para los valores mínimos de ennegrecimiento, (3% y 5%) el sujeto responde prácticamente "mayor

que” en todos los casos. Asimismo, el *intervalo de incertidumbre* para los tamaños T, 2T y 4T se mantiene entre el 10 y el 17%.

SUJETO 2 (J.G.).

Este observador es también muy consistente en sus juicios ya que como nos muestra el *punto de igualdad subjetiva* todos sus umbrales están agrupados en torno al 13% de ennegrecimiento.

Su *intervalo de incertidumbre* para los tamaños T, 2T y 4T se sitúa entre el 11 y el 16% de ennegrecimiento, siendo mínimo en los valores límites (3% - 5% así como para 20% - 25%).

SUJETO 3 (C. B.).

Este sujeto se sale de las pautas de observación obtenidas para los sujetos 1 y 2. Es quizás el sujeto que más acusa la influencia del tamaño del test en la percepción del efecto Bezold, ya que comienza a desaparecer ostensiblemente para el tamaño 4T y desaparece por completo para el tamaño 8T.

Su *punto de igualdad subjetiva* que para el tamaño T se sitúa en torno a un 11 % excepto para la iluminación 2 (1000 luxes), disminuye a un valor en torno al 8% para el tamaño 2T. Para el tamaño 4T cuya pauta de respuesta ya no es lineal estaría situado entre los valores límites inferiores (3-5%) con lo que muestra claramente la desaparición de la percepción del efecto Bezold (ver apéndice).

Esto se confirma con el hecho de que prácticamente las respuestas “mayor y menor que” se dan aproximadamente en la misma proporción (ver apéndice).

REPRESENTACIONES GRÁFICAS CON VALORES DE PUNTUACIONES Z AJUSTADOS PARA EL PROMEDIO DE LOS TRES OBSERVADORES

TAMAÑO T

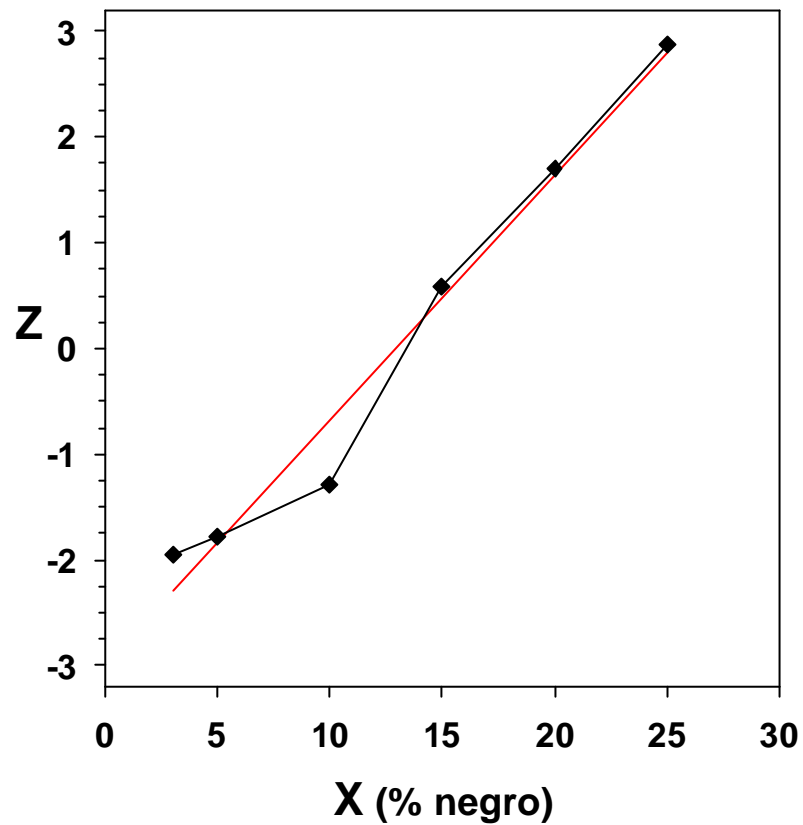


Figura 4.4. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del total de observadores para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

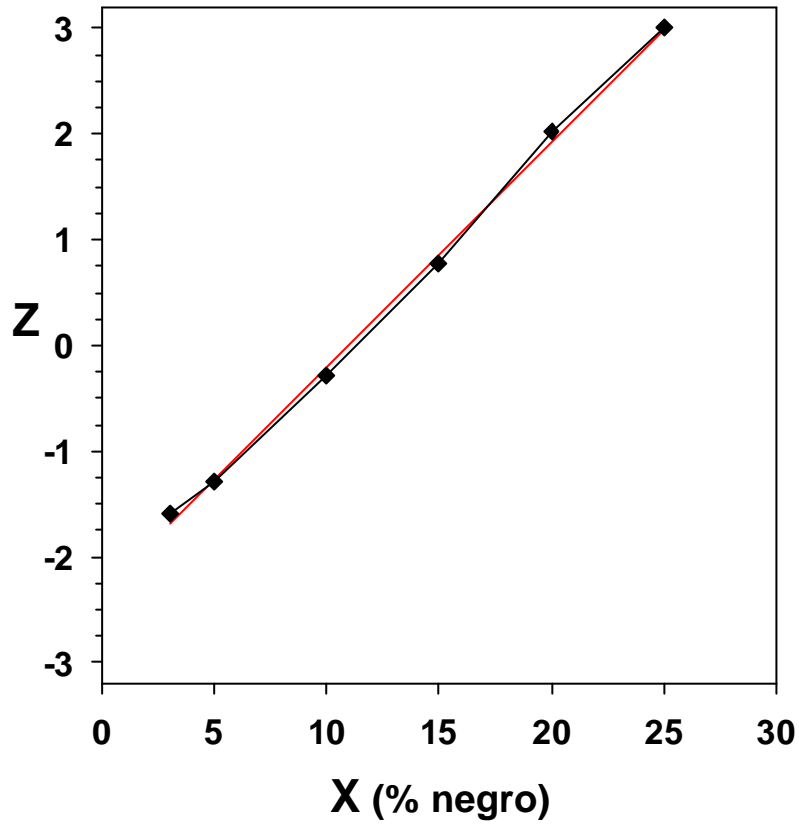


Figura 4.5. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del total de observadores para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3m de distancia (12,5’), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión

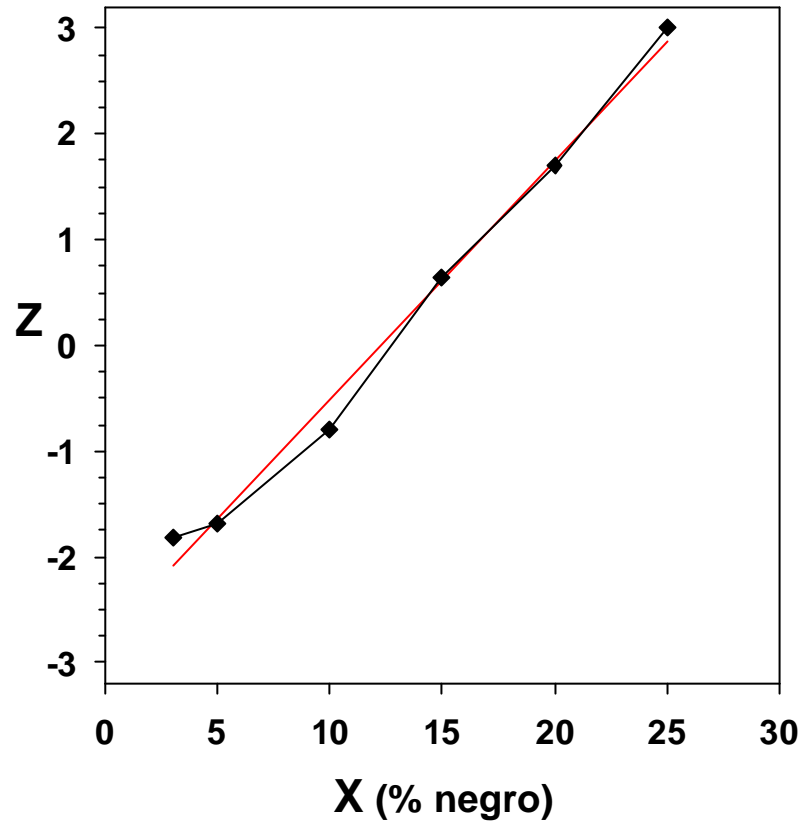


Figura 4.6. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del total de observadores para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

TAMAÑO 2 T

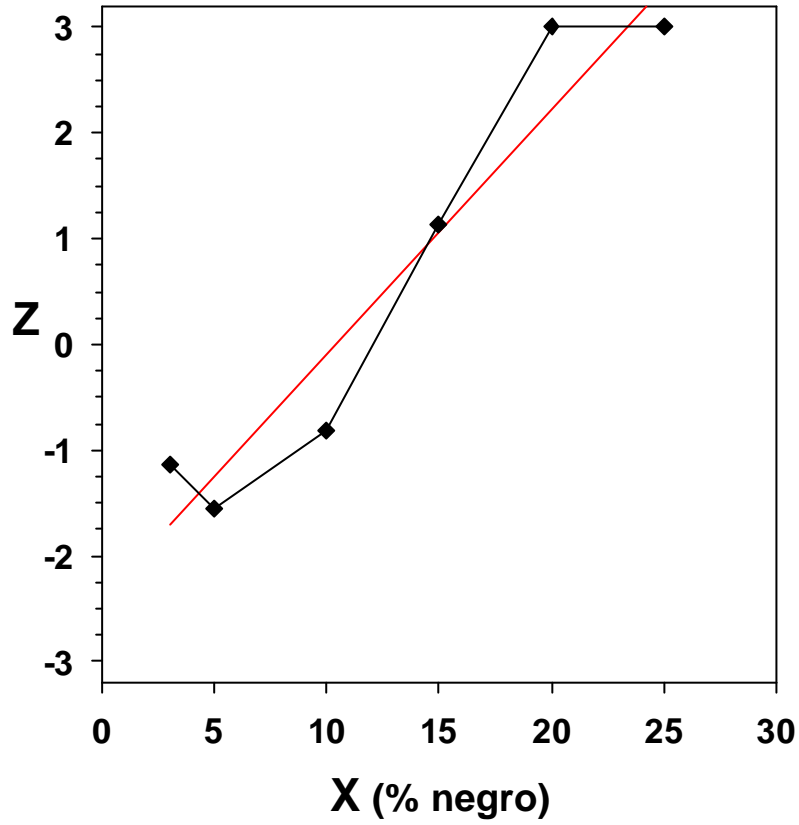


Figura 4.7. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del total de observadores para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

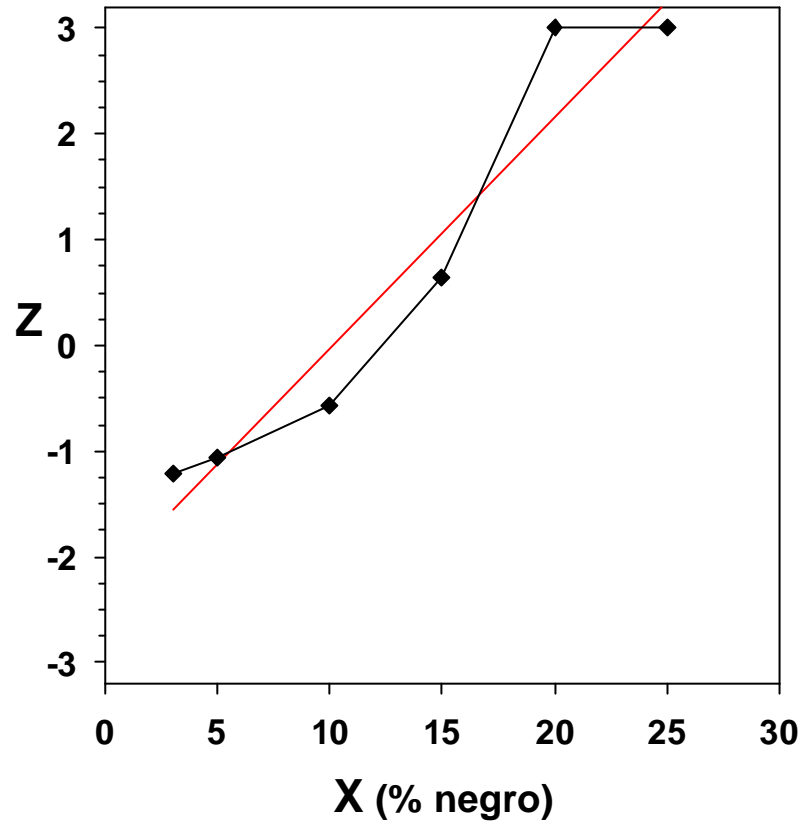


Figura 4.8. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del total de observadores para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3m de distancia (25°), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

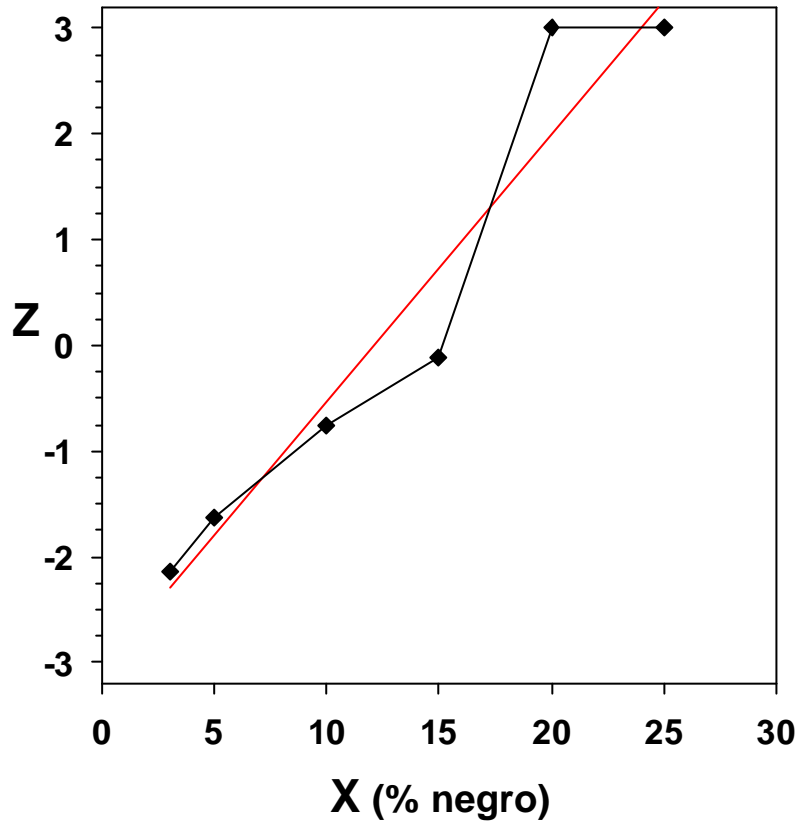


Figura 4.9. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del total de observadores para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

TAMAÑO 4 T

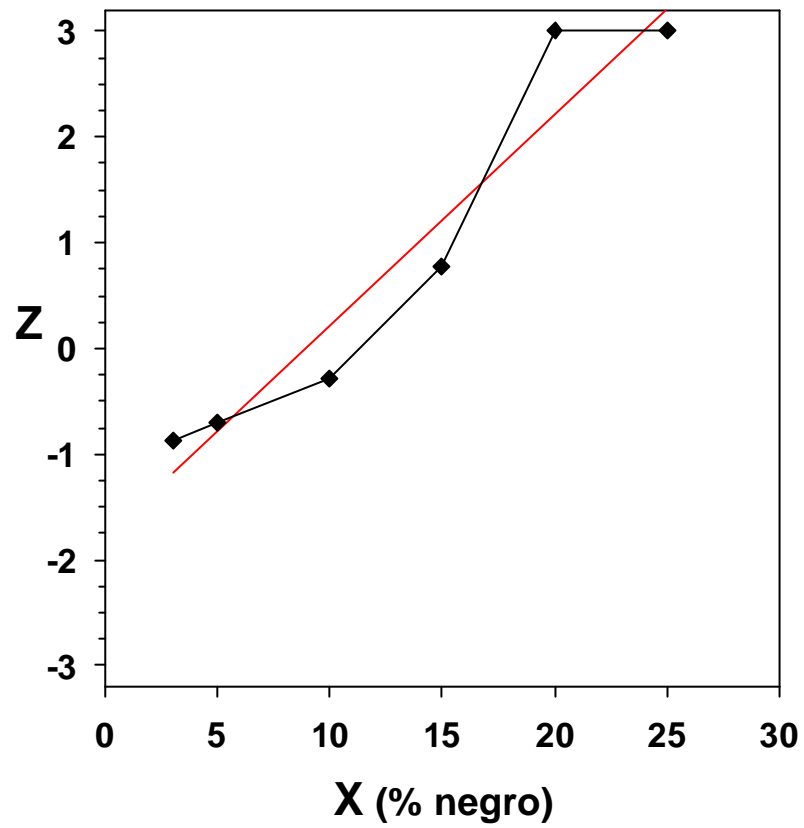


Figura 4.10. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios "mayor que" en puntuaciones Z del total de observadores para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia ($50'$), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

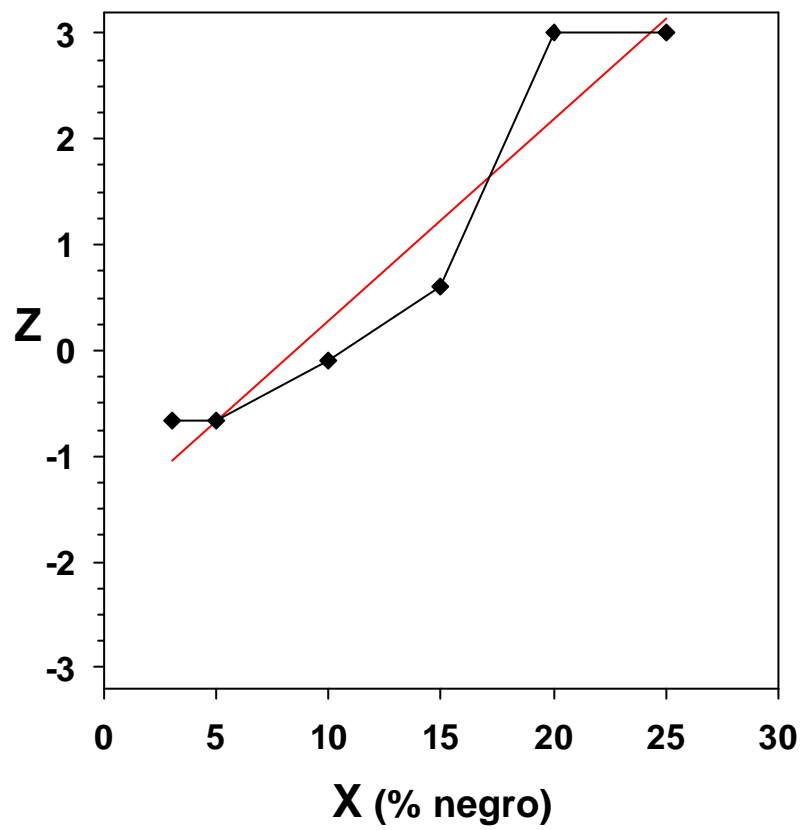


Figura 4.11. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del total de observadores para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

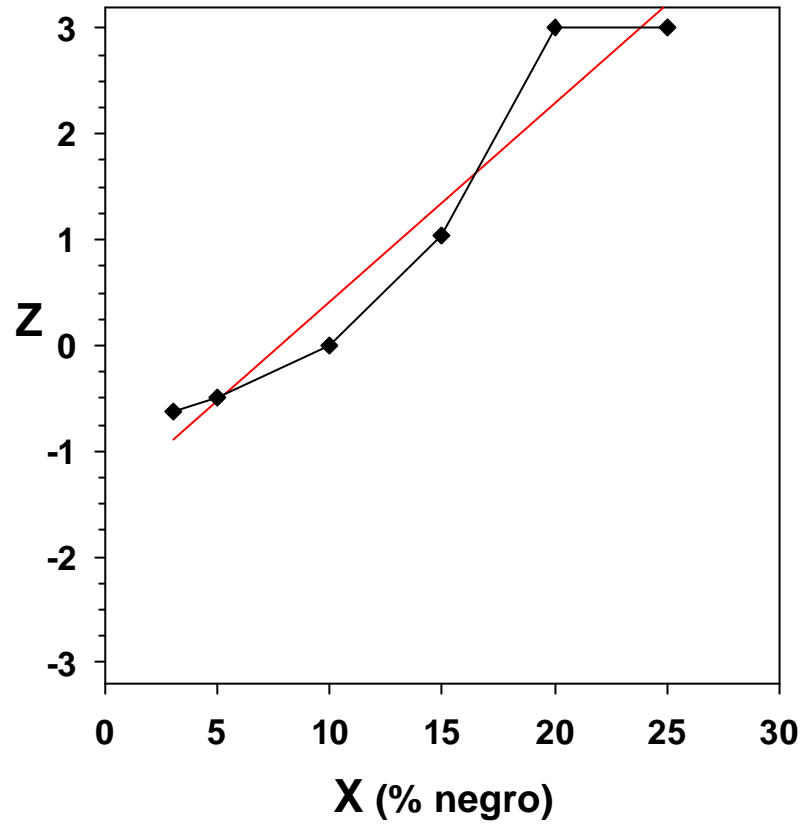


Figura 4.12. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del total de observadores para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia ($50'$), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

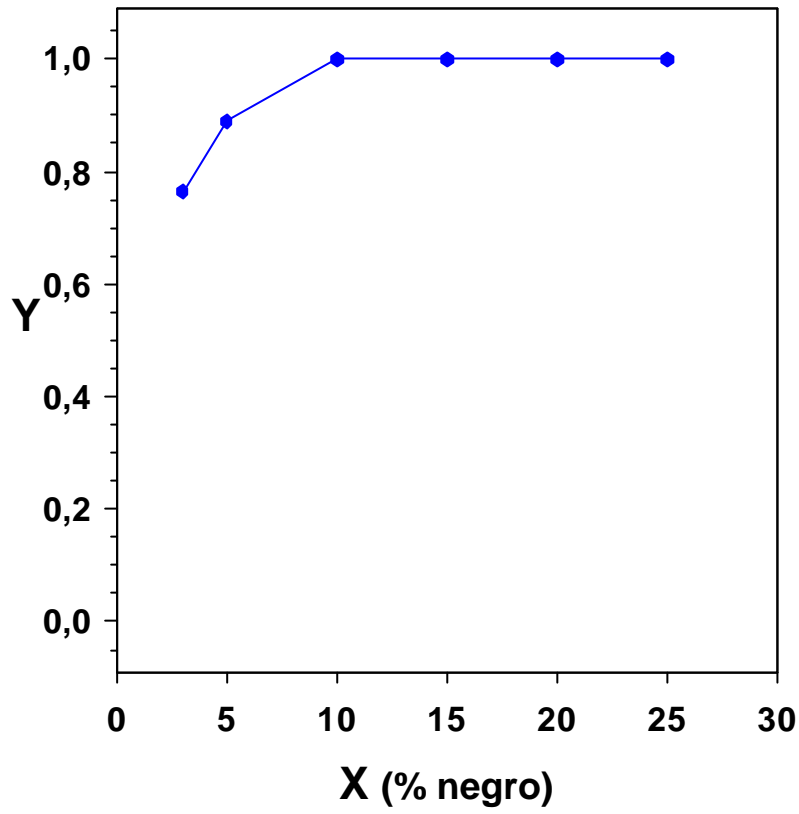


Figura 4.13. Valores de los juicios “mayor que”, expresados en probabilidades, del total de observadores para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 0,75 m de distancia (100°), en función del porcentaje de oscurecimiento.

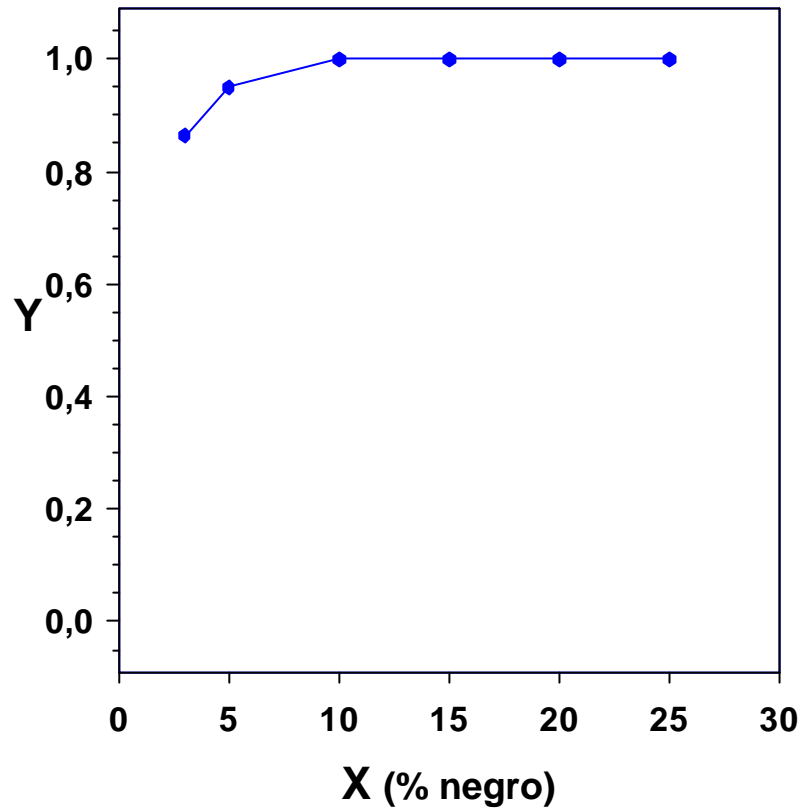


Figura 4.14. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del total de observadores para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 0,75 m de distancia (100°), en función del porcentaje de oscurecimiento.

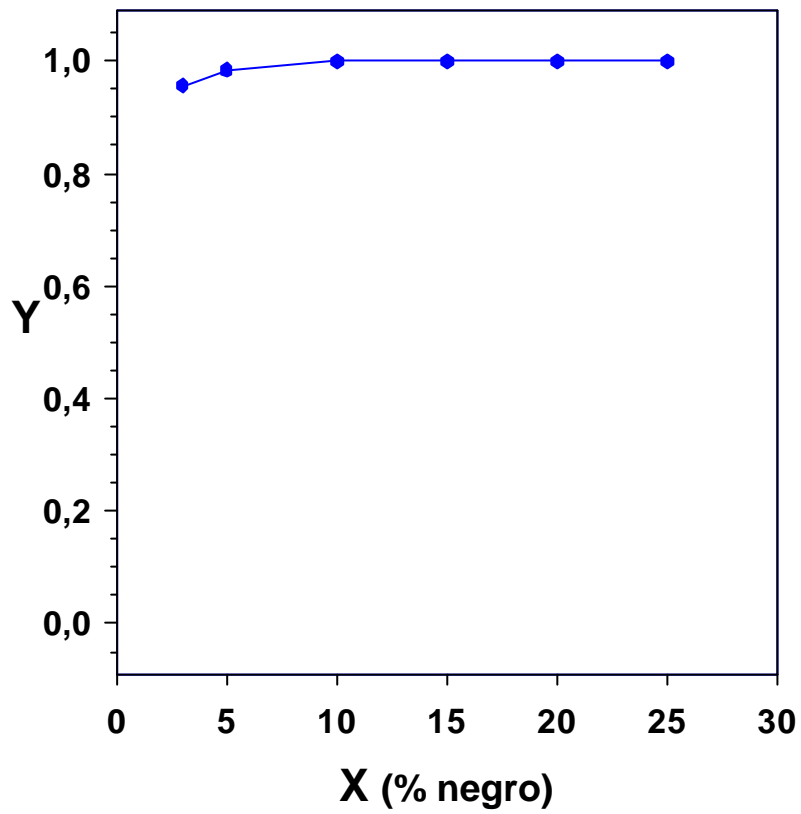


Figura 4.15. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del total de observadores para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 0,75 m de distancia (100°), en función del porcentaje de oscurecimiento.

4.6 Análisis de la varianza

Después de determinar el *punto de igualdad subjetiva* (valor del efecto Bezold) y los valores psicofísicos habituales, se ha hecho un análisis de varianza confirmatorio para explicar las variaciones observadas en aquellos valores y determinar, si hubiere lugar, la influencia de las variables que los provocan.

Se ha efectuado un análisis con tres variables intrasujeto, *iluminación*, *ennegrecimiento* y *tamaño* (3 x 6 x 4). Tal como se ha visto en los resultados psicofísicos el ennegrecimiento ($F_{5,19} = 28.912$; $p < 0.000$) tiene un efecto significativo sobre el punto de igualdad subjetiva al igual que el tamaño ($F_{3,6} = 21,503$ y $p = 0,0013$).

Asimismo se observan efectos significativos en las interacciones *iluminación* x *tamaño* ($F_{6,12} = 4,749$ y $p = 0,01$), *iluminación* x *ennegrecimiento* ($F_{10,20} = 3,089$ y $p = 0,01$) y *tamaño* x *ennegrecimiento* ($F_{15,30} = 5,989$ y $p < 0,000$), probablemente debidas al comportamiento diferencial de los sujetos.

La figura 4.16 muestra que la *iluminación* 3 (2000 luxes) para el *tamaño* 2 (25') tiene una proporción de respuestas "mayor que" mucho menor que para las *iluminaciones* 1 y 2 (500 y 1000 luxes respectivamente). Sin embargo para el *tamaño* 3 (50') y con esa misma *iluminación*, se incrementan significativamente las respuestas "mayor que".

Es posible que la anomalía hallada en el *tamaño* 2 (25') se deba a perturbación de la visibilidad con una *iluminación* fuerte para cuadrados pequeños, ya que no sucede para los *tamaños* 3 ni 4.

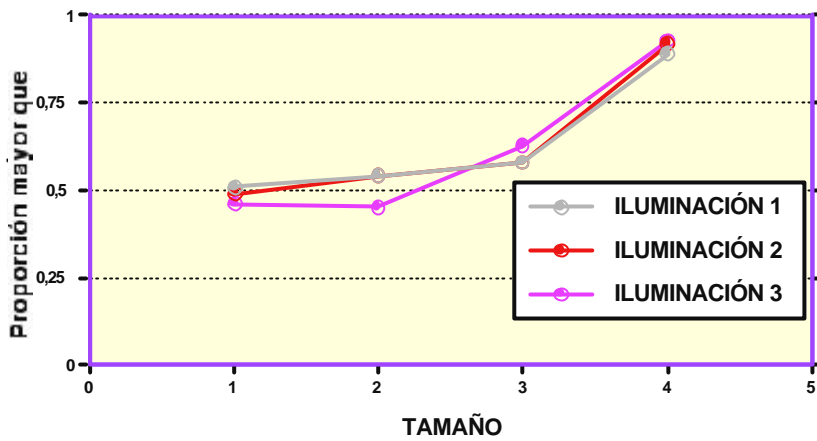


Figura 4.16. Proporción de respuestas “mayor que” en función del aumento de tamaño y la iluminación.

En la figura 4.17 que muestra la relación entre ennegrecimiento e iluminación se aprecia como la iluminación 1 (500 luxes) para valores inferiores al punto de igualdad subjetiva, va por debajo de las otras dos, mientras que las sobrepasa cuando supera éste.

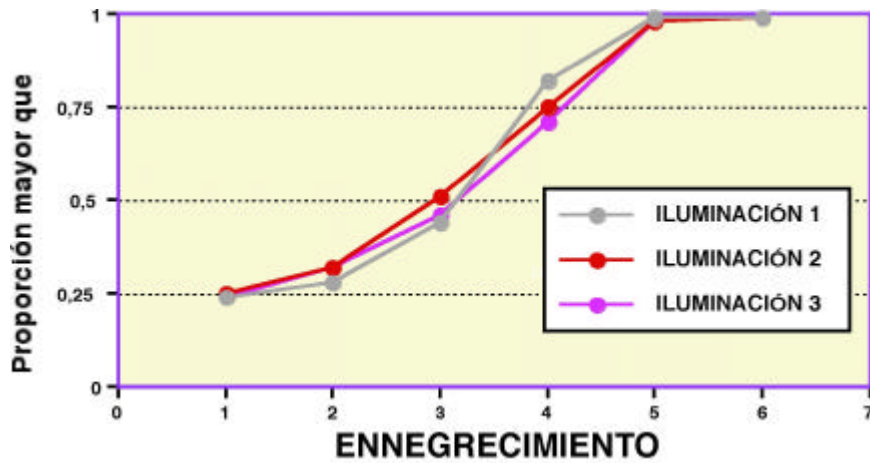


Figura 4.17. Proporción de respuestas “mayor que” en función del ennegrecimiento y la iluminación.

La conclusión es que para iluminaciones próximas al umbral de visibilidad, el efecto de ennegrecimiento no es tan marcado como con iluminaciones superiores con las que se aprecia mejor el contraste en los optotipos

En la figura 4.18 que muestra la relación entre tamaño y ennegrecimiento, se observa que en el tamaño 4 (100 μ) los valores de contraste (ennegrecimiento) pequeños, se distancian significativamente de los otros tres tamaños, mientras que para valores grandes se aproxima.

Puede pues concluirse que el tamaño potencia el efecto para valores altos de ennegrecimiento. Se aprecia una interacción entre tamaño y contraste excepto para el tamaño 4 en que va siempre por encima de los otros.

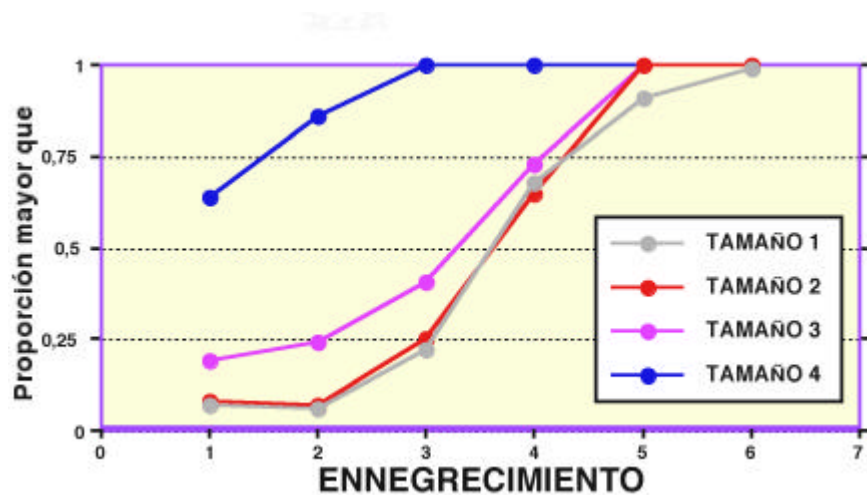


Figura 4.18. Proporción de respuestas "mayor que" en función del ennegrecimiento y el tamaño.

CAPÍTULO 5

Conclusiones

En este trabajo de investigación el campo de adaptación para las observaciones ha consistido en redes de Ronchi acromáticas con orientación horizontal, y el test, en secuencias lineales en las que las zonas luminosas son cuadrados de color rojo cuyas magnitudes físicas son: λ dominante: 620 nm; pureza: 0,56; y factor de luminancia β : 0,20, con iluminaciones de 500, 1000 y 2000 luxes, (valores muy utilizados socialmente).

Los valores numéricos obtenidos son el resultado de más de 30.000 mediciones distribuidas en unas 600 sesiones de trabajo cuya duración oscilaba entre 45-50 minutos. A partir de las ecuaciones de regresión se ha calculado el valor de E (valor del estímulo), con lo que se ha obtenido el efecto Bezold para Z asociada a una probabilidad del 50%. Del mismo modo, los valores de Z (puntuación tipificada referida a la curva normal) asociada a una probabilidad del 25% y Z asociada a una probabilidad del 75%, nos dan los límites del *intervalo de incertidumbre*.

El trabajo experimental se ha llevado a cabo con tres observadores entrenados (de 23, 22 y 42 años) con visión cromática normal, los dos primeros emétopes y el tercero présbita. Los datos de dos de los observadores presentan una gran concordancia en todas las situaciones estudiadas, no así el tercer observador (42 años) quien con una frecuencia de la red de 0,02 1/min (tamaño del cuadrado 50') presenta valores del efecto Bezold ligeramente más bajos (del orden de un 5%) respecto a los otros dos.

A partir de los resultados obtenidos se concluye que:

- a) El efecto Bezold prácticamente no varía (el intervalo de variación está entre un 2-4%) al aumentar la iluminación de 500 a 2000 luxes.
- b) El *intervalo de incertidumbre* aumenta ligeramente al disminuir de la frecuencia de la red, (aumento del tamaño de los cuadrados de la secuencia) aunque prácticamente se mantiene constante, excepto para el ángulo de 100' (tamaño 8T) en el que la práctica totalidad de los juicios pasa a ser de "mayor que" incluso para los valores mínimos de ennegrecimiento (3% y 5%).
- c) El efecto Bezold es independiente del valor de la frecuencia de la red para valores superiores a 0,01 1/min. (tamaño de los cuadrados del test inferiores a 50').
- d) Sin embargo, a partir de este valor disminuye en relación a la frecuencia de la red hasta alcanzar una frecuencia crítica de 0,005 1/min (tamaño del cuadrado 100') en la que el efecto Bezold se anula.

La independencia del efecto Bezold respecto a las iluminaciones utilizadas (en

nuestras condiciones experimentales equivalentes a 100,200 y 400 cd/m², valores todos ellos correspondientes al nivel fotópico de visión) nos induce a creer que dicho efecto, en lo que a Fisiología se refiere, está íntimamente relacionado con las unidades sensoriales fotorreceptoras, responsables del poder separador del ojo (agudeza visual), por ser esta variable la única independiente de la luminancia a niveles fotópicos.

En cuanto a la disminución del efecto Bezold en relación a la disminución de la frecuencia de la red, puede justificarse plenamente recurriendo a las estructuras gestálticas, en las que por el principio de proximidad (Wertheimer, 1923), la formación de estas estructuras disminuye al aumentar la separación de los componentes de la misma, lo que sucede cuando aumenta la frecuencia de los cuadros secuenciales de la estructura gestáltica merced a la cual percibimos un cuadrado. La desaparición de la estructura gestáltica lleva consigo la anulación del efecto Bezold.

Bibliografía

AGUILAR, M., STILES, W.S. (1954). "Saturation of the rod mechanism of the retina at light levels of stimulation". *Optica Acta* **1**:59-65.

AGUILAR, M., BLANCA, U. (1995) *Iluminación y color*. Valencia: Servei de Publicacions UPV, .

AGUILAR, M., MATEOS, F. (1996) *Óptica Fisiológica (3 vol)*. Valencia: Servei de Publicacions UPV.

AGUILAR, M., LOPEZ, R., URTUBIA, C. (1999). "Visión de un test periódico con una red de Ronchi como fondo" Terrassa, Libro de Actas del V Congreso Nacional de Color, pp: 95-96. SEDO-Departament d'Optica i Optometria (UPC).

AGUILAR, M. URTUBIA C. (2001). "Direct and inverse Contrast interaction in a Periodic Test viewing". Libro de Actas del: 9th Congress of the International Colour Association. Rochester, N. York. Pp: 37-38.

ALBERS, J. (1998) *La interacción del color*. (12ª edición). Madrid: Alianza.

ARTIGAS, J.M., CAPILLA, P., PELIPE, A., PUJOL, J. (1995) *Optica*

Fisiológica. Psicofísica de la visión. Madrid: Interamericana-McGraw-Hill.

BARRALT, X.. (1987) “La Antigüedad Clásica” en *Historia Universal del Arte* Tomo II. Barcelona: Planeta.

BARTELS, A., ZEKI, S. (2000). “The architecture of the colour centre in the human visual brain: new results and a review”. *Eur. J. Neurosci.*, **12**:172-193.

BAYLOR, D., NUNN, B.J., SCHNAPF, J.L. (1987). “Spectral sensitivity of cones of the monkey *Macaca fascicularis*” *J.Physiol.*, **390**: 145-160.

BEAR, M.F., CONNORS, B.W., PARADISO, M.A. (1998). *Neurociencia. Explorando el cerebro.* Barcelona: Masson.

BERKELEY G. (1709) *Essay towards a new theory of vision.* Traducción, Fuentes Benot M. (1980): *Ensayo de una nueva teoría de la visión* Madrid: Aguilar.

BEZOLD, W., Von. (1876). *The theory of color* (edición estadounidense). Boston: Prag and Company op. cit. in CRONLY DILLON 1991 *Vision and visual disfunction* tomo VI *Perception of Color.* London: Houndmills Mc Millan Press.

BLAKEMORE, C., CAMPBELL, F.W. (1968). “Adaptation to spatial stimuli”. *Journal of Physiology.* **200**: 11-13.

BLAKEMORE, C., CAMPBELL, F.W. (1969). “On the existence of neurons in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images”. *Journal of Physiology*, **203**: 237-260.

BLANCO, M. (1996) *Psicofísica.* Madrid: Universitas.

BOWMAKER, J.K., DARTNALL, H.J.A. (1980). "Visual pigments of rods and cones in a human retina". *J. Physiol.*, **298**: 501-511.

BRESSAN, P. (1993). "Revisitation of the luminance conditions for the occurrence of the achromatic neon color spreading illusion". *Perception & Psychophysics*, **54**: 55-64.

BRESSAN, P. (1995). "A Closer Look at the Dependence of Neon Colour Spreading on Wavelength and Luminance". *Vision Res.*, **35**:375-379.

BRESSAN, P., MINGOLLA, E., SPILLMANN, L., WATANABE, T. (1997). "Neon color spreading: a review". *Perception*, **26**: 1353-1366.

BRUCE, V., GREEN, P. (1994). *Percepción visual*. Barcelona: Paidós Ibérica S.A.

CAMPBELL, F.W., ROBSON, J.G. (1968). "Application of Fourier analysis to the visibility of gratings". *Journal of Physiology*, **197**: 551-566.

CARLSON, N. R. (2000). *Fisiología de la conducta*. Madrid: Ariel, Psicología.

CHEVREUL, M.E. (1839). *De la loi du contraste simultané des couleurs*. Paris: Pitois-Levreault. Traducción al inglés (1839) y reedición (1987) *The principles of harmony and contrast of colors and their applications to the arts*. Pennsylvania: Faber Birren.

C.I.E. (1931). "International Commission of Illumination. Proc. of the 8th Session, Cambridge, England". París: Bureau Central C.I.E.

C.I.E. Publication 145 (2001) "Technical Report: Improvement to industrial

colour-difference evaluation. CIE Central Bureau, Vienna.

CRONLY-DILLON (1991) *Vision and Visual Disfunction. Tomo VI. Perception of Color*. London: Houndmills-Mc Millan Press.

DACEY, D.M (1999). "Primate Retina: Cell Types, Circuits and Color Opponency". *Progress in Retinal and Eye Research*, **18**: 737-763.

DACEY, D. (2000). "Parallel pathways for spectral coding in the primate retina". *Annu.Rev.Neurosc.* **23**: 743-775

DARTNALL, H.J., BOWMAKER, J.K., MOLLON,J.D. (1983). "Human visual pigments: microspectrophotometric results from the eyes of seven persons", *Proc.Roy.Soc.Lond. B. Biol Sci.* **220**:115-130.

DE MONASTERIO, F.M. SCHEIN, S.J. Mc. CRANE, E.P.(1981). "Staining of blue-sensitive cones of the macaque retina by a fluorescent dye" *Science*, **213**: 1278-1281.

DE MONASTERIO, F.M., Mc. CRANE, E.P., NEWLANDER, J.K., SCHEIN, S.J.(1985). "Density profile of blue-sensitive cones along the horizontal meridian of macaque retina". *Invest. Ophthalmol.Vis.Sci.* **26**: 289-302.

DE VALOIS R.L. Y DE VALOIS K.K. (1988). *Spatial Vision*. Nueva York: Oxford University Press.

EIZNER FAVREAU, O., CORBALLIS, M. (1977). "Postefectos negativos en la percepción visual". *Inv. y C. febrero*, pp: 18-25.

ESTEVEZ USCANGA, O. (1995). "La visión del color: ¿Diversidad en la uniformidad? o ¿Uniformidad en la diversidad?". *Ver y Oír*, nº 100 , 11-17.

FESTINGER, L., COREN, S., RIVERS, G. (1970) "The effect of attention on brightness contrast and assimilation". *Am. Journ. Psychol.***83**: 189-207.

GARRIGA, P., URTUBIA, C. (1999). "Biología molecular de la visión del color humana normal y de sus alteraciones. Libro de Actas del V Congreso Nacional de Color. Terrassa: Departament d' Optica i Optometria. Universitat Politècnica de Catalunya.

GARRIGA, P., URTUBIA, C. (2002). "Sintonización espectral en los pigmentos visuales de la visión en color" Libro de Actas del VI Congreso Nacional de Color, pp: 73-74. Sevilla: Area de Nutrición y Bromatología, Universidad de Sevilla.

GESCHEIDER, G.A. (1966) *Psychophysics*. New Jersey (Hillsdale): L.E.A.

GEGENFURTNER, K.R. (2000) "Sensory and cognitive contributions of color to the recognition of natural scenes" *Curr. Biol.***10**: 805-808.

GOETHE, J.W. Von. (1810) *Entwurf einer Farben Lehre*. Berlin. Reedición en español: *Esbozo de una teoría de los colores*. (Grandes clásicos) Tomo I: pp: 473-734. México: Ediciones Aguilar.

GOLDSTEIN, E.B. (1988). *Sensación y percepción*. Madrid: Debate.

GOURAS, P. (1985). "Color coding in the primate retinogeniculate system". En *Central and Peripheral Mechanisms of Colour Vision*. pp: 182-197. London.: Ottoson, D. and Zeki eds.

GOVE, A., GROSSBERG, S., MINGOLLA, E. (1995) “. Brightness perception, illusory contours, and corticogeniculate feed-back” *Vis. Neurosc.* **12**: 1027-1052.

HARTLINE, H.K., WAGNER, H.G., RATLIFF, F. (1956). “Inhibition in the eye of Limulus”. *Journal of General Physiology*, **39**: 651-673.

HELSON, H. (1963) “Studies of Anomalous Contrast and Assimilation”. *Journ.Opt.Soc.Am.* **53 (1)**: 179-184).

HITA, E. (1985). “La visión defectiva del color”. *Ver y Oír*, nº 16: 23-30.

HUBEL, D., WIESEL, T. (1979). “Mecanismos cerebrales de la visión” en *El cerebro (1984)*. Libros de *Investigación y Ciencia*..pp: 114-128. Barcelona: Labor.

HUBEL, D.H., LIVINGSTONE, M.S. (1983). “Blobs and color vision”. *Can. J. Physiol. Pharmacol*, **61**: 1433-1441.

HURLBERT, A. (1999). “Color vision: Is colour constancy real?”. *Current Biology*, **9**:558-561.

HURVICH, L.M., JAMESON, D. (1957). “An opponent process theory of color vision”. *Psychol. Rev.*, **64**: 384-404.

HURVICH, L.M., JAMESON, D. (1958). “Further development of a quantified opponent colours theory” En *Visuals problems of Colour*. Cap. 22. London: Her Majesty's Stationery Office.

HURVICH, L.M., JAMESON, D. (1969). “Human color perception”. *American Scientist*, **57**: 143-166.

HURVICH, L. *Color Vision*. (1981) Massachusetts: Sinaner Associater Inc. Publisher Sunderland.

IRTEL, H. (2002). "Hans Irtel Color Vision" [http:// www.uni-manheim.de/fakul/psycho/irtel](http://www.uni-manheim.de/fakul/psycho/irtel).

JACOBS, G.H. (1993). "The distribution and nature of colour vision among the mammals". *Biol. Rev.*, **68**: 413-471.

KANDEL E.R. SCHWARTZ, J.H., JESSELL, T.M. (2001) *Principios de Neurociencia*. (4ª edición) Madrid: McGraw Hill / Interamericana.

KANIZSA, G. (1986) *Gramática de la visión: percepción y pensamiento*. Barcelona: Paidós.

KINGDOM, F., MOULDEN, B. (1991) "White's effect and assimilation". *Vision.Res.* **31 (1)**: 151-159.

KOLB,H., FERNÁNDEZ, E., NELSON, R.. (2002) "Web Vision, Retina" <http://webvision.med.utah.edu/>.

LAND, E.H. (1959). "Colour vision and the natural image. Parts I and II". *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **45**: 115-129, 636-644.

LAND, E.H. (1964). "The Retinex". *Am. Scient.*, **52**: 247-264.

LAND, E.H. (1986). "Recent advances in retinex theory". *Vision Res.*, **26**: 7-21.

LINASUO, M., KOJO, I., HAKKINEN, J. ROVAMO, J. (2000) "Neon colour

spreading in three-dimensional illusory objects". *Neurosc. Lett.* **281 (2-3)**: 119-122.

LIVINGSTONE, M. "Arte, ilusión y sistema visual. *Inv y C.* n° 138, marzo, 1988.

LIVINGSTONE, M., HUBEL, D. (1988). "Segregation of Form, Color, Movement, and Depth: Anatomy, Physiology, and Perception." *Science*, **240**: 740-749.

LUECK, C.J., ZEKI, S., FRISTON, K.J., DEIBER, M.P., COPE, P., CUNNINGHAM, V.J., LAMMERTSMA, A.A., KENNARD, C., FRACKOWIAK, R.S.J. (1989). "The colour centre in the cerebral cortex of man." *Nature*, **340**: 386-389.

MARIE, D. (1995) *Égypte éternelle*. Lausanne: Edita.

MARTIN, P.R. (1998). "Colour processing in the primate retina: recent progress". *Jour. Physiol.* **513 (3)**: 631-638.

MARTÍNEZ-CELDRÁN, E. (1994). *Fonética* (4ª edic). Barcelona: Teide

MC KEEFRY, DJ., ZEKI, S. (1997). "The position and topography of the human colour centre as revealed by functional magnetic resonance imaging". *Brain*, **120**: 2229-2242.

MICHAEL, C.R. (1987). "Comparative study of the color cells in layer IVc beta and in the blobs of the monkey's striate cortex". *Soc. Neurosci. Abstr.*, **13**: 2.

MOLLON, J.D., BOWMAKER, J.K. (1992). "The spatial arrangement of cones in the primate fovea". *Nature*, **360**: 677-679.

- MONTSERRAT, J. (1998). *La percepción visual*. Madrid: Biblioteca Nueva.
- MOUTOUSSIS K., ZEKI S. (2000). "A psychophysical dissection of the brain sites involved in color-generating comparisons". *Proc.Nat.Acad.Sci USA*, **97(14)**: 8069-74).
- MOUTOUSSIS K., ZEKI S. (2002). "Responses of spectrally selective cells in macaque area V2 to wavelenghts and colors". *J.Neurophysiol.* **87 (4)**:2104-12.
- NATHANS, J.(1989) "Genes para ver los colores" *Invest. y C.* Abril, pp: 20-28.
- NEWTON, I. (1730). *Opticks*. 4ª Ed. Dover publications. London. Reedición *Optica* (1977) Madrid: Ediciones Alfabuara.
- PALMER, S.E. (1975) *Visual Perception and work knowledge* in *Explorations in cognition*. San Francisco: Freeman. D.A. Norman and D.E. Rumelhart eds.
- PALMER, S.E. (1992) "Modern Theories of Gestalt Perception" in *Understanding Vision: an interdisciplinary perspective*. Cap. 3 pp: 39-70. Glyn W.Humphreys ed. Massachusetts: Blackwells Publishers.
- PALMER, S.E. (1999) *Vision Science: Photon to Phenomenology*. Massachusetts: MIT Press.
- PIERON, H. (1966). *La sensation. ¿Qué sais je?*. Presse. Univ. de France. París.
- PINEL, J.P.J. (2001). (4ªedic.). *Biopsicología*. Madrid: Pearson Educación.
- POKORNY, J., SMITH, V.C., WESNER, M.F. (1991). *From Pigments to Perception*. New York: Valberg and Lee, Plenum Press.

POLIAK, S. (1968) *The Vertebrate Visual System*. (2ª ed). Chicago: The University of Chicago Press.

RATLIFF, F. HARTLINE, H.K., WAGNER, H.G., (1959). "The responses of Limulus optic nerve fibers to patterns of illumination on the retinal mosaic". *Journal of General Physiology*, **42**: 1241-1255.

ROCK, I. (1985). *La Percepción*. Biblioteca de Scientific American. Barcelona: Prensa Científica S.A.

ROCK, I., PALMER, S. (1991). "El legado de la psicología de la forma". *Inv y C*. Nº 173: pp: 50-57.

RUSHTON, W.A.H. (1972) "Visual Pigments in Man" in *Handbook of Sensory Physiology VII/1: Photochemistry of Vision*. Nueva York: Springer-Verlag.

SANZ, J.C. *El libro del color*. (1993) Madrid: Alianza Editorial.

SARAUX, H., BIAIS, B. (1973) *Physiologie oculaire*. Paris: Masson.

SINGH, M. (1993). *Las culturas del Sol*. Barcelona: Pza d Janés/ Círculo de Lectores/ Ediciones UNESCO.

SPILLMANN, L., WERNER, J.S. (1990). *Visual Perception. The Neurophysiological Foundations*. New York-London: Academic Press.

SPILLMANN, L. (1997). "Guest editorial: Colour in a larger perspective: the rebirth of Gestalt psychology". *Perception*, **26**:1341-1352.

SPILLMANN, L.(1999) "From elements to perception: Local and global processing in visual neurons". *Perception* **28**: 1461-1492.

SUGITA, Y. (1995) "Contrast and Assimilation on different depth planes". *Vision Res.* **35 (7)**: 881-884.

SUREDA, J. (1986). "Las primeras civilizaciones" En *Historia Universal del Arte*. Tomo I. Barcelona: Planeta.

TUIJL van, H.F.J.M. (1975) "A new visual illusion: neon-like color spreading and complementary color induction between subjective contours". *Acta Psychol.* **39**: 441-445.

TUIJL van, H., F., J., M., WEERT de, CH., M., M. (1979). "Sensory conditions for the occurrence of the neon spreading illusion" *Perception* **8**: 211-215.

URTUBIA, C. (1985). "Algunos parámetros fisiológicos de la visión del color." *Ver y Oír*, nº 16: 15-20.

URTUBIA, C. (1986). "Estructura y función de la rodopsina". *Ver y Oír*, nº 19: 45-51.

URTUBIA, C. (1993). "¿Ven el mundo en color los animales?". Libro de Actas de las VII Jornadas Andaluzas sobre la visión, pp: 381-410. Sevilla: Sociedad Española de Optometría.

URTUBIA, C. (1994). "Bases Bioquímicas y genético-moleculares de la percepción cromática humana". Libro de Actas del III Congreso Nacional de Color, pp: 135-140. SEDO-Departamento de Optica, Universidad de Granada.

URTUBIA, C. (1997a) *Neurobiología de la Visión*. Barcelona: Edicions UPC.

URTUBIA, C. (1997 b). “Ecología de la visión del color”. Libro de Actas del IV Congreso Nacional de Color, pp: 50-51. SEDO-Departamento de Física. Universidad de Extremadura.

URTUBIA, C. GARRIGA, P. (2002) “El centro cerebral del color: una aproximación a la neurobiología de la percepción cromática” Libro de Actas del VI Congreso Nacional de Color, pp: 53-54. Sevilla: Area de Nutrición y Bromatología. Universidad de Sevilla.

WALD G. (1954). “The molecular basis of visual excitation” *Am. Scient.* **42**: 73-94.

WANDELL, BR., A. (1995). *Foundations of Vision*. Massacusetts: Sinauer Associates, Inc. Publishers.

WEERT de, CH., M., M.de, KRUYBERGER van, A.W.H. (1987) “Strenght of subjective contours and perceived superimposition: transparency as a special case” in *Perception of Illusory Contours*. pp:165-170. New York: Springer.

WEERT de, C. M. M. (1991). “Assimilation versus Contrast”. In *From Pigments to Perception*. Pp. 305-311. New York : Plenum Press, A. Valberg and B.B. Lee eds.

WEERT de, C.M.M., SPILLMANN, L. (1995) “Assimilation: Asymmetry between Brightness and Darkness? *Vision. Res.* **35 (10)**: 1413-1419.

WEERT de, C. M. M., KRUYBERGEN van, N. A. W. H. (1997). “Assimilation: central and peripheral effects”. *Perception*, **26**: 1217-1224.

WERTHEIMER, M. (1923) op.cit. in AGUILAR, M., MATEOS F. (1996) *Optica Fisiológica*. Tomo III p: 367. Valencia: Servei de Publicacions UPV.

WHITE, M. (1979) "A new effect on perceived lightness". *Perception* **8**:413-416.

WHITE, M. (1981) "The effect of the nature of the surround on the perceived lightness of grey bars within square-wave test gratings". *Perception* **10**: 215-230.

WIESEL, T.N., HUBEL, D.H. (1966). "Spatial and chromatic interactions in the lateral geniculate body of the rhesus monkey". *J. Neurophysiol.*, **29**: 1115-1156.

WYSZEKI, W.D., STILES WS. (1982). *Color Science: Concepts an Methods, Quantitative Data and Formulae*. (2ª ed.) New York :John Wiley and Sons. Inc.

WRIGHT, W.D. (1967) *The rays are not coloured*. London: Adam Hilger ed.

ZEKI, S. (1980). "The representation of colours in the cerebral cortex." *Nature*, **284**: 412-418.

ZEKI, S., SHIPP S., (1988). "The functional logic of cortical connections". *Nature*, **335**: 311-317.

ZEKI, S. (1992). "La imagen visual en la mente y en el cerebro" en *Mente y cerebro*. Barcelona: Prensa Científica, 1993.

ZEKI, S., MOUTOUSSIS, K. (1997) "Temporal hierarchy of the visual perceptive systems in the Mondrian world" *Proc.R.Soc.Lond.B.Biol.Sci.* **264 (1387)**: 1415-9.

ZEKI, S., MARINI, L. (1998). "Three cortical stages of colour processing in the

human brain”, *Brain*, **121**:1669-1685.

ZEKI, S. (2000). “The architecture of the colour centre in the human visual brain: new results and a review”. *Eur. J. Neurosci.*, **12**:172-193.

ZRENNER, E., GOURAS, P. (1981). “Characteristics of the Blue Sensitive Cone mechanism in Primate Ganglion cells”. *Vision Res.*, **21**: 1605-1609.

Bibliografía básica consultada pero no citada

BOFF, KAUFMAN, THOMAS. (1985). *Handbook of Perception and Human Performance. Vol. 1. Sensory processes and perception*. New York: Wiley.

BOYNTON, R. M. (1992). *Human Color Vision*. Washington D.C. Optical Society of America.

GUTIERREZ, S. (1993). *Estadística para las ciencias jurídicas*. Valencia: Tirant lo Blanc libros.

SCHMIDT, R.F., THEWS, G. (1989). “General and Special Sensory Physiology”. En *Human Physiology. Part III*. Berlin-Nueva York: Springer/ Verlag.

Apéndice A

**RELACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS A
PARTIR DE LAS OBSERVACIONES
EXPRESADOS EN VALORES ABSOLUTOS,
PROBABILIDADES Y PUNTUACIONES Z
NORMALIZADAS**

OBSERVADORES INDEPENDIENTES

OBSERVADOR 1: (A.M.) **EDAD:** 23

ILUMINACIÓN: 500 lux **TAMAÑO:** 1 cm

	+	%	z		-	%	z
3	2	(0.017)	-2.12		118	(0.983)	2.12
5	6	(0.050)	-1.64		114	(0.950)	1.64
10	8	(0.067)	-1.50		112	(0.933)	1.50
15	64	(0.533)	0.08		56	(0.467)	-0.08
20	115	(0.958)	1.73		5	(0.042)	-1.73
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
5	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
10	10	(0.063)	-1.53		110	(0.917)	1.53
15	56	(0.467)	-0.08		64	(0.533)	0.08
20	113	(0.942)	1.57		7	(0.058)	-1.57
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	1	(0.009)	-2.37		119	(0.991)	2.37
5	3	(0.025)	-1.96		117	(0.975)	1.96
10	8	(0.067)	-1.60		112	(0.933)	1.60
15	80	(0.667)	0.43		40	(0.333)	-0.43
20	115	(0.958)	1.73		5	(0.042)	-1.73
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

OBSERVADOR 2: (J.G.)**EDAD:** 22**ILUMINACIÓN:** 500 lux**TAMAÑO:** 1 cm

	+	%	z		-	%	z
3	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
5	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
10	4	(0.033)	-1.84		116	(0.967)	1.84
15	114	(0.950)	1.64		6	(0.050)	-1.64
20	118	(0.984)	2.15		2	(0.016)	-2.15
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	3	(0.025)	-1.96		117	(0.975)	1.96
5	4	(0.033)	-1.84		116	(0.967)	1.84
10	39	(0.291)	-0.55		81	(0.708)	0.55
15	105	(0.875)	1.15		15	(0.125)	-1.15
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	2	(0.016)	-2.14		118	(0.984)	2.14
5	2	(0.016)	-2.14		118	(0.984)	2.14
10	9	(0.075)	-1.44		111	(0.925)	1.44
15	86	(0.717)	0.57		34	(0.283)	-0.57
20	115	(0.958)	1.73		5	(0.042)	-1.73
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

OBSERVADOR 3: (C.B.) **EDAD:** 42

ILUMINACIÓN: 500 lux **TAMAÑO:** 1 cm

	+	%	z		-	%	z
3	7	(0.058)	-1.57		113	(0.942)	1.57
5	7	(0.058)	-1.57		113	(0.942)	1.57
10	24	(0.200)	-0.84		96	(0.800)	0.84
15	80	(0.667)	0.43		40	(0.333)	-0.43
20	111	(0.925)	1.44		9	(0.025)	-1.44
25	119	(0.992)	2.41		1	(0.008)	-2.41

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	31	(0.258)	-0.65		89	(0.742)	0.65
5	31	(0.258)	-0.65		89	(0.742)	0.65
10	91	(0.758)	0.70		29	(0.242)	-0.70
15	119	(0.992)	2.41		1	(0.008)	-2.41
20	119	(0.992)	2.41		1	(0.008)	-2.41
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	9	(0.075)	-1.44		111	(0.925)	1.44
5	11	(0.092)	-1.33		109	(0.908)	1.33
10	60	(0.500)	0.00		60	(0.500)	0.00
15	101	(0.842)	1.00		19	(0.158)	-1.00
20	114	(0.950)	1.65		6	(0.050)	-1.65
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

OBSERVADOR 1: (A.M.) **EDAD:** 23

ILUMINACIÓN: 500 lux **TAMAÑO:** 2 cm

	+	%	z		-	%	z
3	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
5	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
10	6	(0.050)	-1.64		114	(0.950)	1.64
15	102	(0.850)	1.04		18	(0.150)	-1.04
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
5	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
10	2	(0.016)	-2.14		118	(0.984)	2.14
15	48	(0.400)	-0.25		72	(0.600)	0.25
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
5	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
10	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
15	20	(0.166)	-0.97		100	(0.834)	0.97
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

OBSERVADOR 2**(J.G.)****EDAD: 22****ILUMINACIÓN:**

500 lux

TAMAÑO: 2 cm

	+	%	z		-	%	z
3	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
5	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
10	2	(0.016)	-2.14		118	(0.984)	2.14
15	94	(0.783)	0.79		26	(0.217)	-0.79
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN:

1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
5	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
10	6	(0.050)	-1.64		114	(0.950)	1.64
15	98	(0.817)	1.16		22	(0.183)	-1.16
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN:

2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
5	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
10	4	(0.033)	-1.83		116	(0.966)	1.83
15	28	(0.233)	-0.72		92	(0.767)	0.72
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

OBSERVADOR 3: (C.B.) **EDAD:** 42

ILUMINACIÓN: 500 lux **TAMAÑO:** 2 cm

	+	%	z		-	%	z
3	47	(0.392)	-0.27		73	(0.608)	0.27
5	23	(0.192)	-0.87		97	(0.808)	0.87
10	66	(0.550)	0.13		54	(0.450)	-0.13
15	118	(0.984)	2.15		2	(0.016)	-2.15
20	120	(1)	3.0		0	(0)	3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	3.0

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	41	(0.342)	-0.40		79	(0.658)	0.40
5	51	(0.425)	-0.18		69	(0.575)	0.18
10	94	(0.783)	0.78		26	(0.217)	-0.78
15	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	6	(0.050)	-1.64		114	(0.950)	1.64
5	19	(0.158)	-1.00		101	(0.842)	1.00
10	77	(0.642)	0.37		43	(0.358)	-0.37
15	116	(0.967)	1.84		4	(0.033)	-1.84
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

OBSERVADOR 1: (A.M.) **EDAD:** 23

ILUMINACIÓN: 500 lux **TAMAÑO:** 4 cm

	+	%	z		-	%	z
3	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
5	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
10	22	(0.184)	-0.90		98	(0.816)	0.90
15	90	(0.750)	0.68		30	(0.250)	-0.68
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
5	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
10	4	(0.034)	-1.82		116	(0.966)	1.82
15	88	(0.734)	0.63		32	(0.266)	-0.63
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
5	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
10	34	(0.284)	-0.57		86	(0.716)	0.57
15	106	(0.884)	1.20		14	(0.116)	-1.20
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

OBSERVADOR 2: (J.G.) **EDAD:** 22

ILUMINACIÓN: 500 lux **TAMAÑO:** 4 cm

	+	%	z		-	%	z
3	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
5	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
10	8	(0.066)	-1.50		112	(0.934)	1.50
15	70	(0.583)	0.21		50	(0.417)	-0.21
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
5	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
10	25	(0.208)	-0.81		95	(0.792)	0.81
15	52	(0.433)	-0.33		68	(0.567)	-0, 33
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
5	0	(0)	-3.0		120	(1)	3.0
10	27	(0.225)	-0.75		93	(0.775)	0.75
15	80	(0.667)	0.43		40	(0.333)	-0.43
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

OBSERVADOR 3: (C.B.) **EDAD:** 42

ILUMINACIÓN: 500 lux **TAMAÑO:** 4 cm

	+	%	z		-	%	z
3	69	(0,575)	0.19		51	(0,425)	-0.19
5	86	(0,717)	0.58		34	(0,283)	-0.58
10	107	(0,892)	1.24		13	(0,108)	-1.24
15	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	92	(0,767)	0.73		28	(0,233)	-0.73
5	91	(0,758)	0.70		29	(0,242)	-0.70
10	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
15	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	96	(0,800)	0.85		24	(0,200)	-0.85
5	111	(0,925)	1.44		9	(0,075)	-1.44
10	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
15	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

OBSERVADOR 1: (A.M.) **EDAD:** 23

ILUMINACIÓN: 500 lux **TAMAÑO:** 8 cm

	+	%	z		-	%	z
3	90	(0,750)	0.68		30	(0,250)	-0.68
5	106	(0,884)	1.20		14	(0.116)	-1.20
10	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
15	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	94	(0,783)	0.79		26	(0,217)	-0.79
5	110	(0,917)	1.39		10	(0,083)	-1.39
10	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
15	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	110	(0,917)	1.39		10	(0,083)	-1.39
5	115	(0,958)	1.73		5	(0,042)	-1.73
10	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
15	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

OBSERVADOR 2: (J.G.) **EDAD:** 22

ILUMINACIÓN: 500 lux **TAMAÑO:** 8 cm

	+	%	z	-	%	z
3	105	(0,875)	1.15	15	(0.125)	-1.15
5	102	(0,850)	1.04	18	(0,150)	-1.04
10	120	(1)	3.0	0	(0)	-3.0
15	120	(1)	3.0	0	(0)	-3.0
20	120	(1)	3.0	0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0	0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z	-	%	z
3	97	(0,808)	0.88	23	(0,192)	-0.88
5	112	(0,933)	1.50	8	(0,066)	-1.50
10	120	(1)	3.0	0	(0)	-3.0
15	120	(1)	3.0	0	(0)	-3.0
20	120	(1)	3.0	0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0	0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z	-	%	z
3	114	(0,950)	1.65	6	(0,050)	-1.65
5	119	(0,991)	2.37	1	(0.008)	-2.37
10	120	(1)	3.0	0	(0)	-3.0
15	120	(1)	3.0	0	(0)	-3.0
20	120	(1)	3.0	0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0	0	(0)	-3.0

OBSERVADOR 3: (C.B.) **EDAD:** 42

ILUMINACIÓN: 500 lux **TAMAÑO:** 8 cm

	+	%	z		-	%	z
3	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
5	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
10	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
15	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
5	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
10	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
15	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
5	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
10	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
15	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
20	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0
25	120	(1)	3.0		0	(0)	-3.0

MEDIA DE LOS TRES OBSERVADORES

OBSERVADOR: Media de los tres observadores

ILUMINACIÓN: 500 lux **TAMAÑO:** 1 cm

	+	%	z		-	%	z
3	9	(0,025)	- 1,96		351	(0,975)	1,96
5	13	(0,037)	- 1,78		347	(0,963)	1,78
10	36	(0,100)	- 1,28		324	(0,900)	1,28
15	258	(0,717)	0,58		102	(0,283)	-0,58
20	344	(0,956)	1,71		16	(0,044)	-1,71
25	359	(0,998)	2,88		1	0,002)	-2,88

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	20	(0,055)	- 1,59		340	(0,945)	1,59
5	35	(0,098)	- 1,29		325	(0,902)	1,29
10	140	(0,389)	- 0,28		220	(0,611)	0,28
15	280	(0,778)	0,77		80	(0,222)	-0,77
20	352	(0,978)	2,02		8	(0,022)	-2,02
25	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	12	(0,034)	- 1,82		348	(0,966)	1,82
5	16	(0,045)	- 1,69		344	(0,955)	1,69
10	77	(0,213)	- 0,79		283	(0,787)	0,79
15	267	(0,742)	0,65		93	(0,258)	-0,65
20	344	(0,956)	1,71		16	(0,044)	-1,71
25	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00

OBSERVADOR: Media de los tres observadores

ILUMINACIÓN: 500 lux **TAMAÑO:** 2 cm

	+	%	z		-	%	z
3	47	(0,130)	-1,13		313	(0,870)	1,13
5	23	(0,064)	-1,55		337	(0,936)	1,55
10	74	(0,205)	-0,82		286	(0,795)	0,82
15	314	(0,873)	1,14		46	(0,127)	-1,14
20	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
25	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	41	(0,114)	-1,21		319	(0,886)	1,21
5	51	(0,142)	-1,07		309	(0,858)	1,07
10	102	(0,283)	-0,57		258	(0,717)	0,57
15	266	(0,738)	0,64		94	(0,262)	-0,64
20	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
25	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	6	(0,016)	-2,14		354	(0,984)	2,14
5	19	(0,052)	-1,62		341	(0,948)	1,62
10	81	(0,225)	-0,76		279	(0,775)	0,76
15	164	(0,455)	-0,11		196	(0,545)	0,11
20	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
25	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00

OBSERVADOR: Media de los tres observadores

ILUMINACIÓN: 500 lux **TAMAÑO:** 4 cm

	+	%	z		-	%	z
3	69	(0,191)	-0,88		291	(0,809)	0,88
5	86	(0,238)	-0,71		274	(0,762)	0,71
10	139	(0,386)	-0,29		221	(0,614)	0,29
15	280	(0,778)	0,77		80	(0,222)	-0,77
20	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
25	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	92	(0,255)	-0,66		268	(0,745)	0,66
5	91	(0,252)	-0,67		269	(0,748)	0,67
10	167	(0,463)	-0,09		193	(0,537)	0,09
15	262	(0,728)	0,61		98	(0,272)	-0,61
20	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
25	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	96	(0,266)	-0,62		264	(0,734)	0,62
5	111	(0,308)	-0,50		249	(0,692)	0,50
10	181	(0,502)	0,00		179	(0,498)	-0,00
15	306	(0,850)	1,04		54	(0,150)	-1,04
20	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
25	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00

OBSERVADOR: Media de los tres observadores

ILUMINACIÓN: 500 lux **TAMAÑO:** 8 cm

	+	%	z		-	%	z
3	275	(0,764)	0,72		85	(0,236)	-0,72
5	320	(0,889)	1,22		40	(0,111)	-1,22
10	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
15	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
20	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
25	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00

ILUMINACIÓN: 1000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	311	(0,864)	1,10		49	(0,136)	-1,10
5	342	(0,950)	1,64		18	(0,050)	-1,64
10	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
15	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
20	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
25	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00

ILUMINACIÓN: 2000 lux

	+	%	z		-	%	z
3	344	(0,956)	1,71		16	(0,044)	-1,71
5	354	(0,984)	2,15		6	(0,016)	-2,15
10	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
15	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
20	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00
25	360	(1)	3,00		0	(0)	-3,00

Apéndice B

GRÁFICAS CON VALORES BRUTOS EXPRESADOS EN PROBABILIDADES PARA OBSERVADORES INDIVIDUALES

OBSERVADOR 1 TAMAÑO T

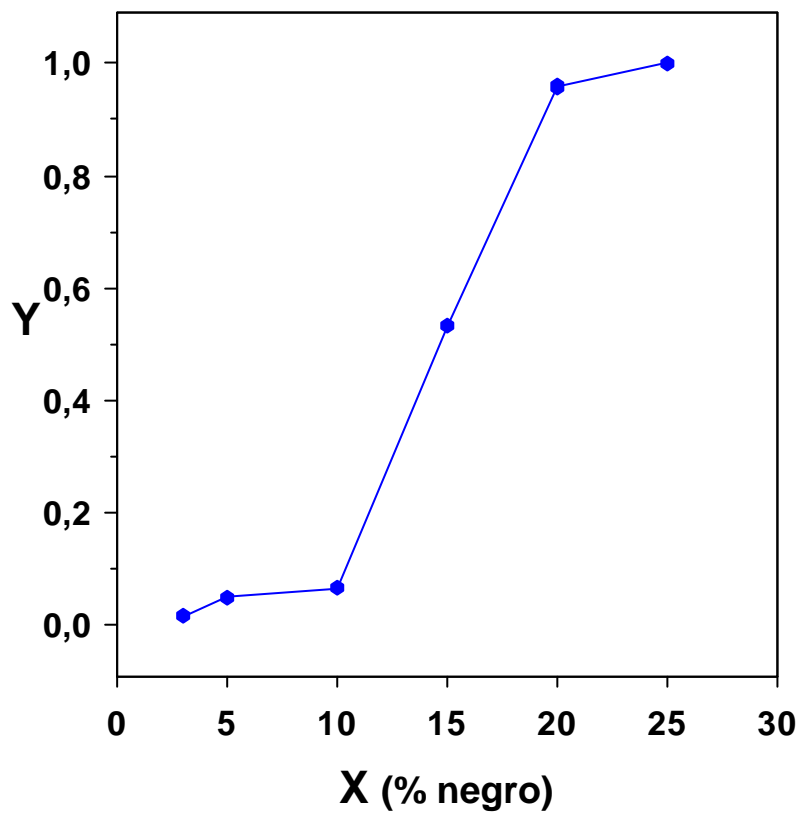


Figura 1. Valores de los juicios “mayor que”, expresados en probabilidades, del observador 1 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3 m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

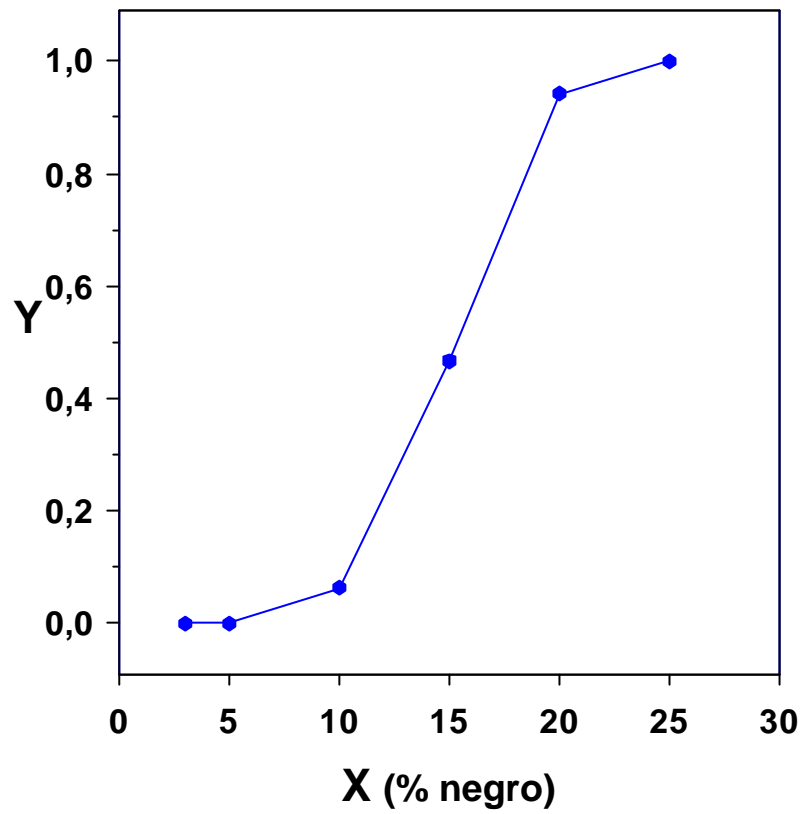


Figura 2. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 1 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3 m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

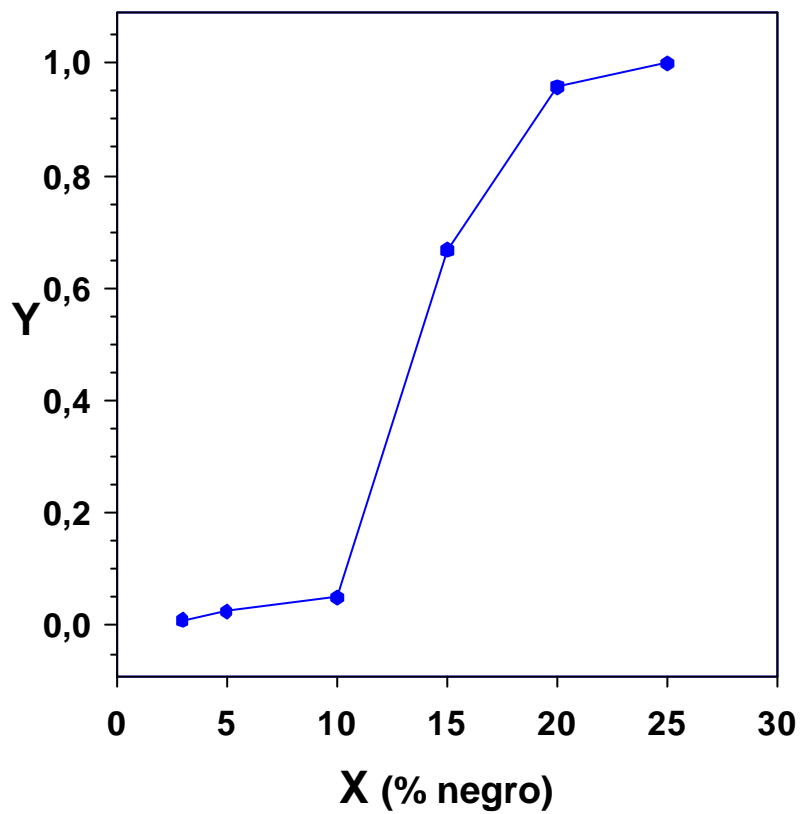


Figura 3. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 1 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3 m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

TAMAÑO 2 T

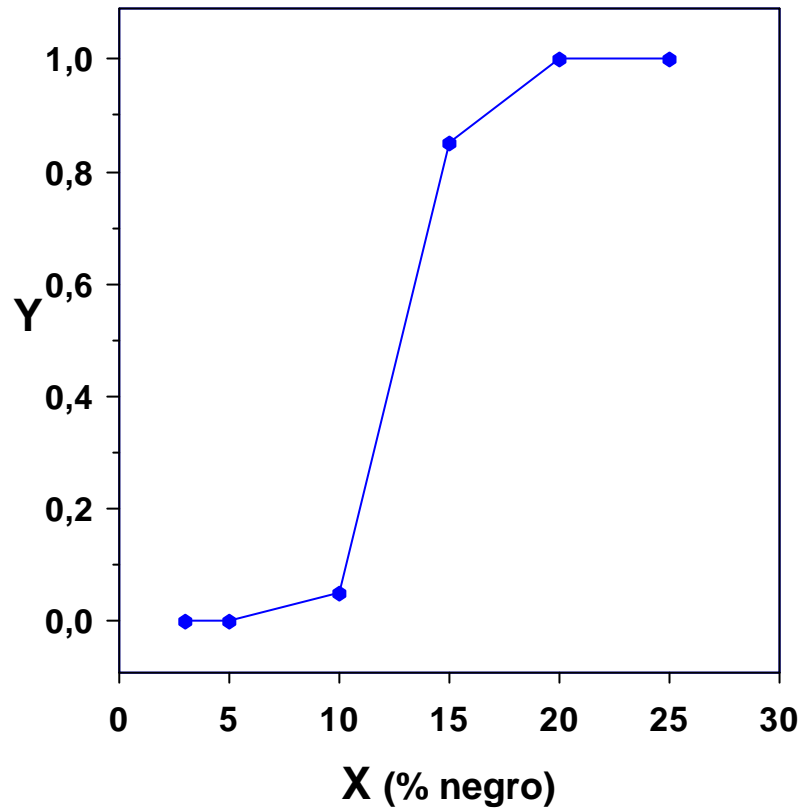


Figura 4. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 1 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3 m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

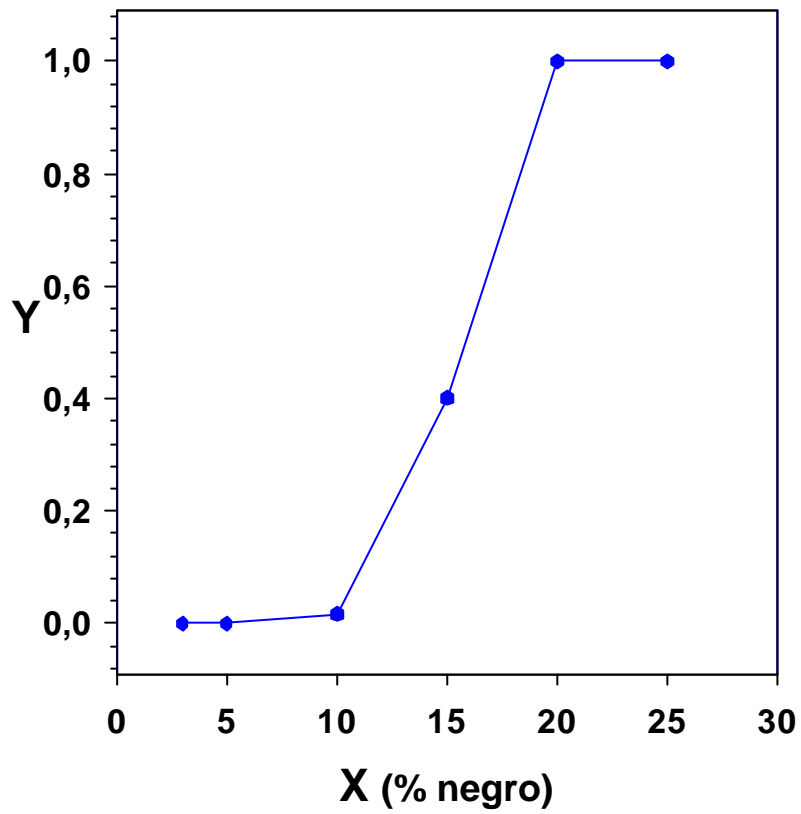


Figura 5. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 1 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3 m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

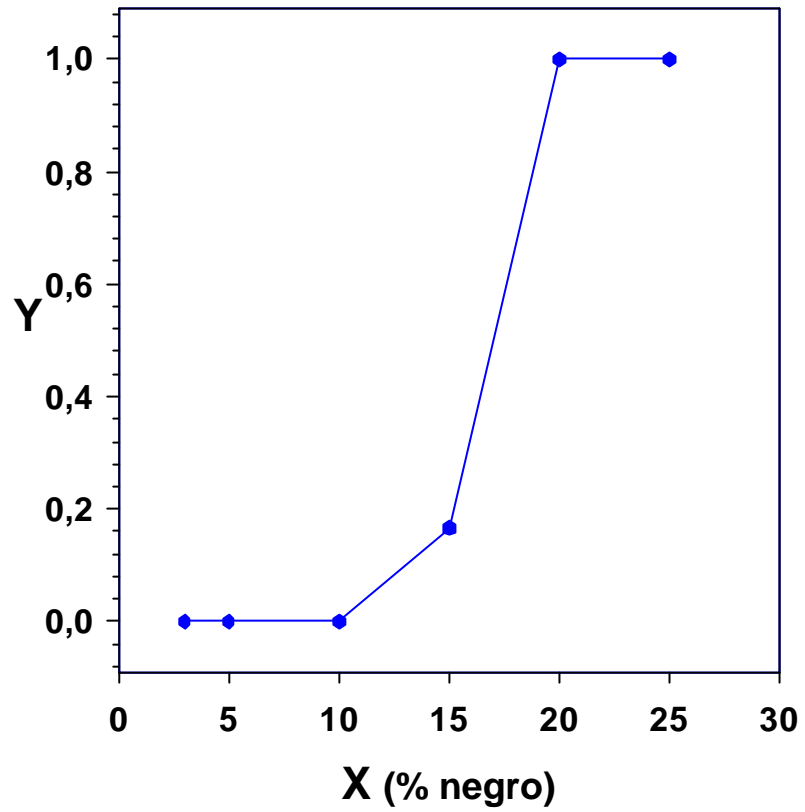


Figura 6. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 1 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3 m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

TAMAÑO 4 T

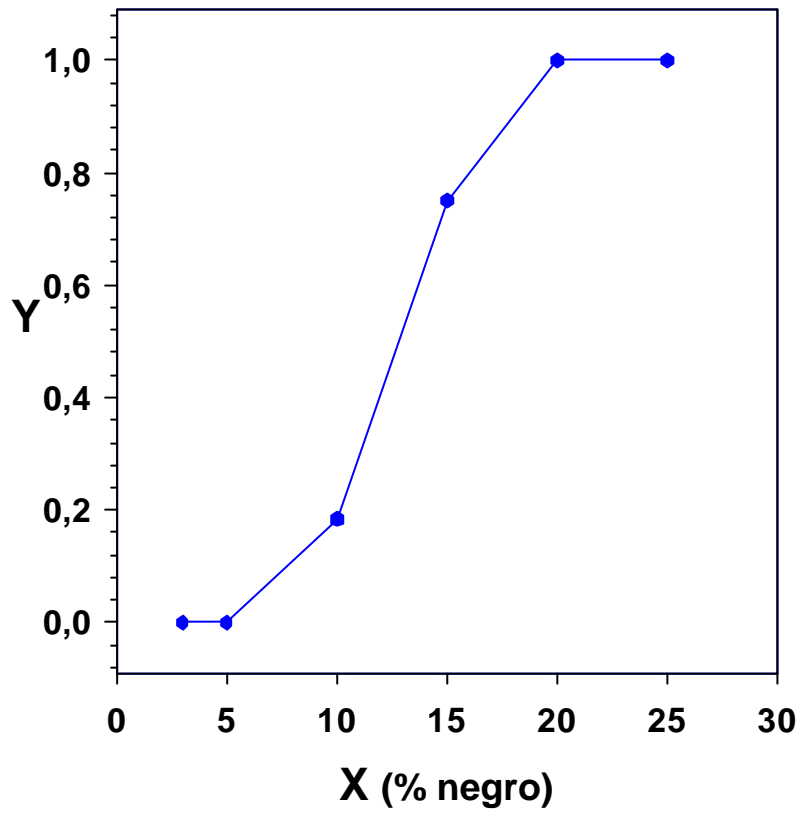


Figura 7. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 1 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

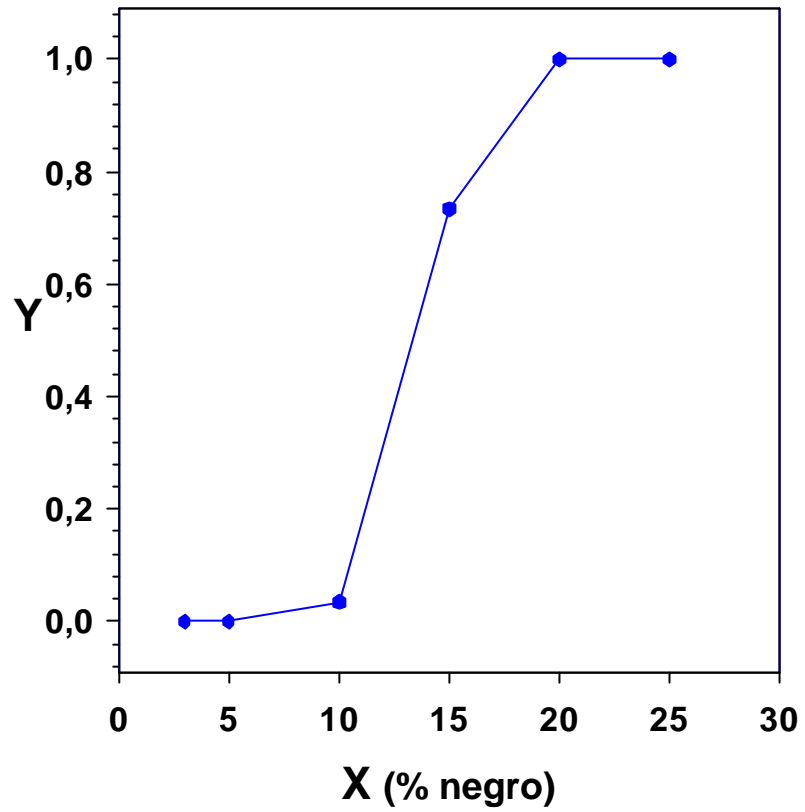


Figura 8. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 1 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

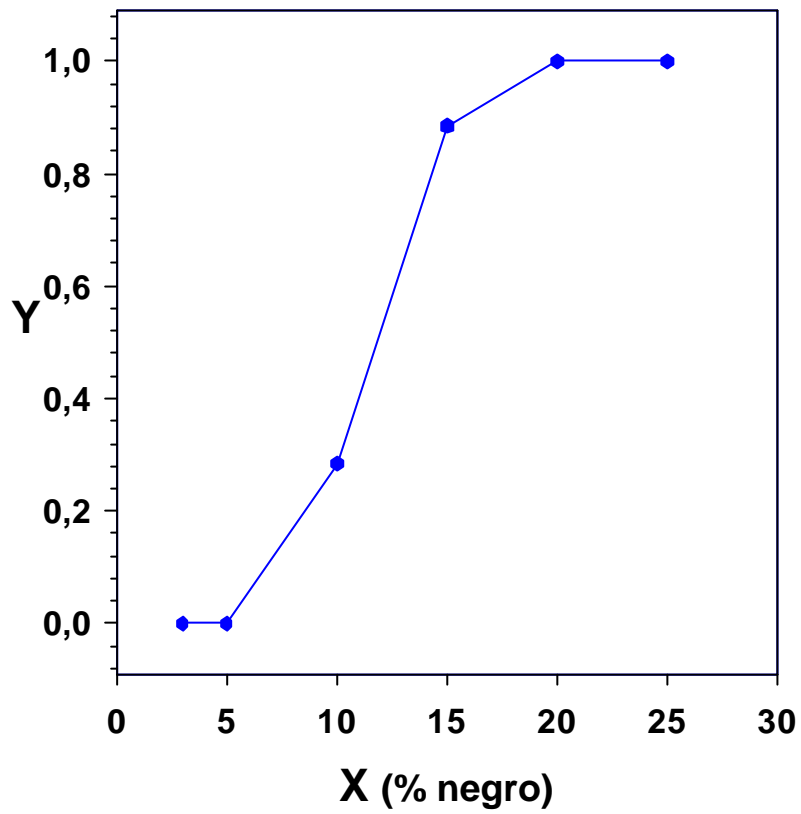


Figura 9. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 1 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

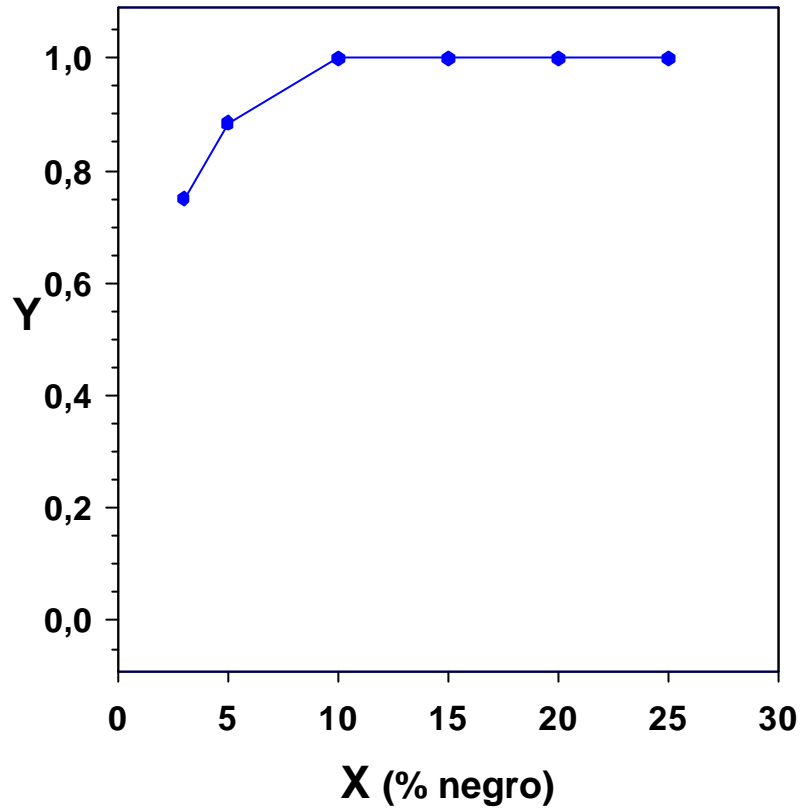
TAMAÑO 8 T

Figura 10. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 1 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 0,75 m de distancia (100°), en función del porcentaje de oscurecimiento.

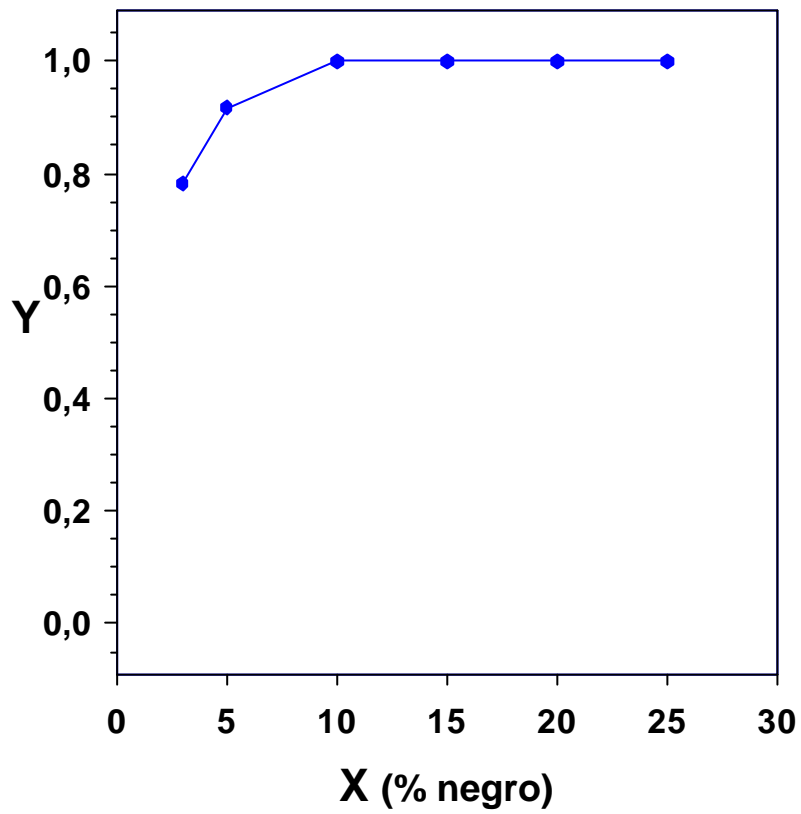


Figura 11. Valores de los juicios “mayor que”, expresados en probabilidades, del observador 1 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 0,75 m de distancia (100'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

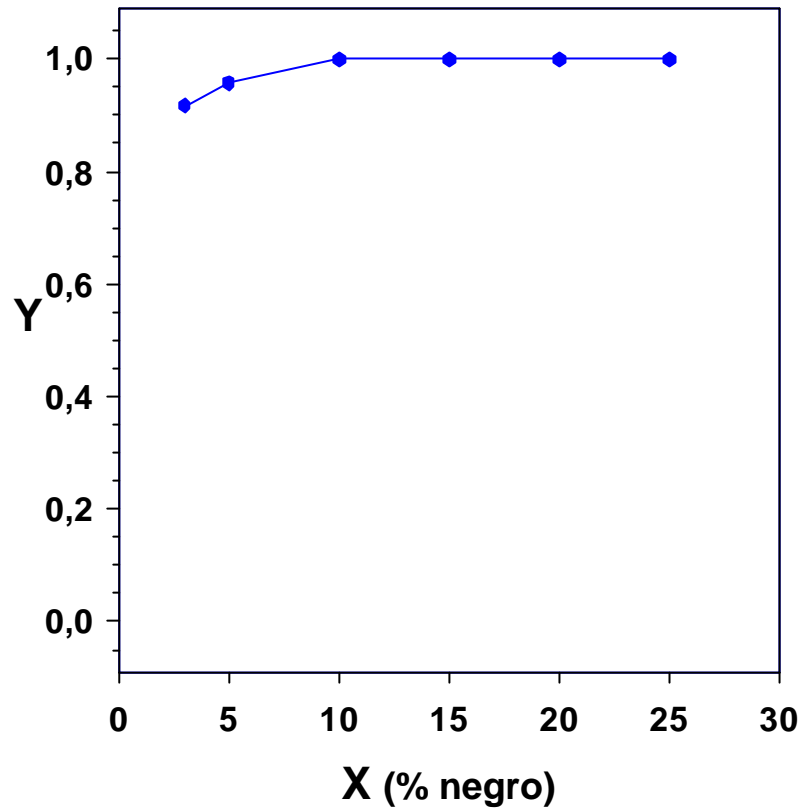


Figura 12. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 1 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 0,75 m de distancia (100'), en función del porcentaje de oscurecimiento

OBSERVADOR 2

TAMAÑO T

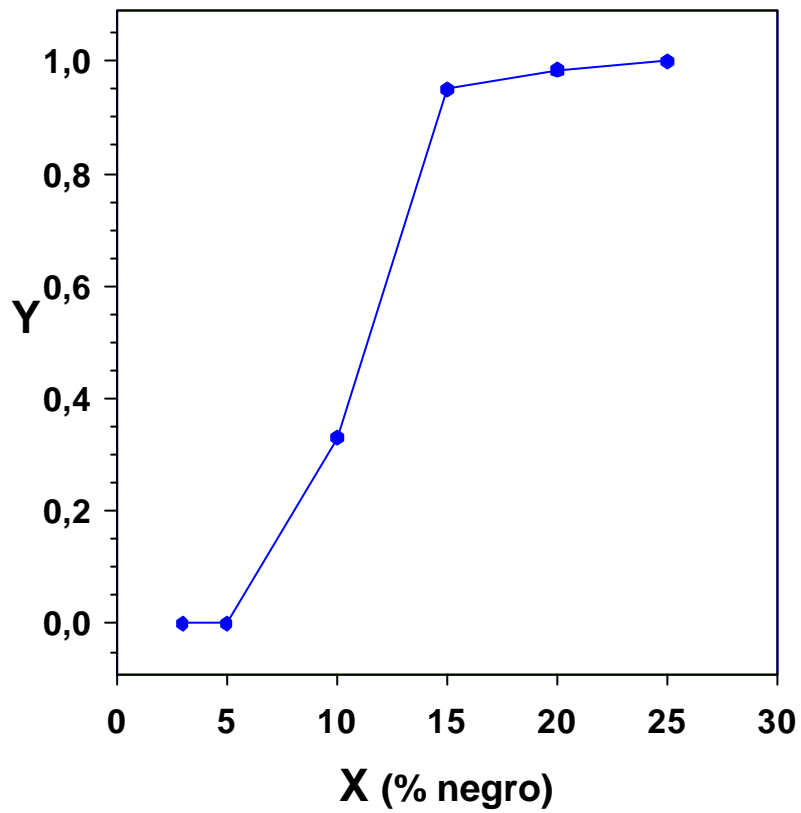


Figura 13. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 2 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3 m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

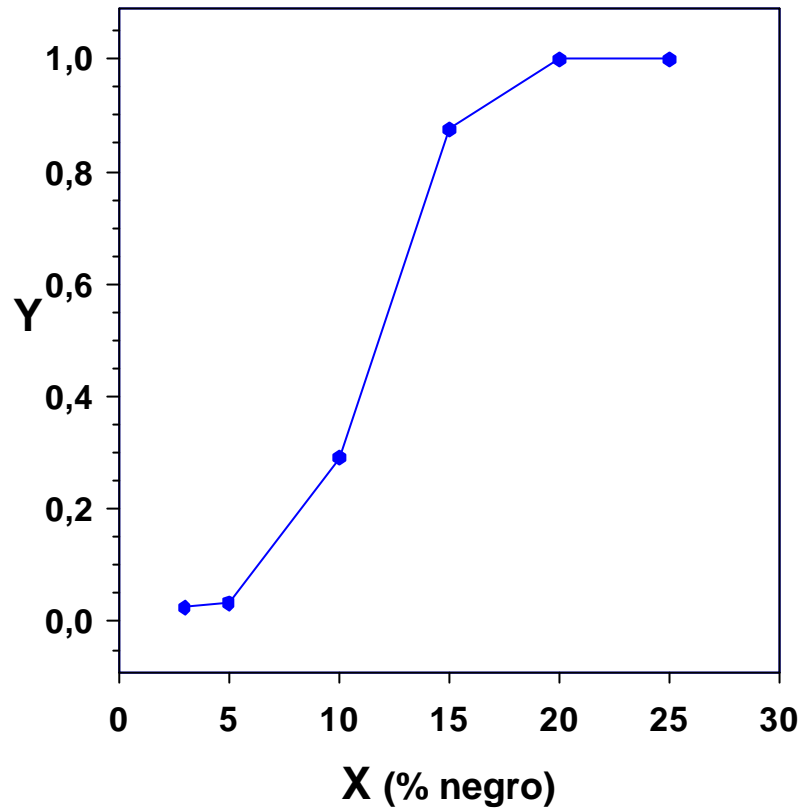


Figura 14. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 2 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3 m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

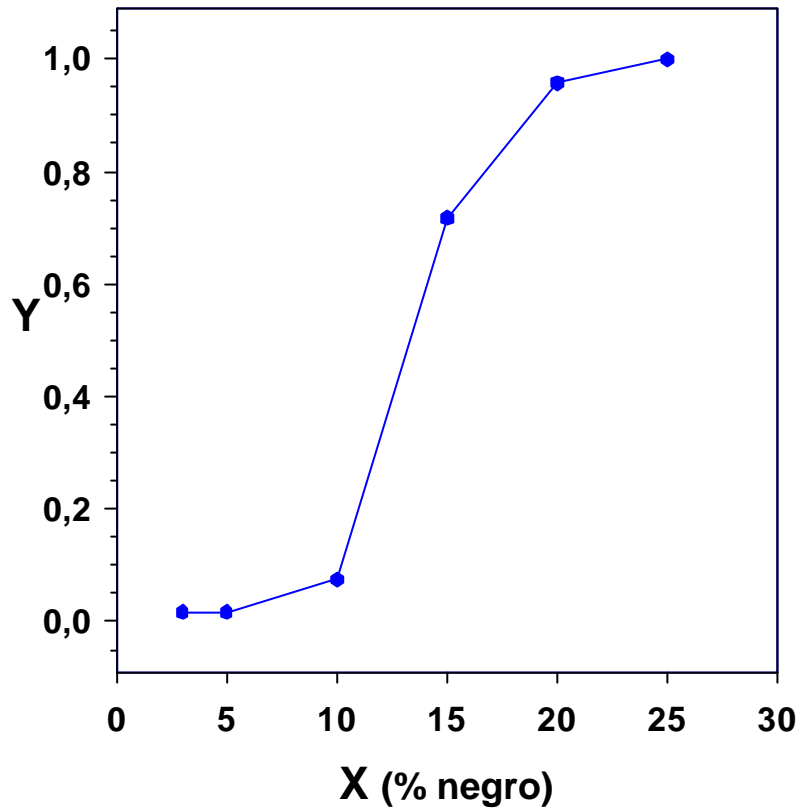


Figura 15. Valores de los juicios “mayor que”, expresados en probabilidades, del observador 2 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3 m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

TAMAÑO 2 T

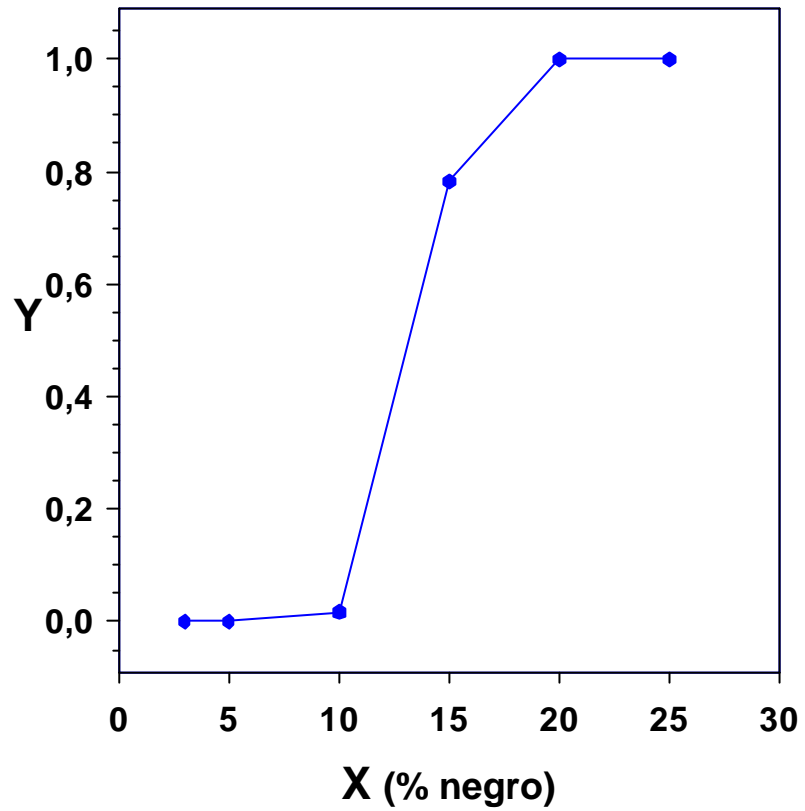


Figura 16. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 2 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3 m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

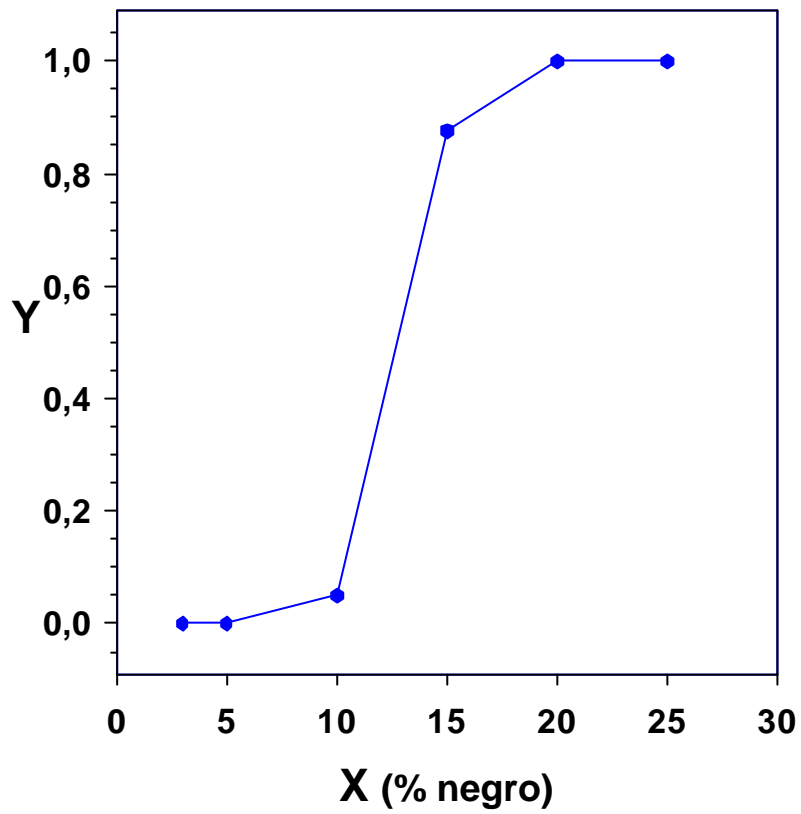


Figura 17. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 2 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3 m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

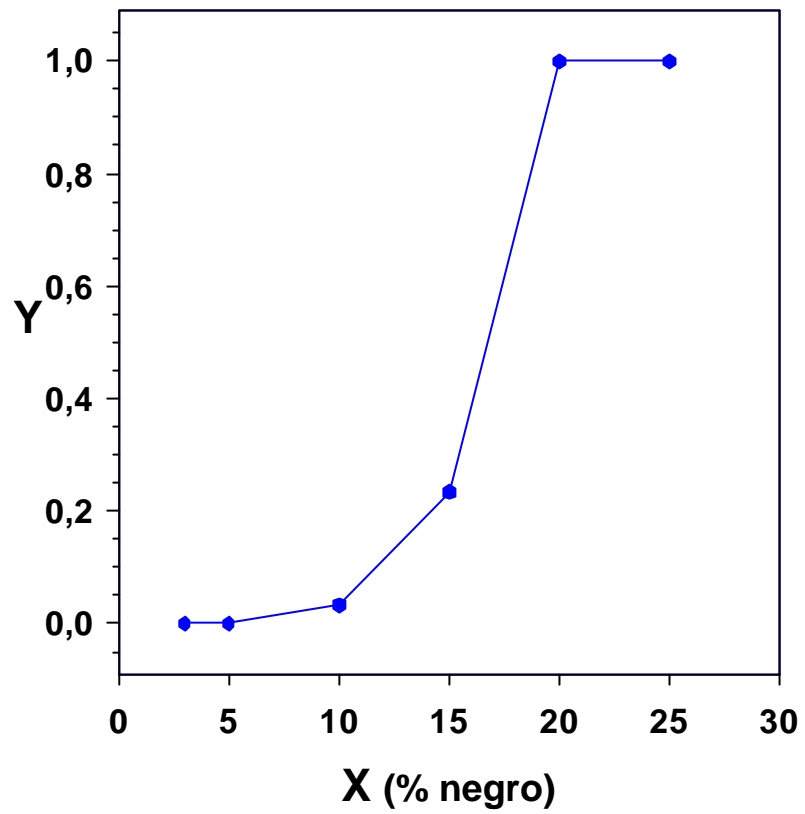


Figura 18. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 2 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3 m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

TAMAÑO 4 T

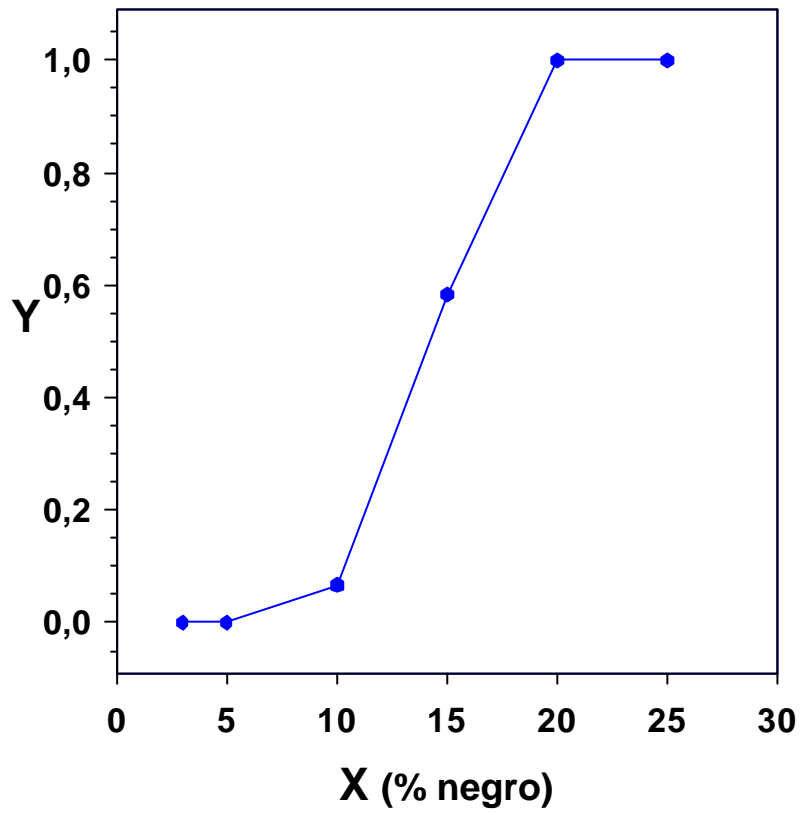


Figura 19. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 2 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

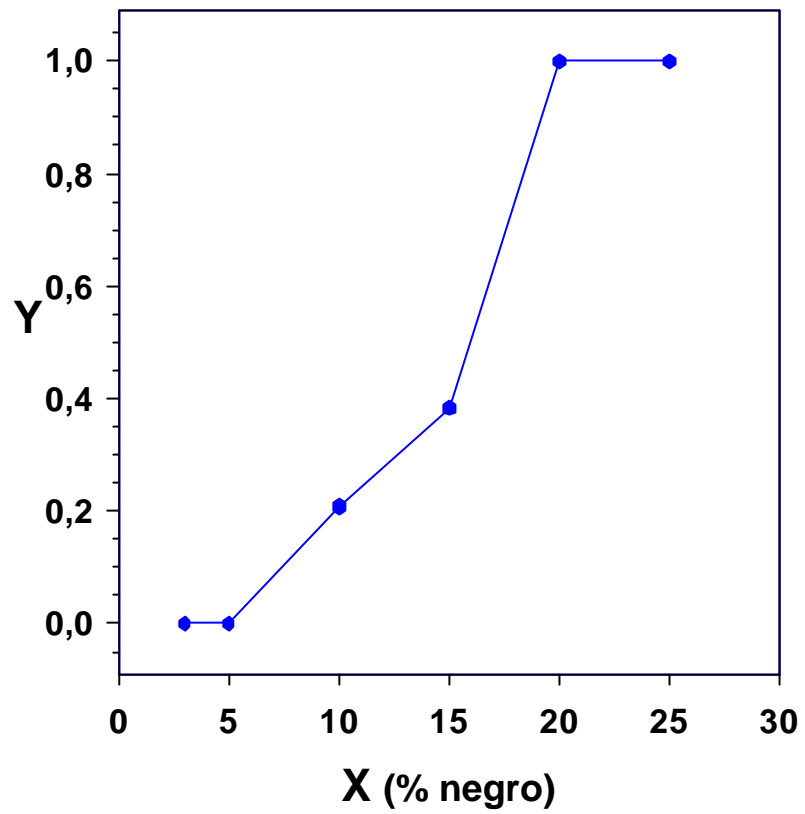


Figura 20. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 2 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50°), en función del porcentaje de oscurecimiento.

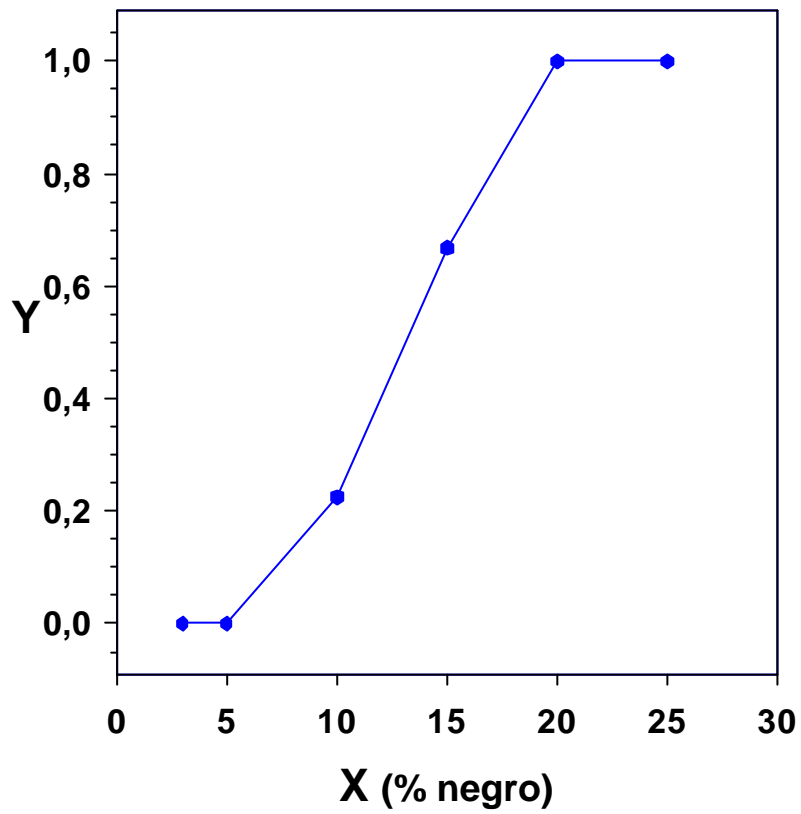


Figura 21. Valores de los juicios “mayor que”, expresados en probabilidades, del observador 2 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

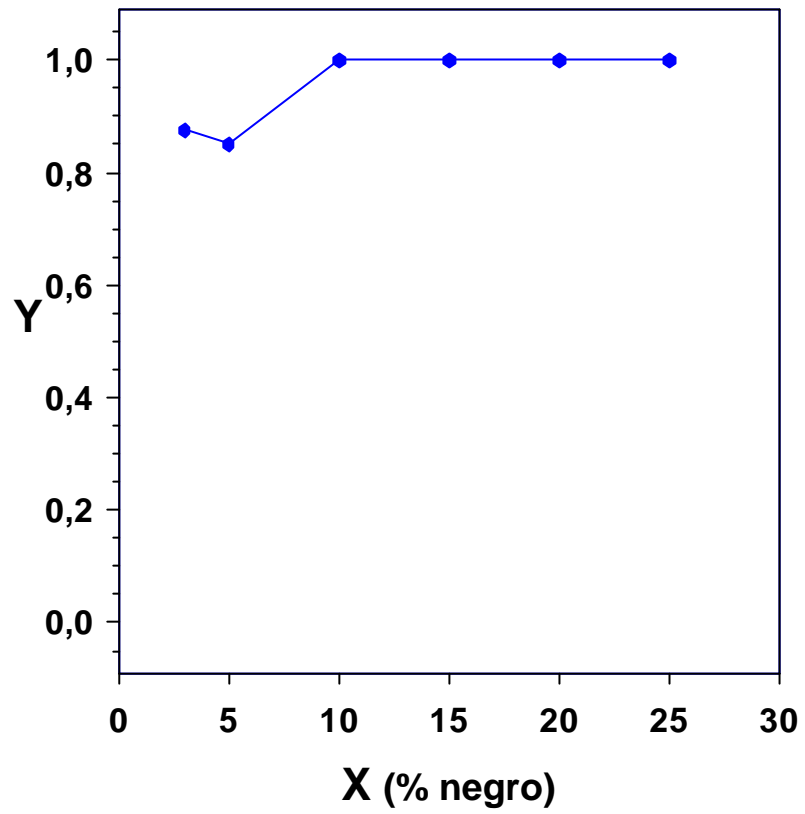
TAMAÑO 8 T

Figura 22. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 2 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 0,75 m de distancia (100°), en función del porcentaje de oscurecimiento.

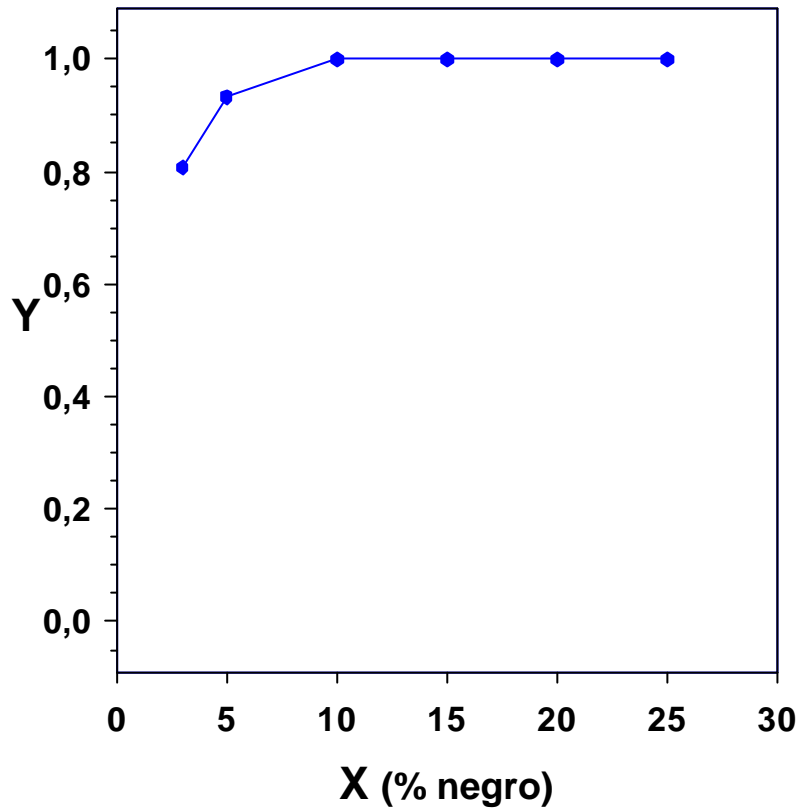


Figura 23. Valores de los juicios “mayor que”, expresados en probabilidades, del observador 2 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 0,75 m de distancia (100'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

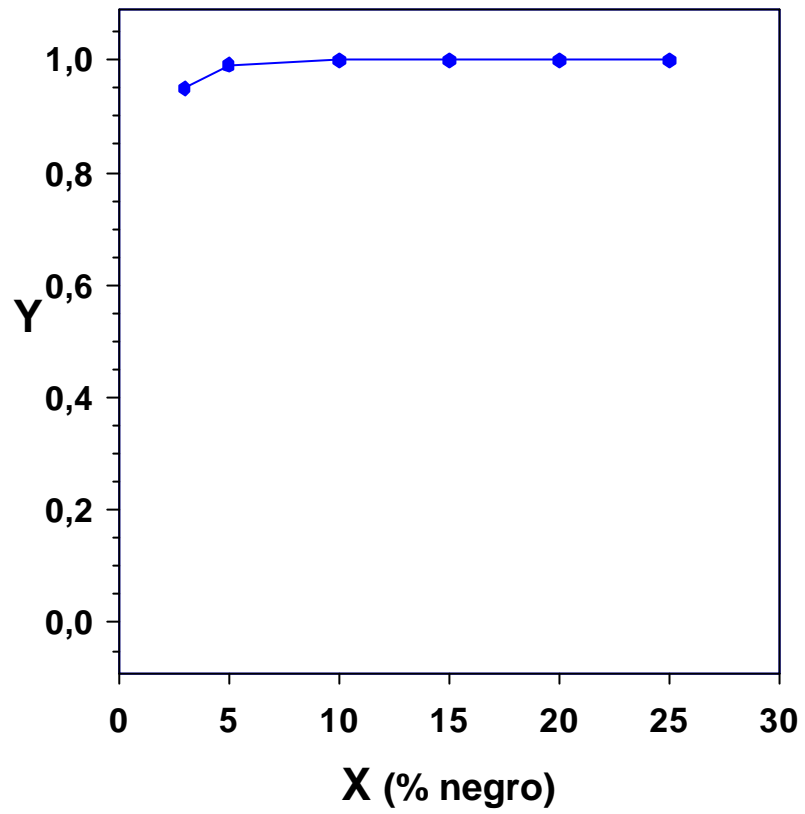


Figura 24. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 2 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 0,75 m de distancia (100'), en función del porcentaje de oscurecimiento

OBSERVADOR 3

TAMAÑO T

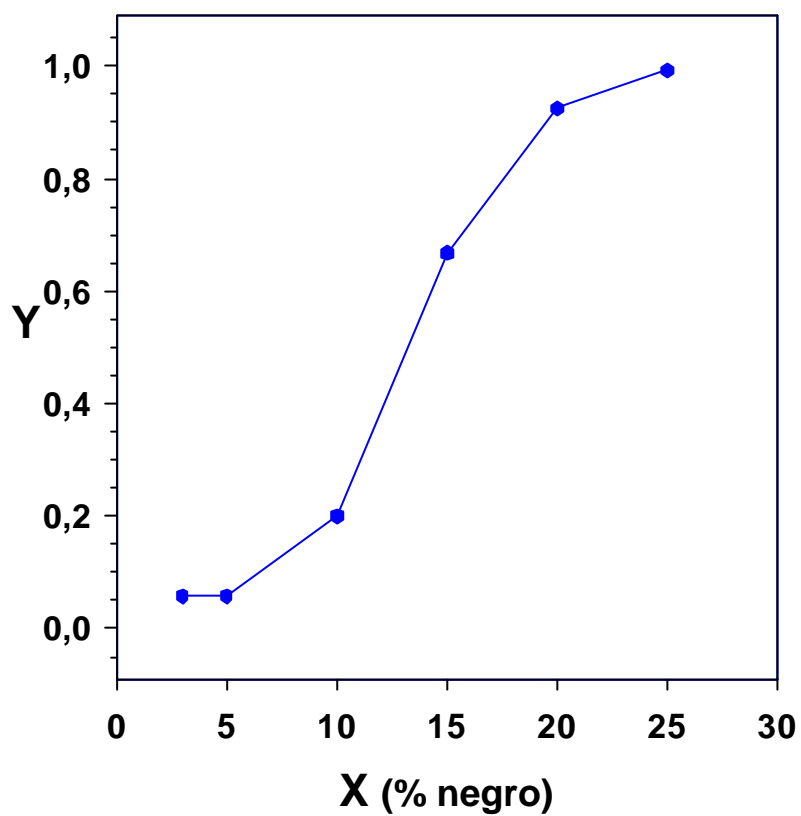


Figura 25. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 3 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3 m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

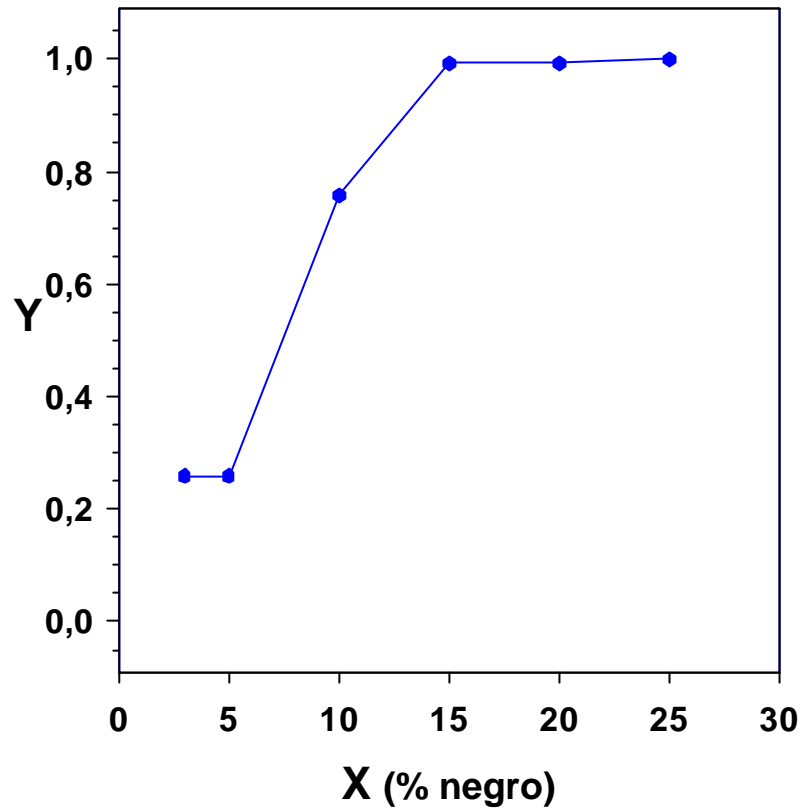


Figura 26. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 3 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3 m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

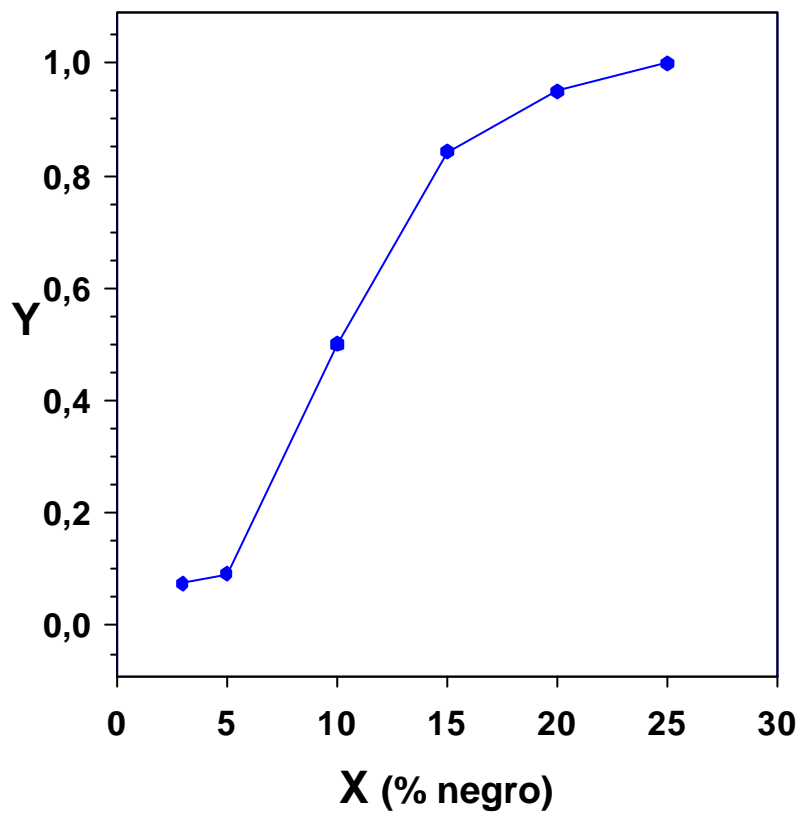


Figura 27. Valores de los juicios “mayor que”, expresados en probabilidades, del observador 3 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3 m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

TAMAÑO 2 T

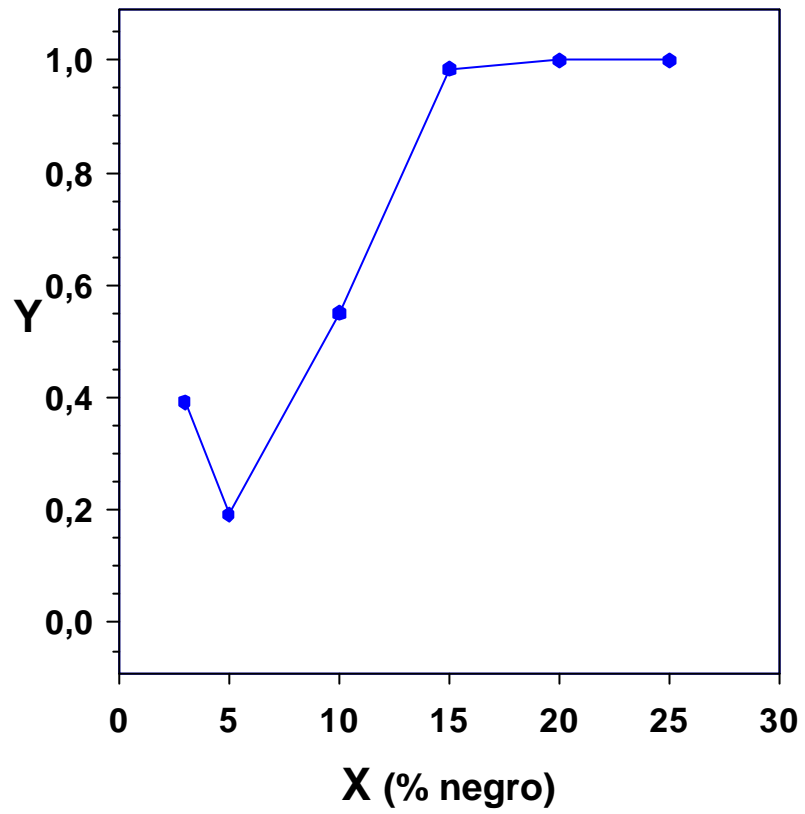


Figura 28. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 3 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3 m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

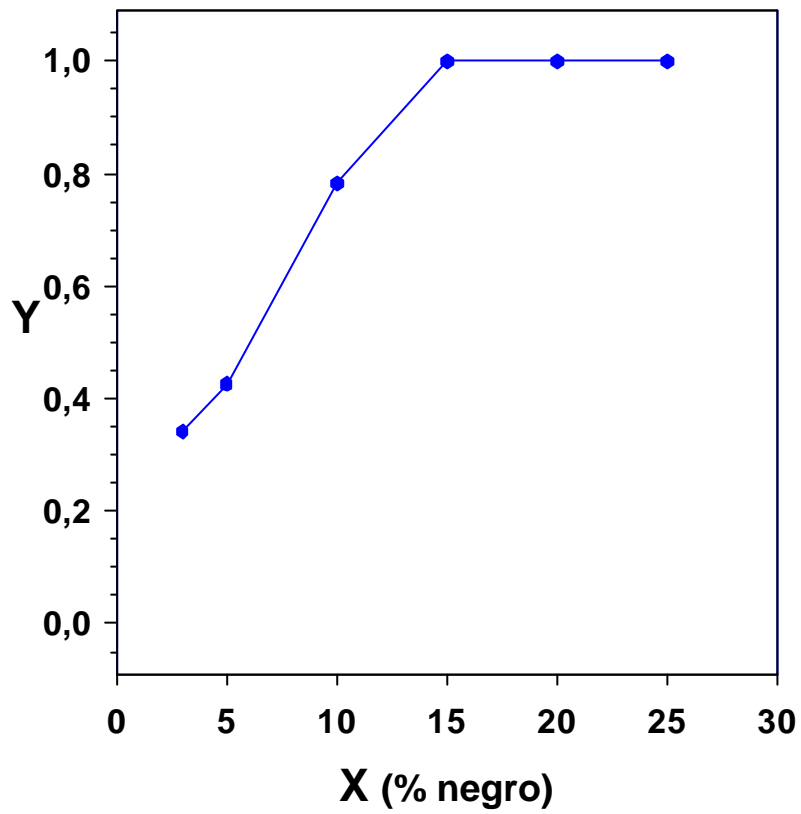


Figura 29. Valores de los juicios “mayor que”, expresados en probabilidades, del observador 3 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3 m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

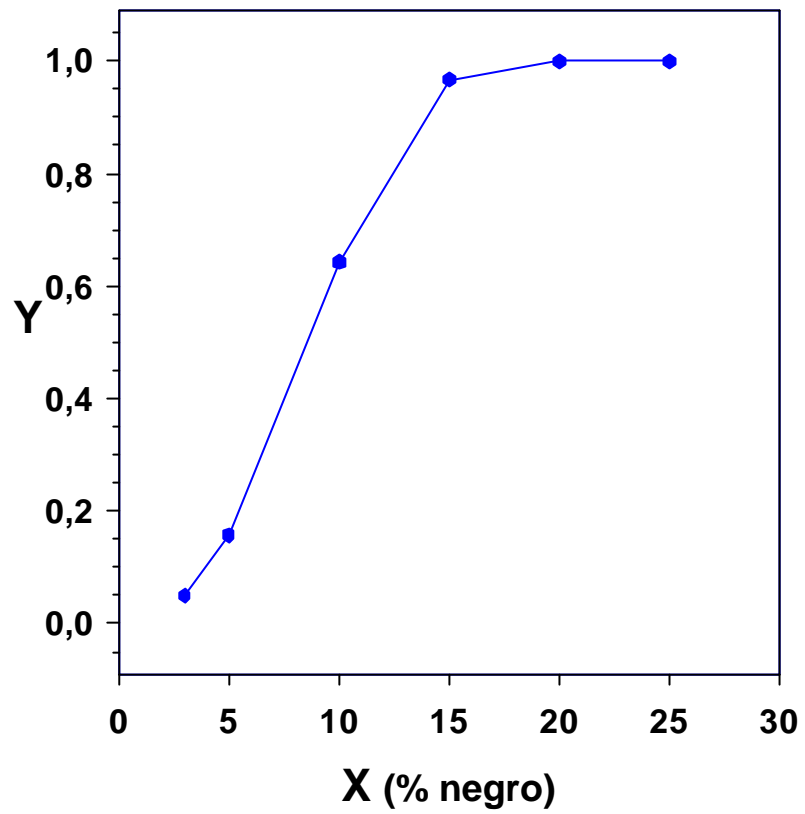


Figura 30. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 3 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3 m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

TAMAÑO 4 T

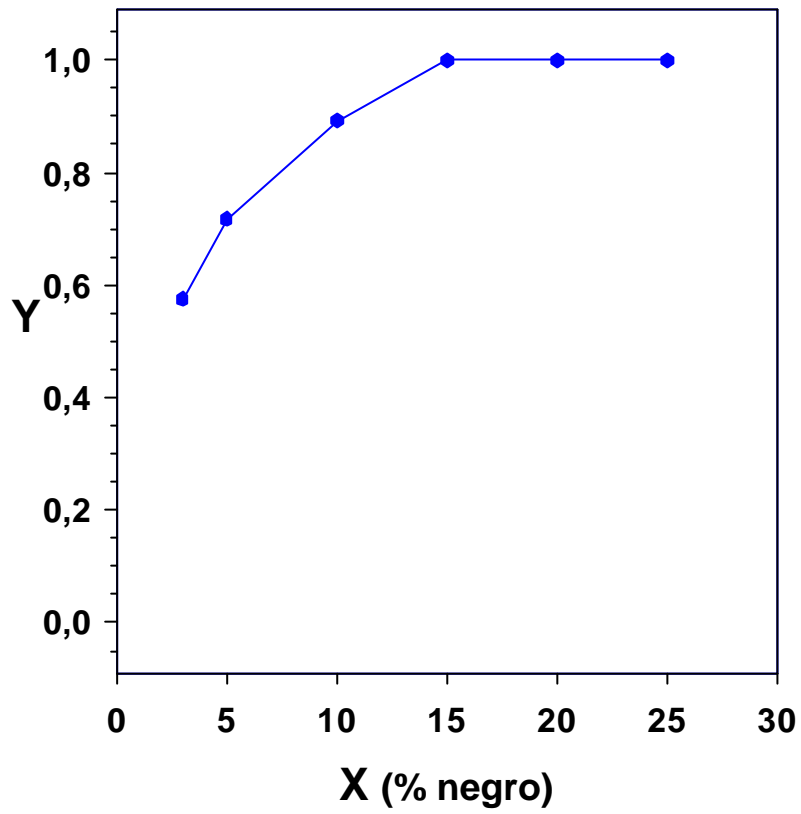


Figura 31. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del observador 3 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

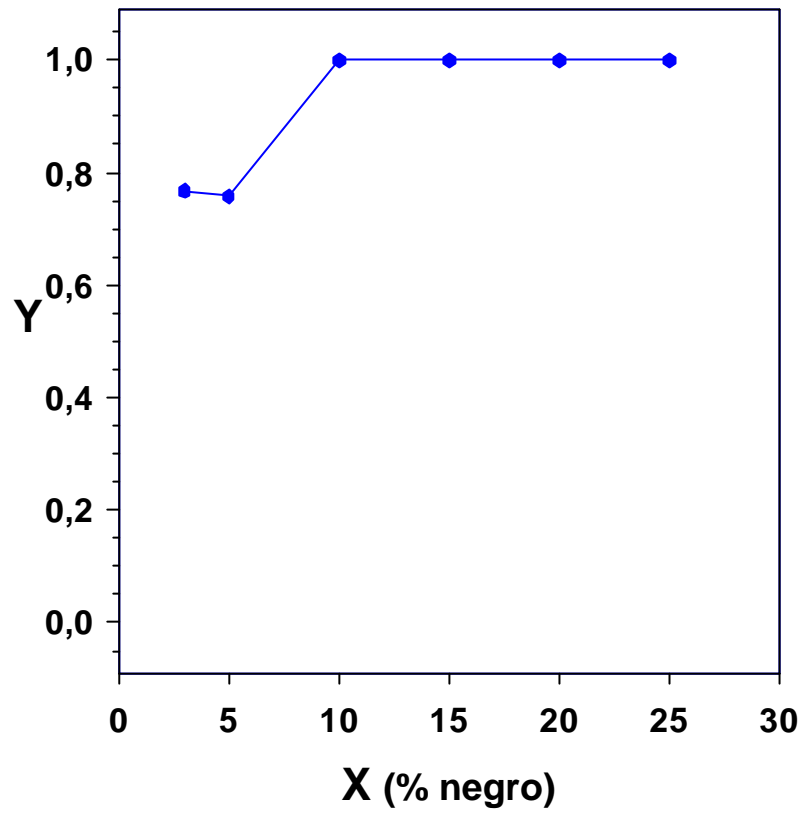


Figura 32. Valores de los juicios “mayor que”, expresados en probabilidades, del observador 3 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

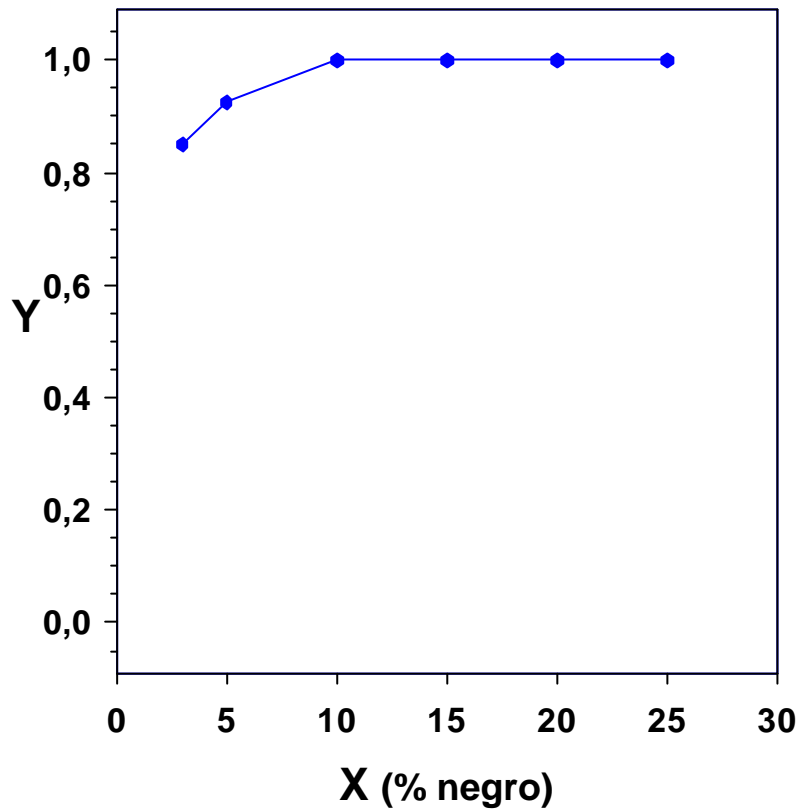


Figura 33. Valores de los juicios “mayor que”, expresados en probabilidades, del observador 3 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

GRÁFICAS CON VALORES BRUTOS EXPRESADOS EN PROBABILIDADES PARA EL PROMEDIO DE LOS OBSERVADORES

TAMAÑO T

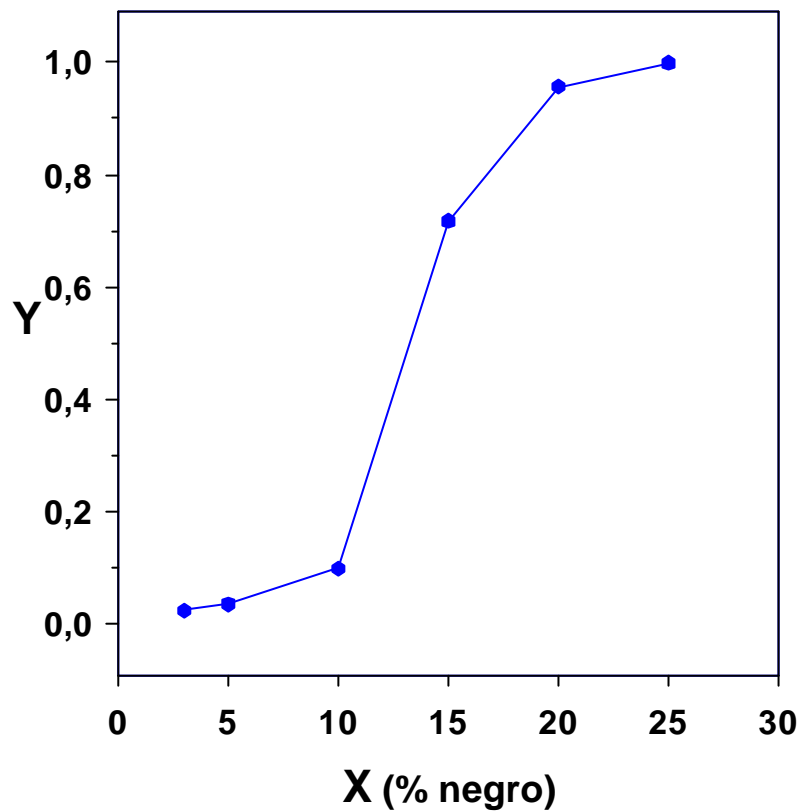


Figura 34. Valores de los juicios “mayor que”, expresados en probabilidades, del total de observadores para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3 m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

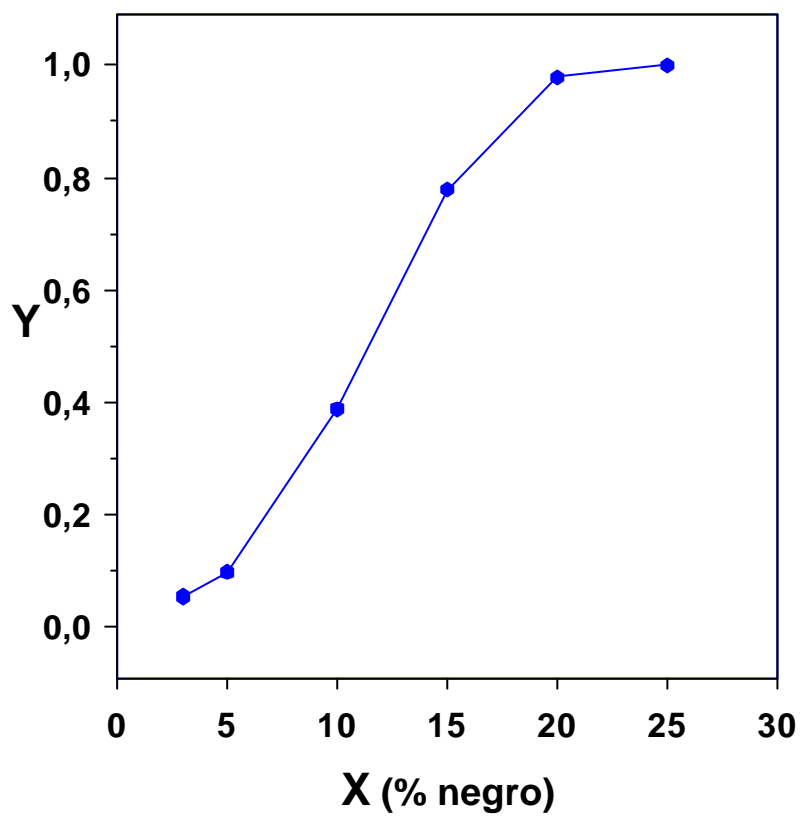


Figura 35. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del total de observadores para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3 m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

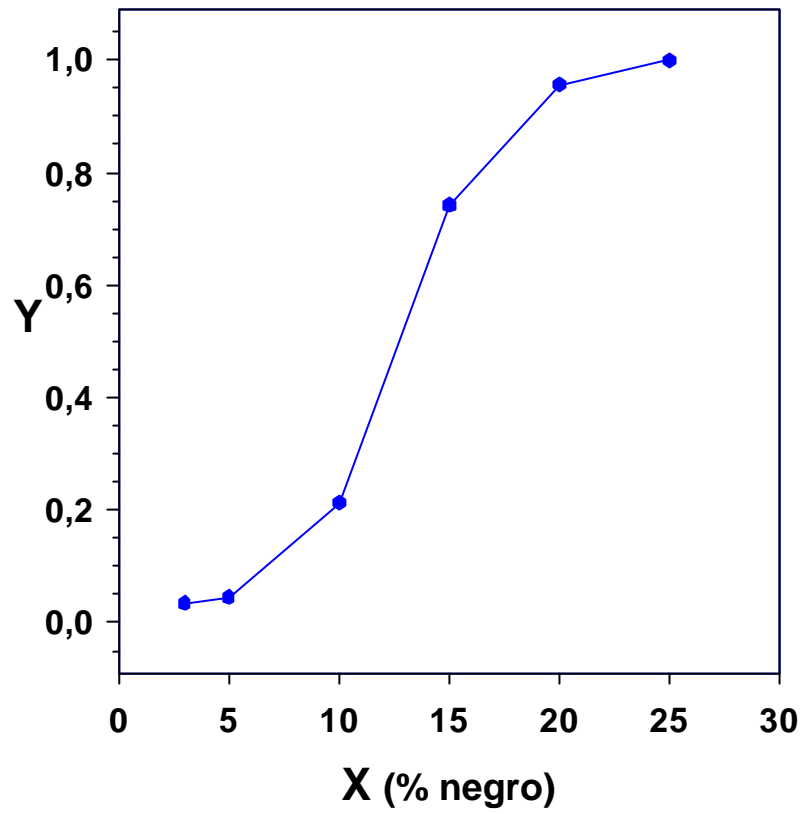


Figura 36. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del total de observadores para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3 m de distancia (12), en función del porcentaje de oscurecimiento.

TAMAÑO 2 T

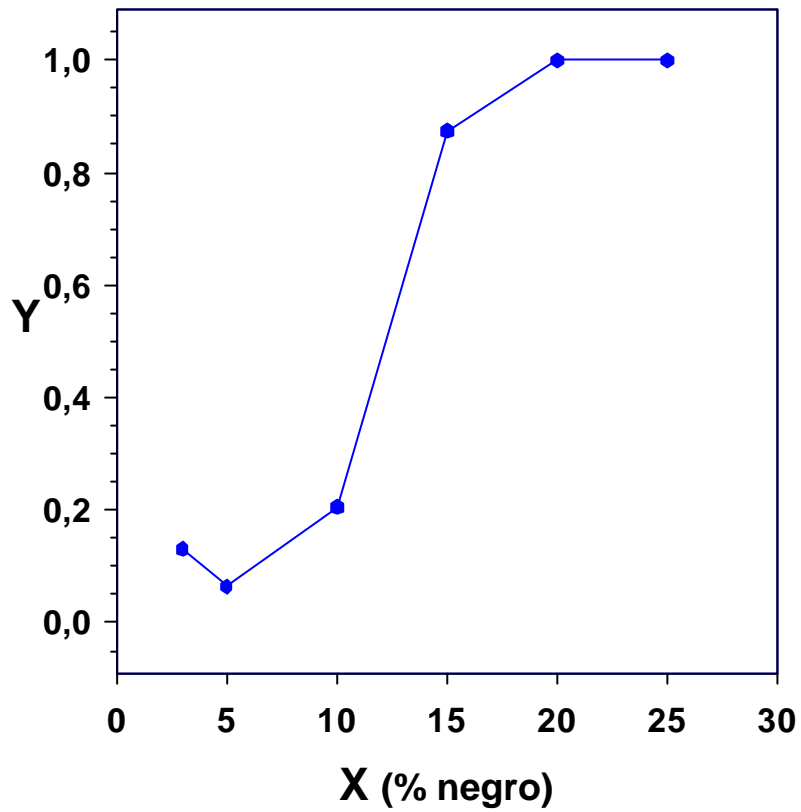


Figura 37. Valores de los juicios “mayor que”, expresados en probabilidades, del total de observadores para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3 m de distancia (25’), en función del porcentaje de oscurecimiento.

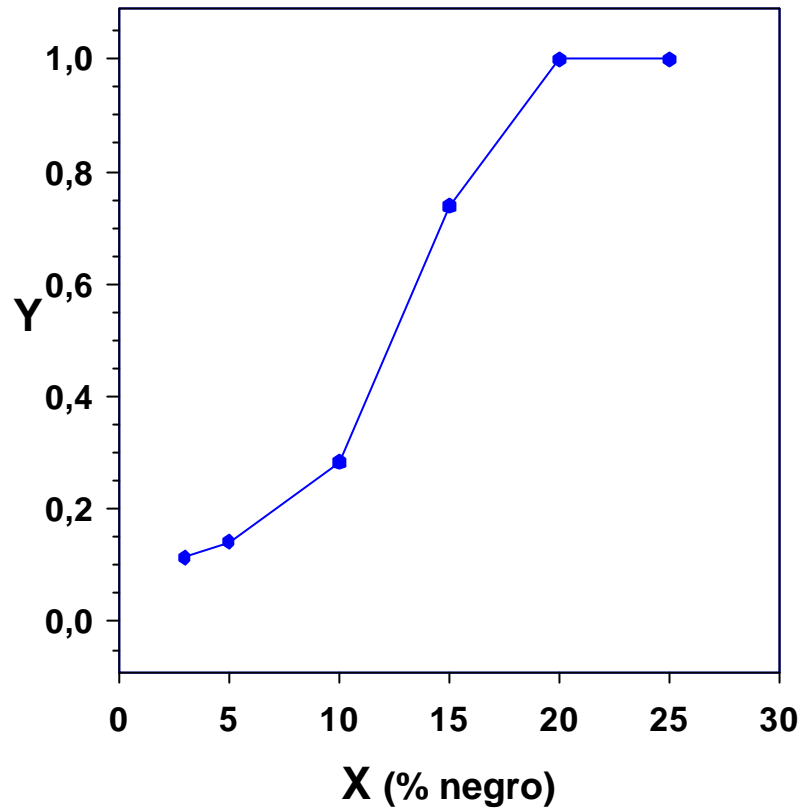


Figura 38. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del total de observadores para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3 m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

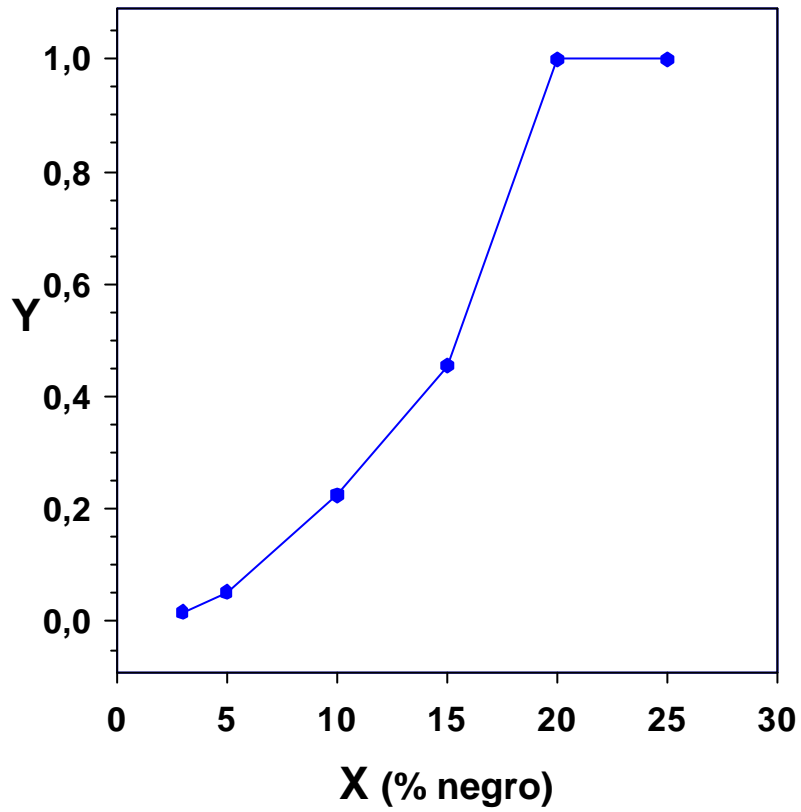


Figura 39. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del total de observadores para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3 m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento.

TAMAÑO 4 T

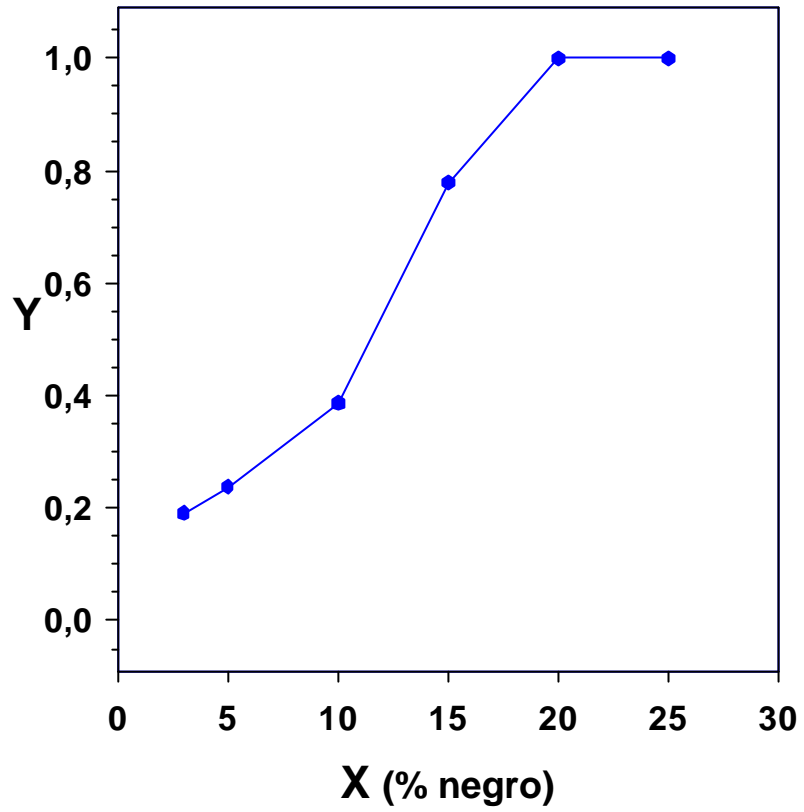


Figura 40. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del total de observadores para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50'), en función del porcentaje de oscurecimiento

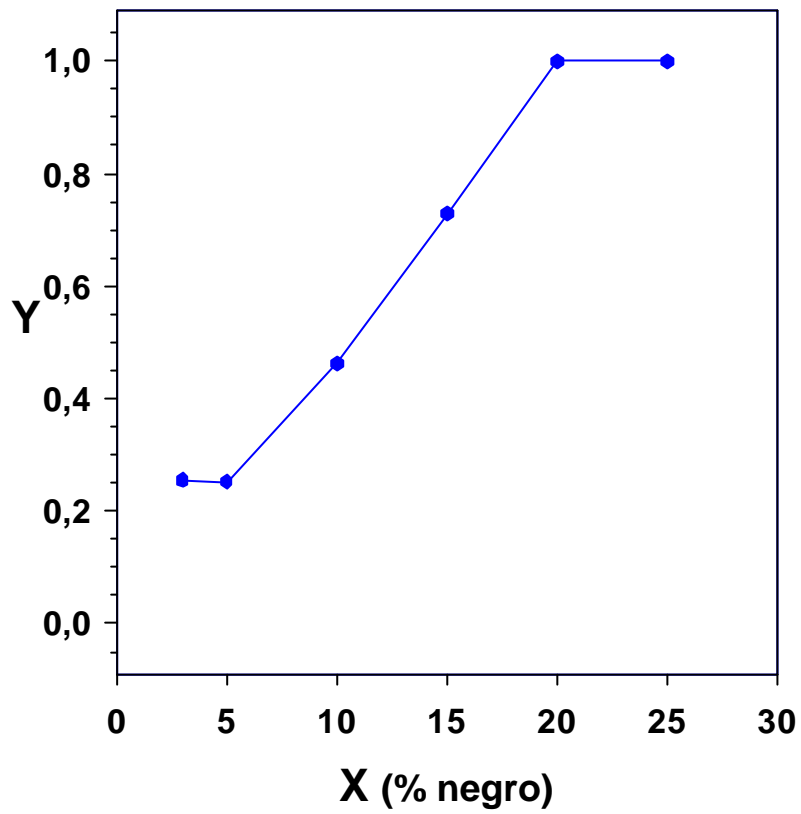


Figura 41. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del total de observadores para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50°), en función del porcentaje de oscurecimiento

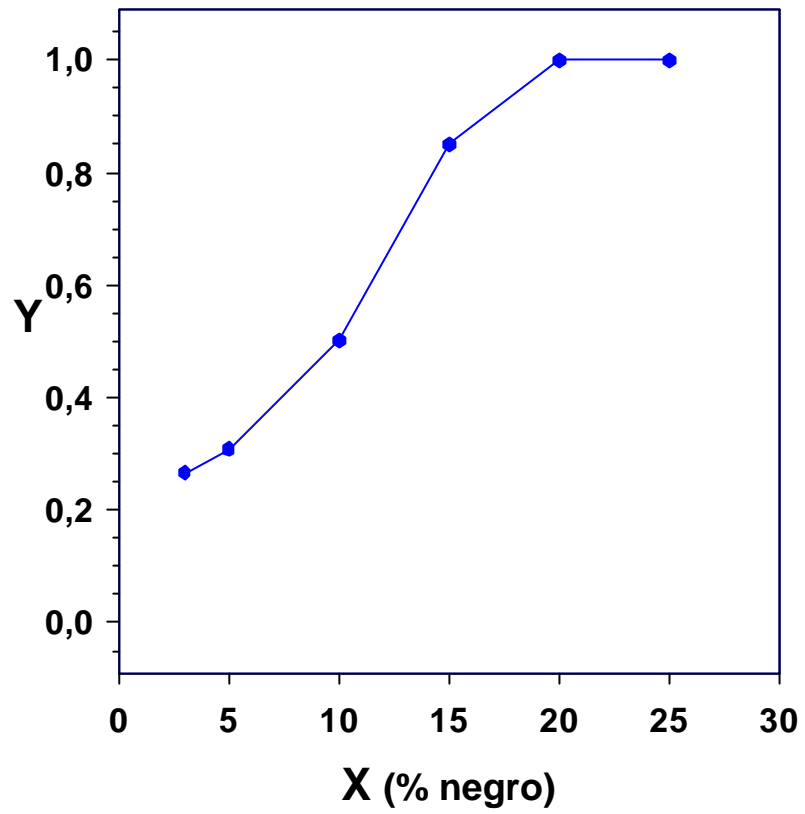


Figura 42. Valores de los juicios "mayor que", expresados en probabilidades, del total de observadores para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50°), en función del porcentaje de oscurecimiento

REPRESENTACIONES GRÁFICAS CON VALORES DE PUNTUACIONES Z AJUSTADOS PARA OBSERVADORES INDEPENDIENTES

OBSERVADOR 1

TAMAÑO T

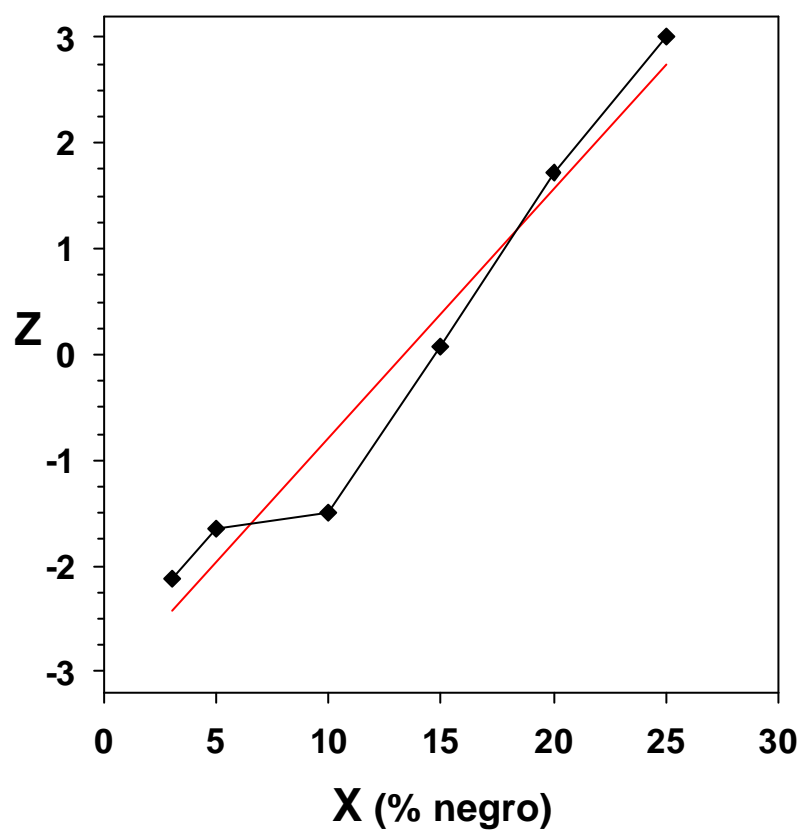


Figura 43. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 1 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

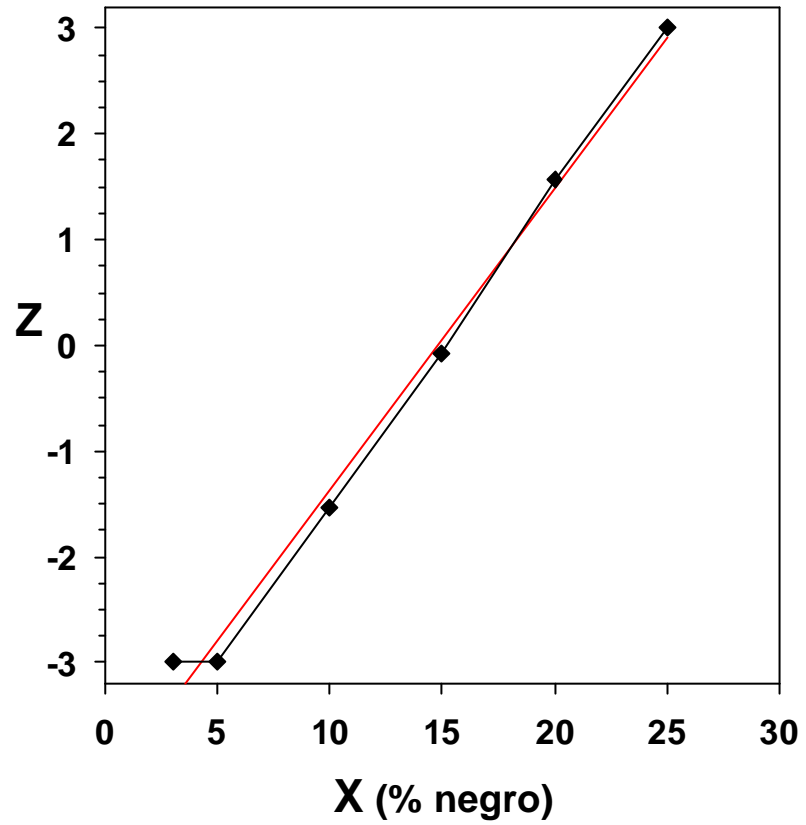


Figura 44. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 1 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión

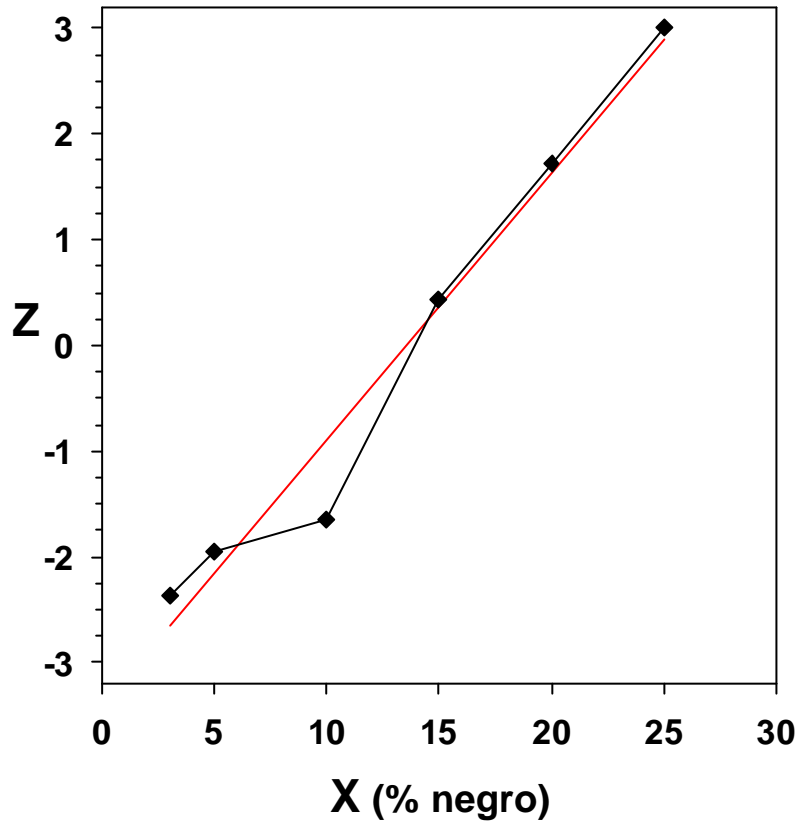


Figura 45. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 1 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

TAMAÑO 2 T

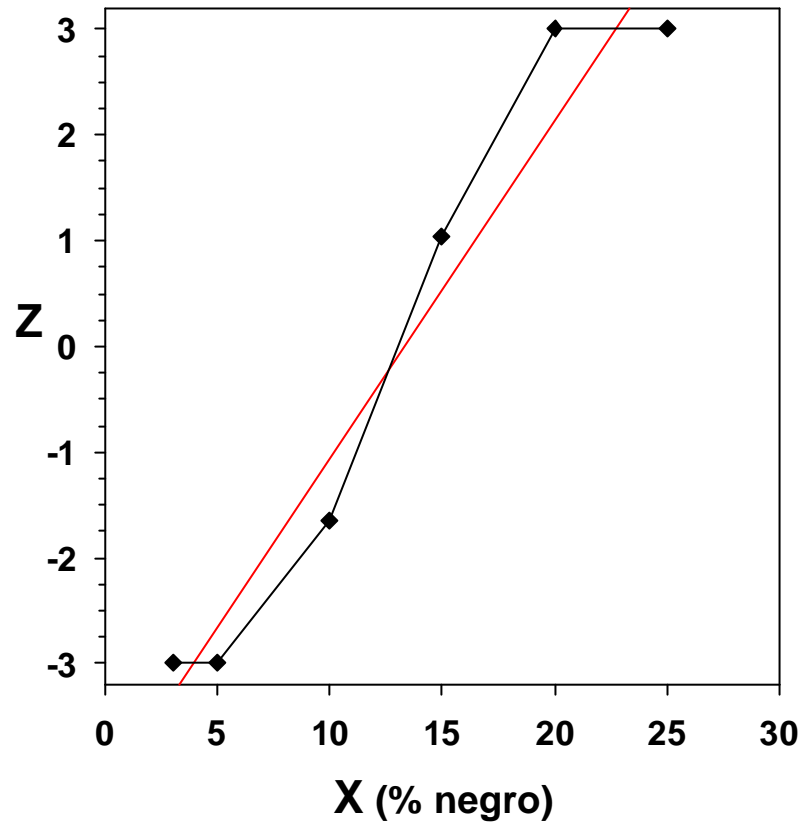


Figura 46. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 1 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

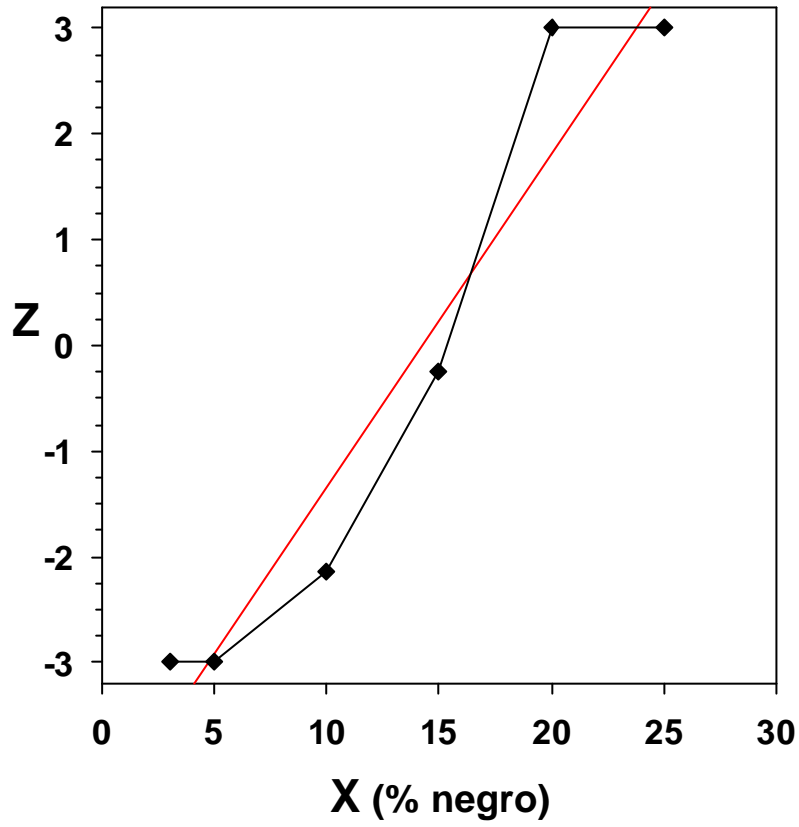


Figura 47. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 1 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3m de distancia (25°), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

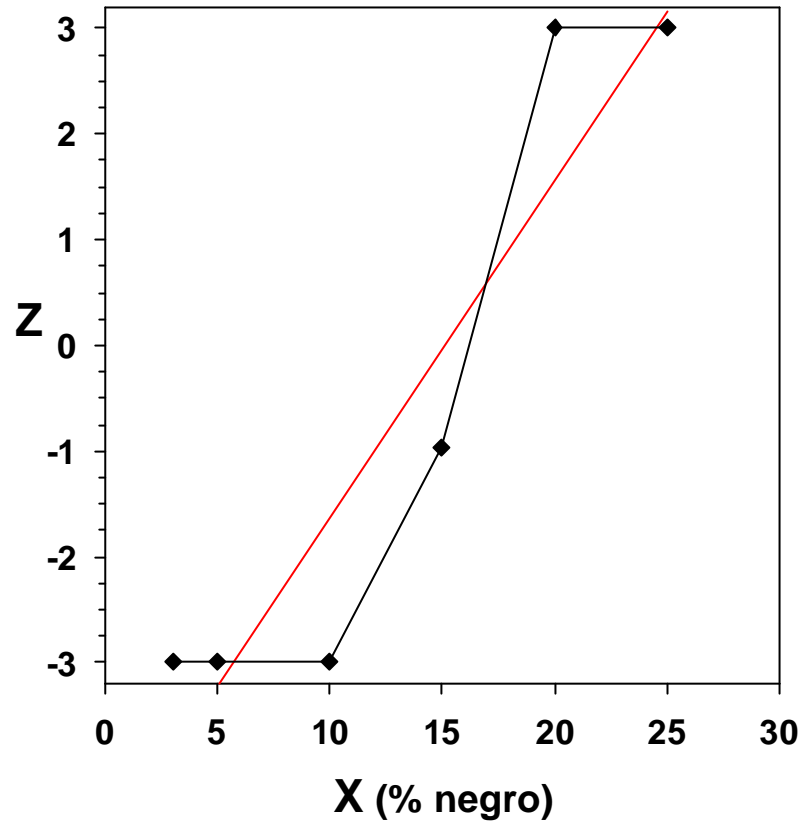


Figura 48. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 1 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3m de distancia (25°), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

TAMAÑO 4 T

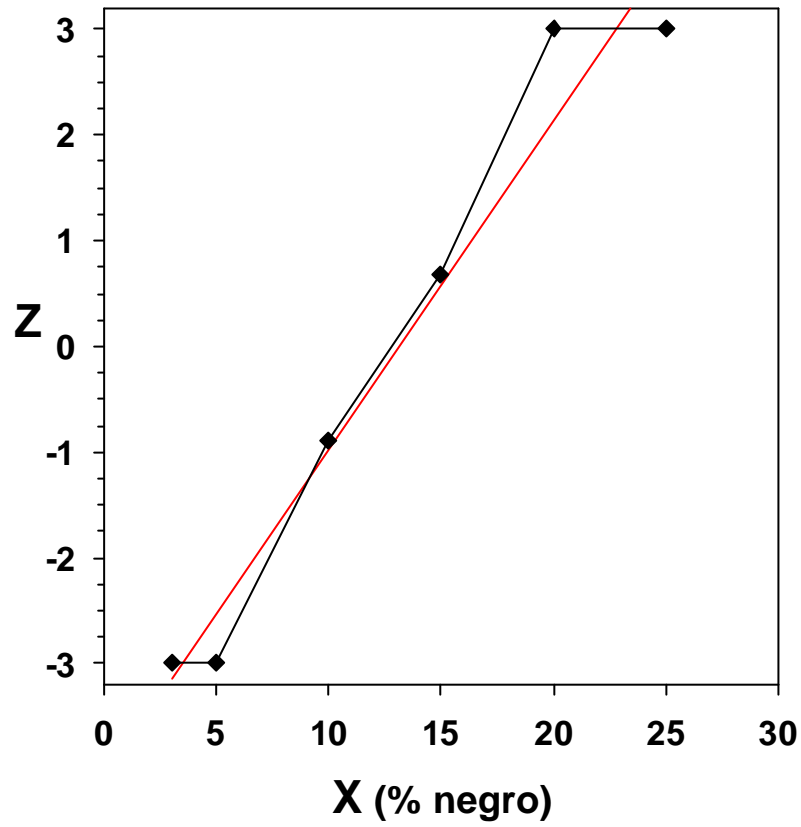


Figura 49. Valores *ajustados* sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 1 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50°), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

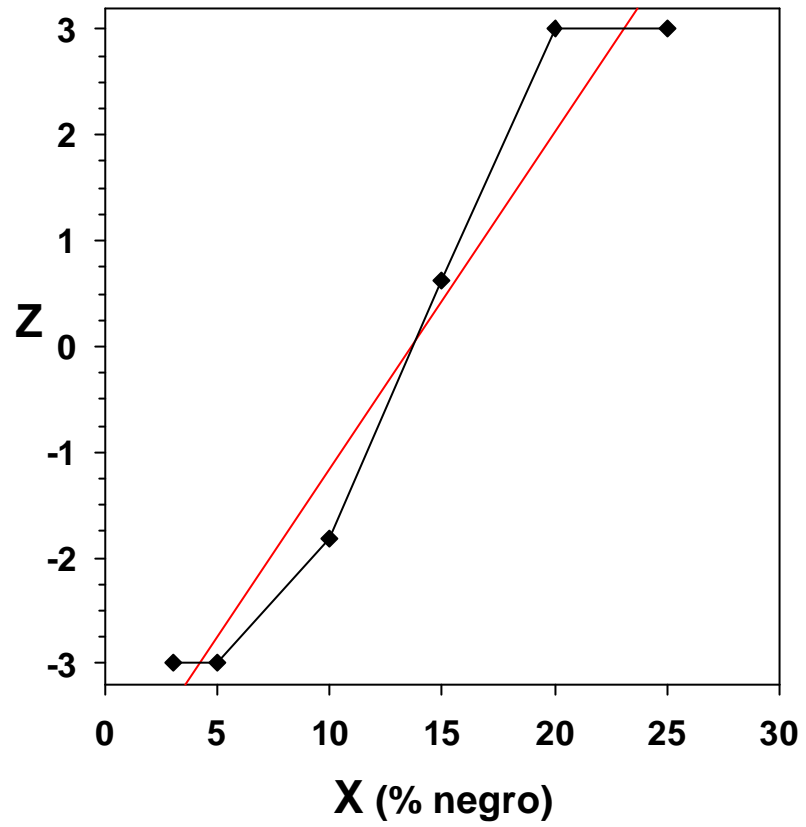


Figura 50. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios "mayor que" en puntuaciones Z del observador 1 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia ($50'$), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

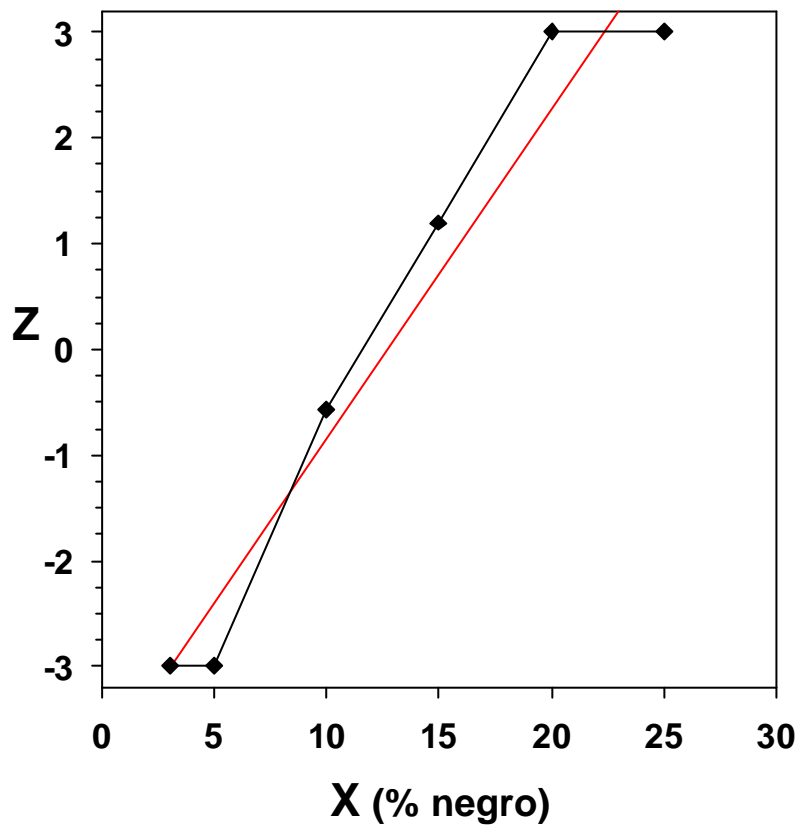


Figura 51. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 1 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50°), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

OBSERVADOR 2

TAMAÑO T

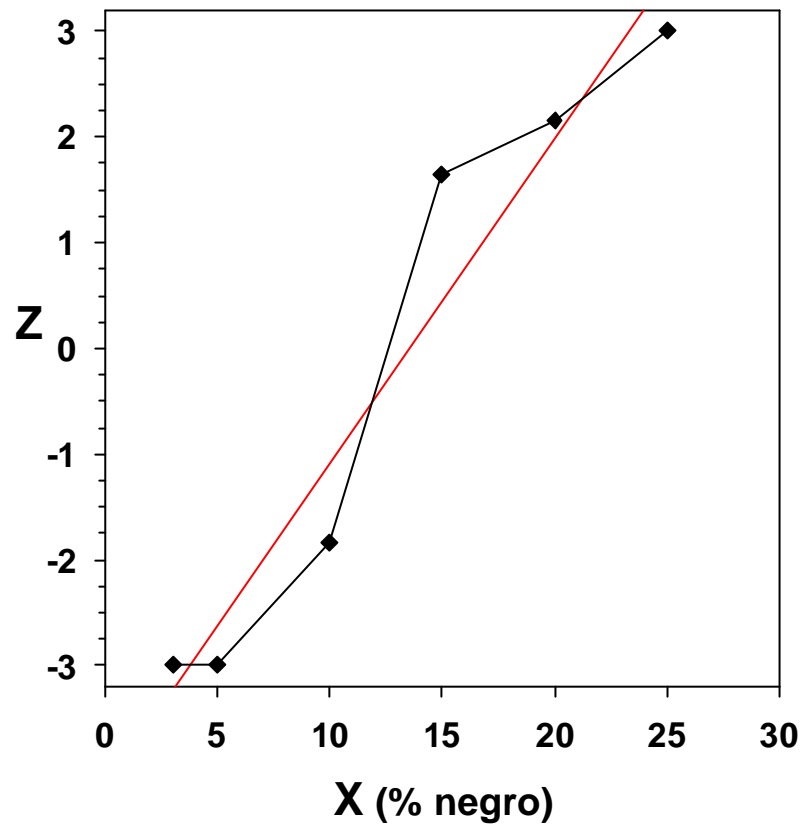


Figura 52. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 2 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

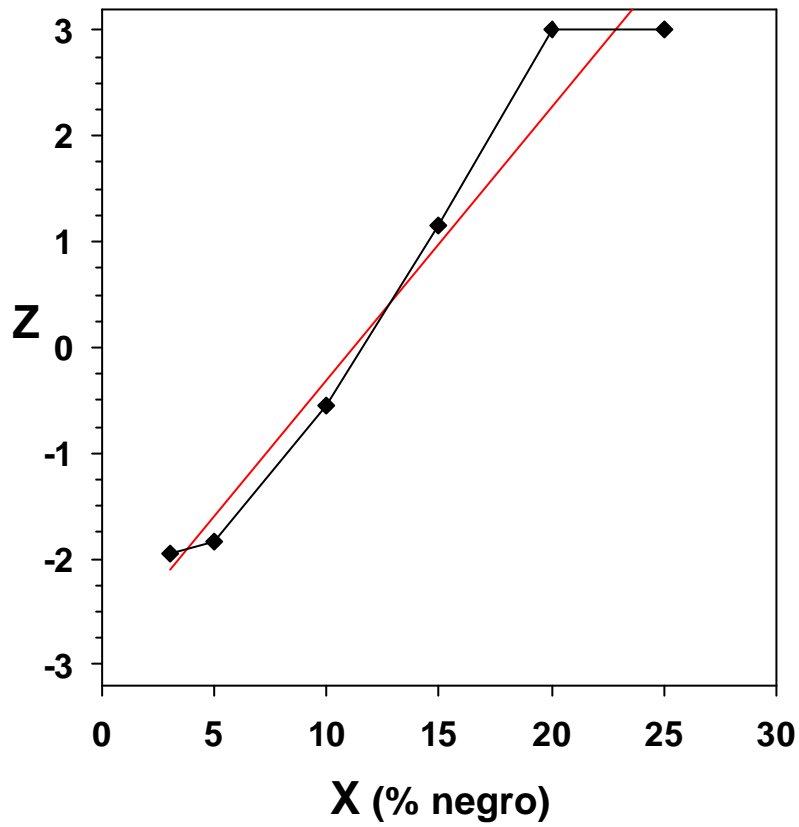


Figura 53. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 2 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3m de distancia (12,5°), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión

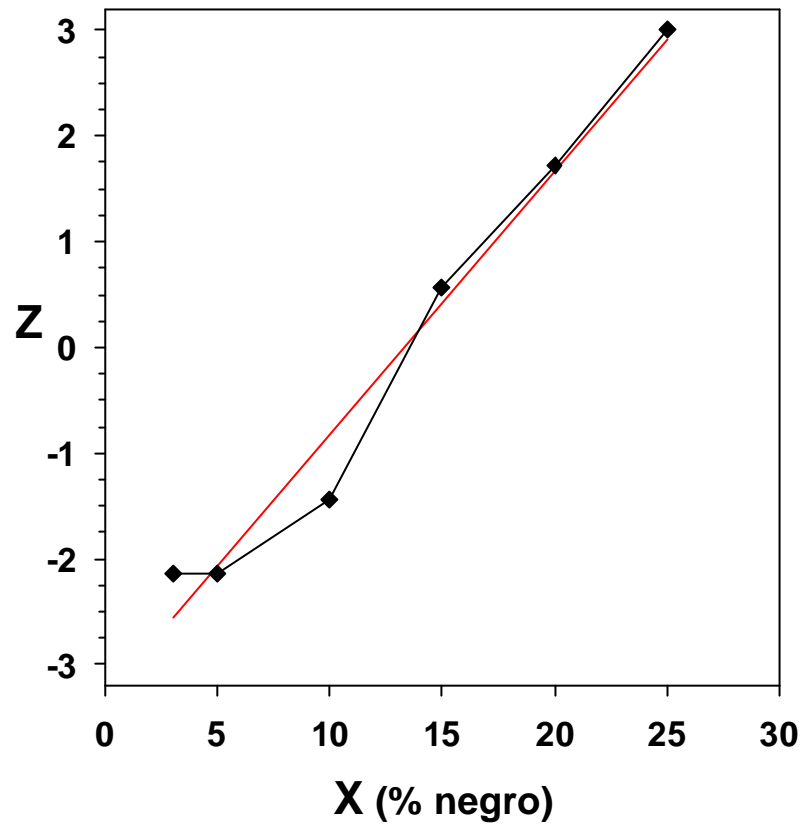


Figura 55. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 2 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3m de distancia (12,5°), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

TAMAÑO 2 T

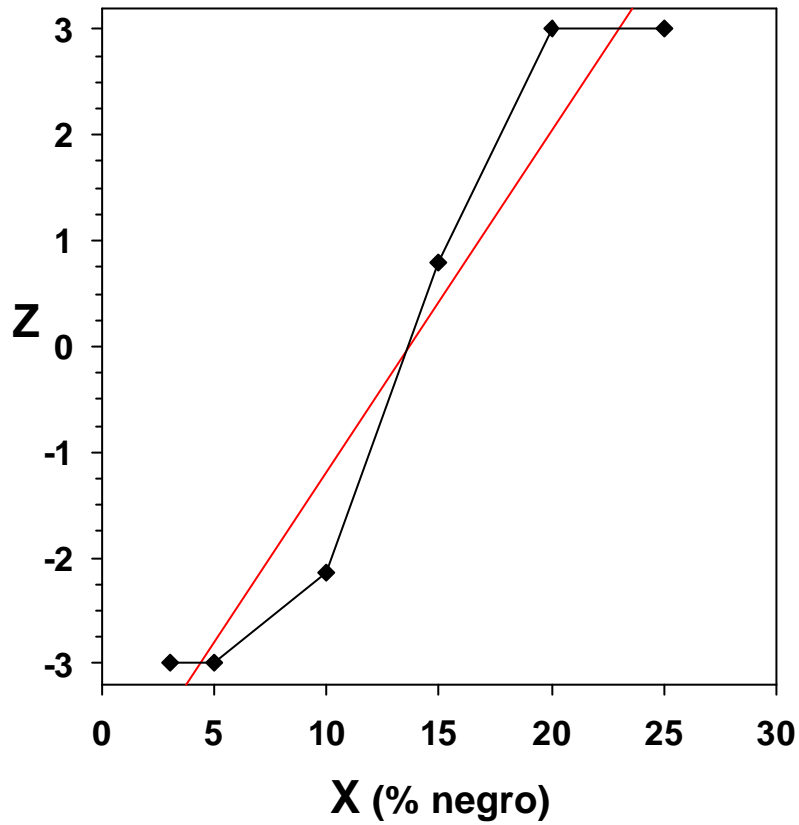


Figura 56. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 2 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

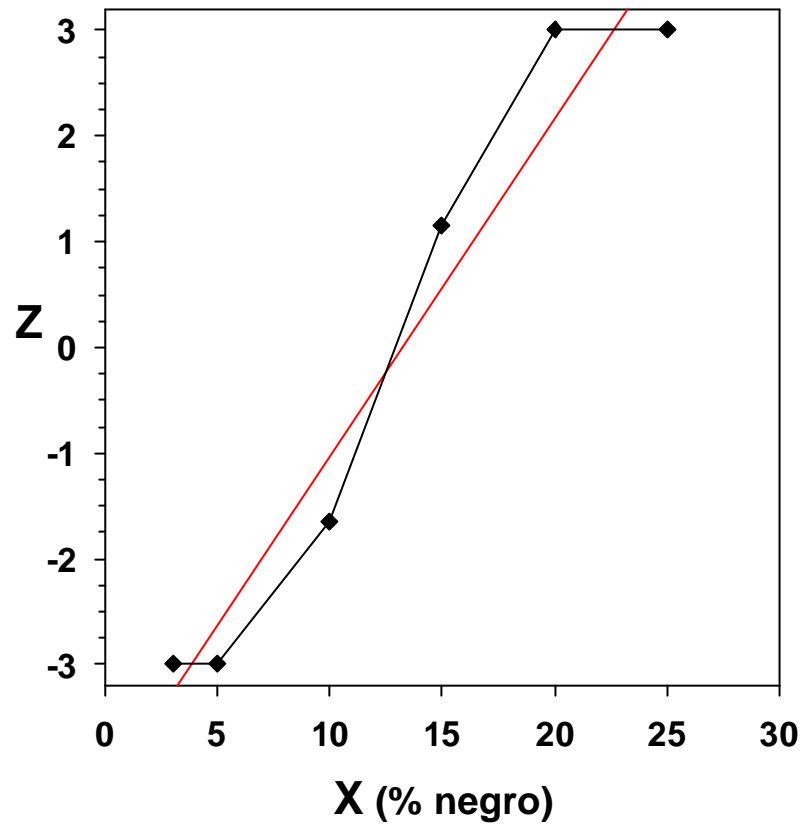


Figura 57. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 2 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3m de distancia (25°), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

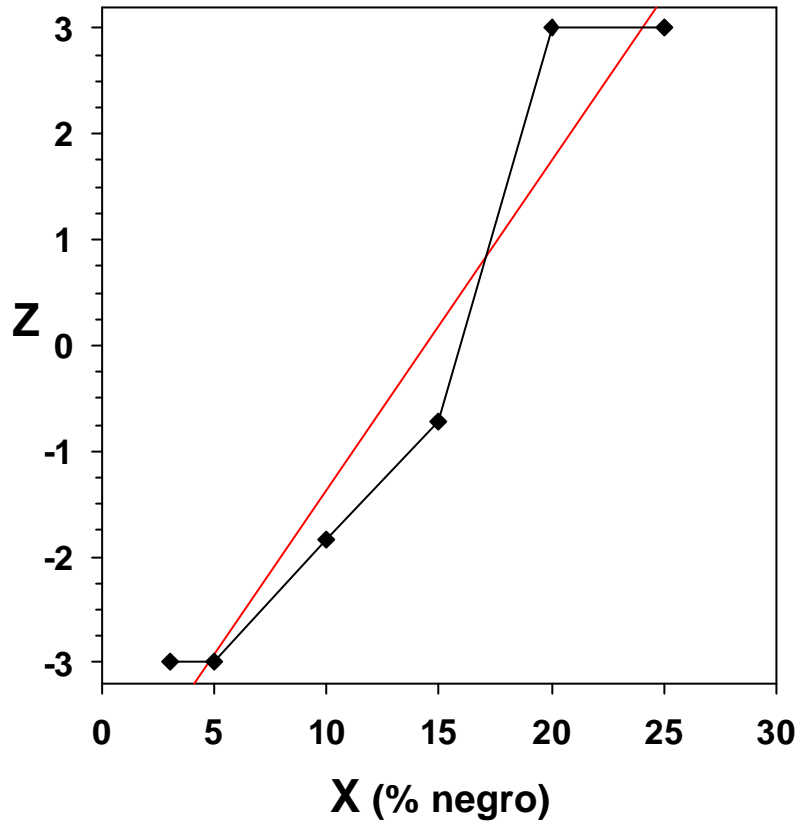


Figura 58. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 2 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

TAMAÑO 4 T

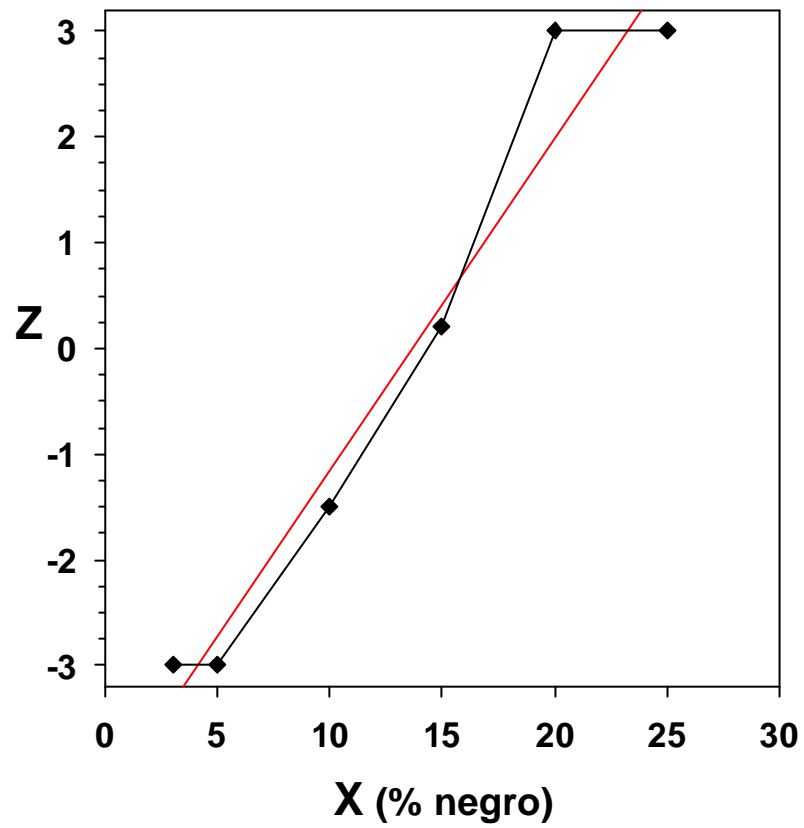


Figura 59. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 2 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

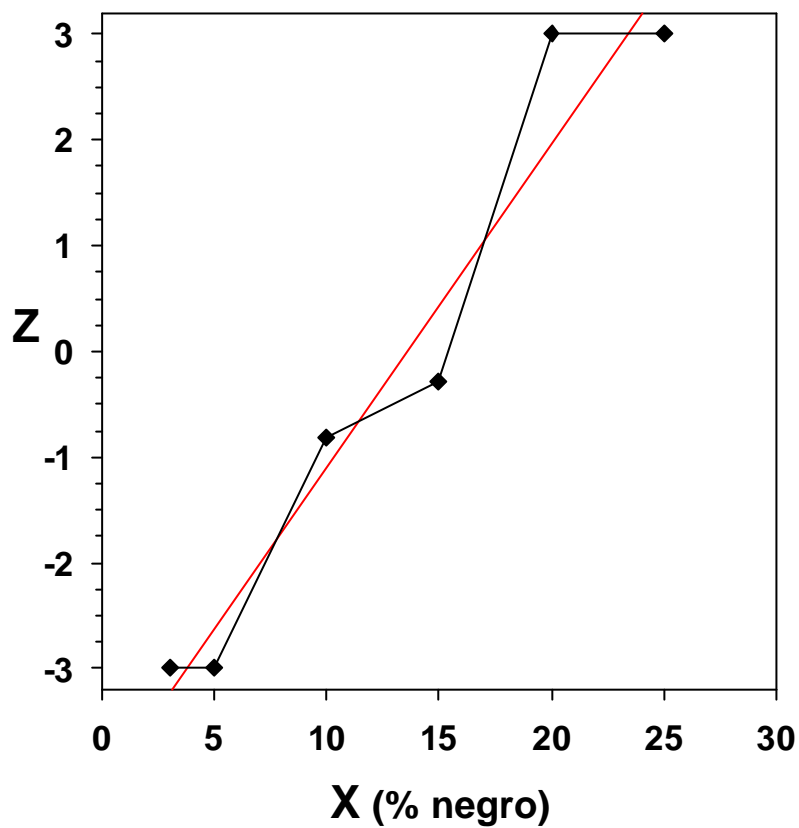


Figura 60. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 2 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50’), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

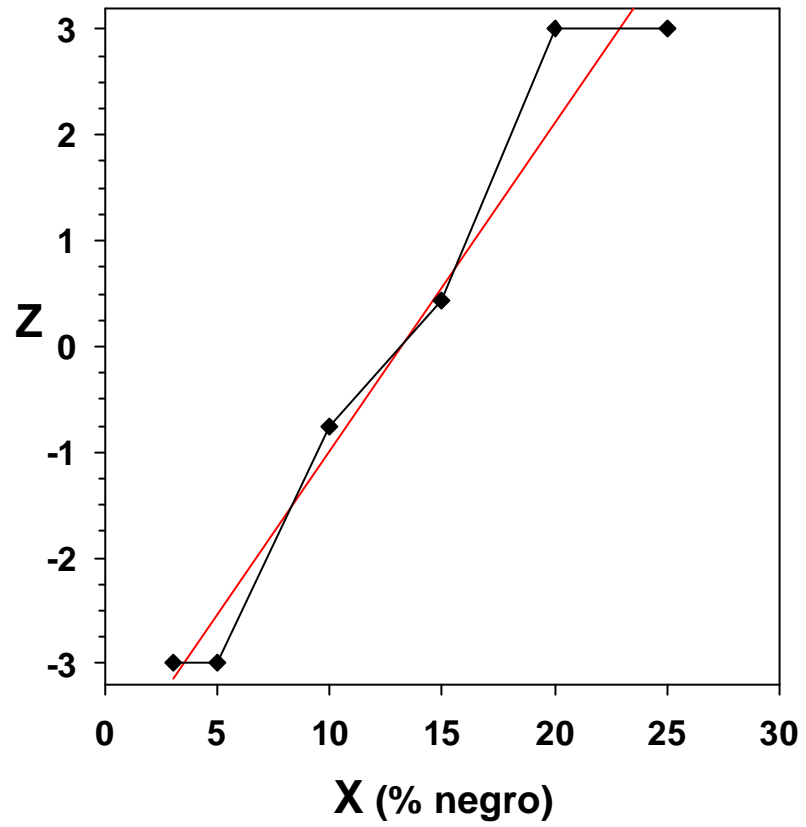


Figura 61. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 2 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 1,5 m de distancia (50'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

OBSERVADOR 3

TAMAÑO T

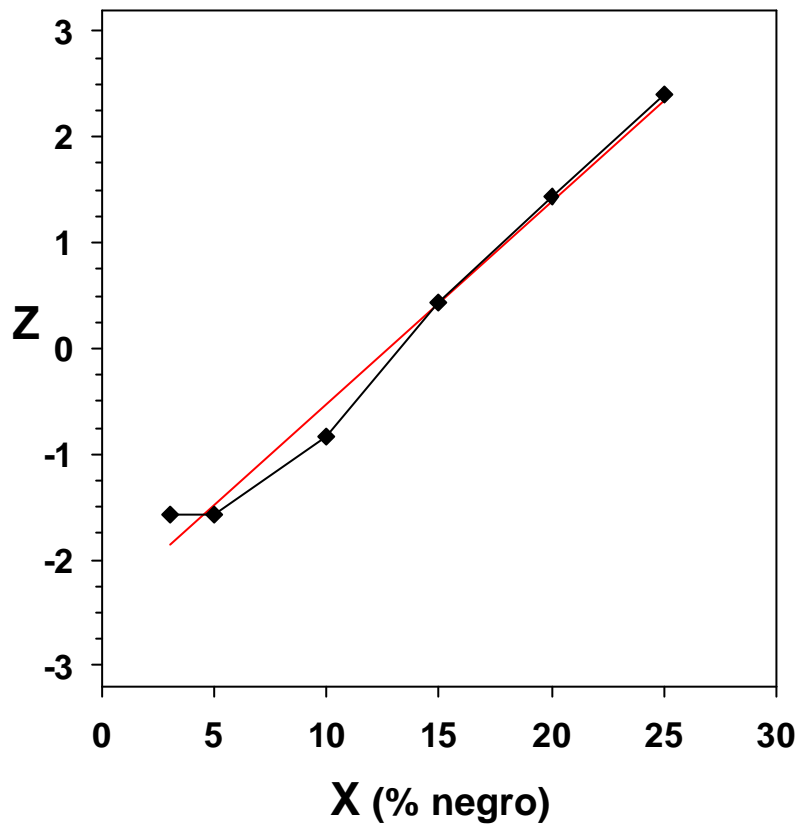


Figura 62. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 3 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

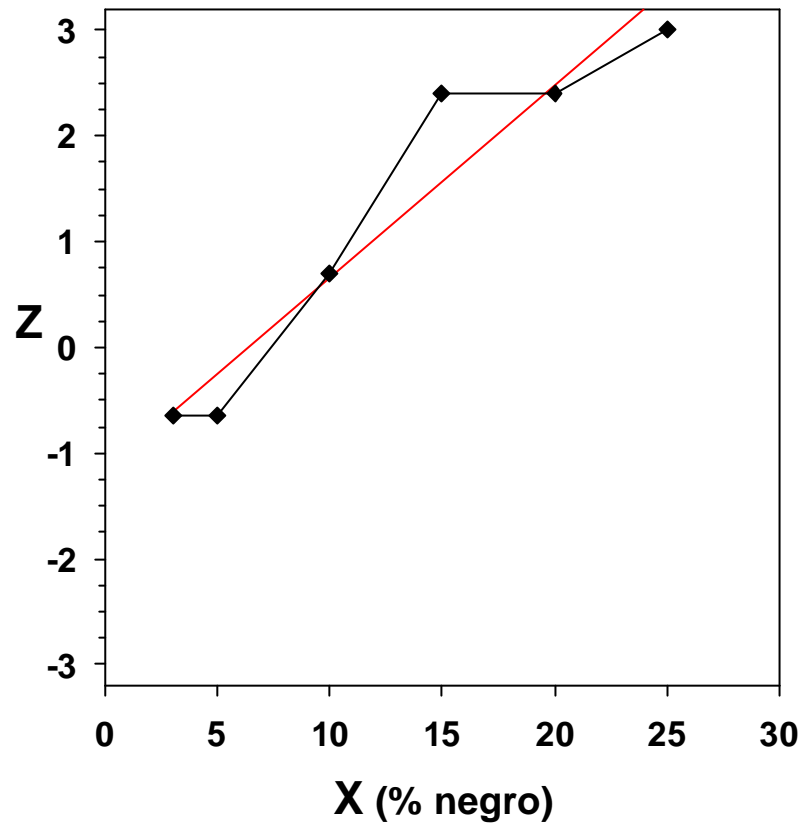


Figura 63. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 3 para una iluminación de 1000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión

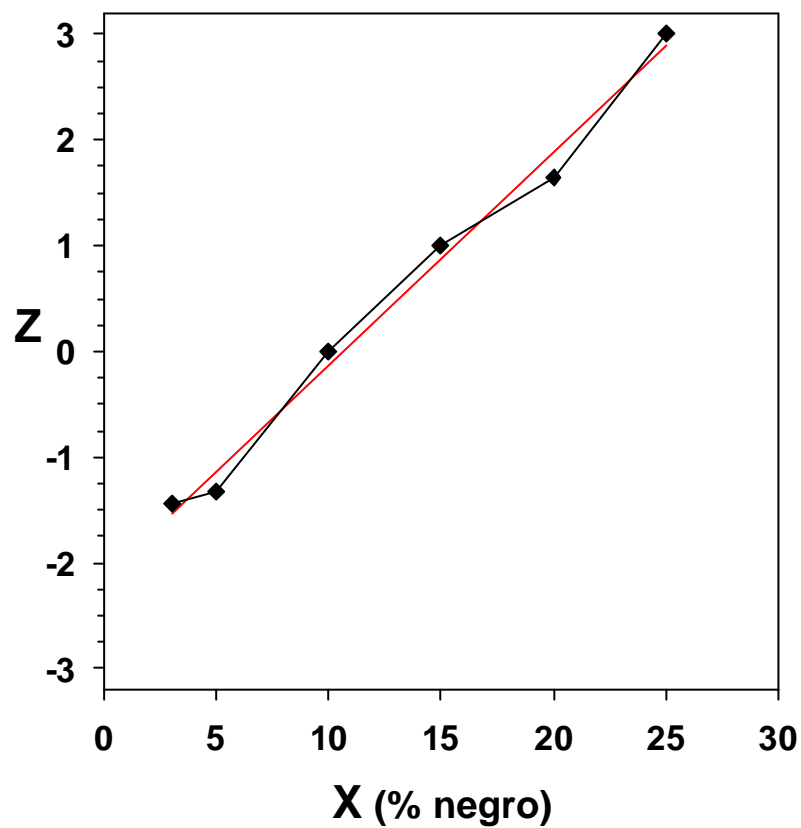


Figura 64. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 3 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 1 cm a 3m de distancia (12,5'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

TAMAÑO 2 T

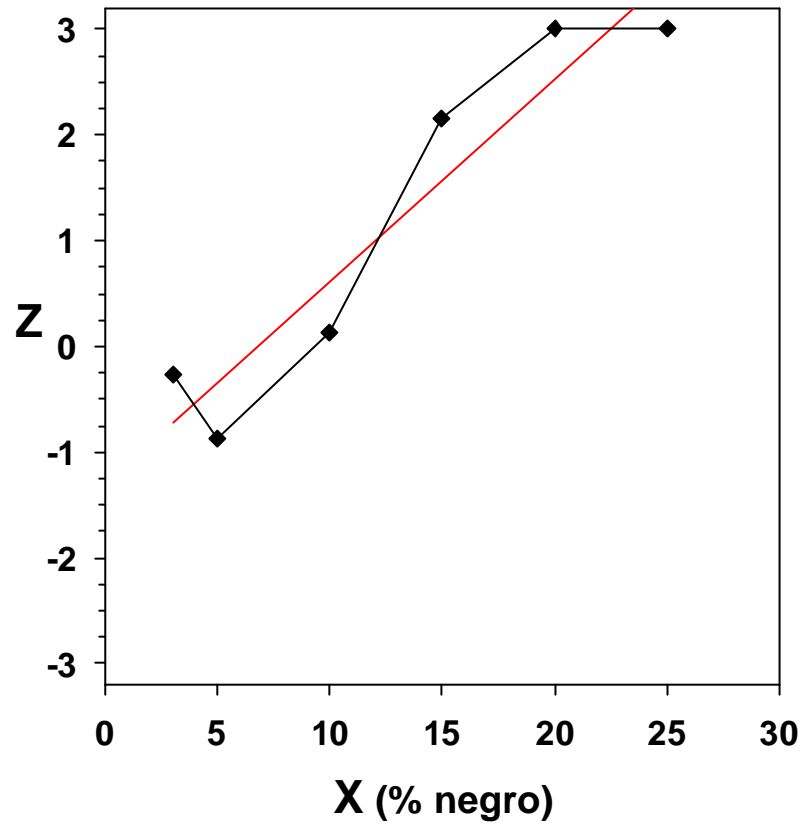


Figura 65. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 3 para una iluminación de 500 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

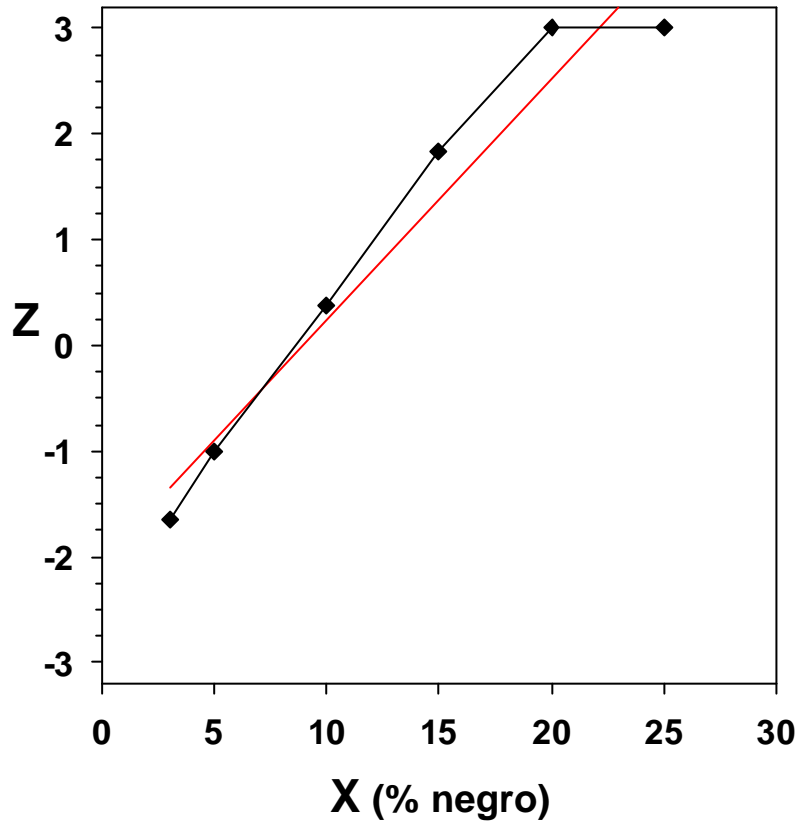


Figura 66. Valores ajustados sobre la recta de regresión de los juicios “mayor que” en puntuaciones Z del observador 3 para una iluminación de 2000 lux y un tamaño de cuadrado de 2 cm a 3m de distancia (25'), en función del porcentaje de oscurecimiento. En rojo recta de regresión.

Apéndice C

DATOS DEL ANÁLISIS DE LA VARIANZA

	<u>G.L</u>	<u>S.C</u>	<u>M.C.</u>	<u>F</u>	<u>sig.</u>
SUJETOS	2	2,775	1,387		
L	2	0,007	0,004	0,674	0,5593
Error	4	0,022	0,006		
T	3	6,363	2,121	21,503	0,0013
Error	6	0,592	0,099		
L*T	6	0,164	0,027	4,749	0,0106
Error	12	0,069	0,006		
E	5	19,915	3,983	28,912	0,000
Error	10	1,378	0,138		
L*E	10	0,114	0,011	3,089	0,0152
Error	20	0,074	0,004		
T*E	15	3,710	0,247	5,989	0,0000
Error	30	1,239	0,041		
L*T*E	30	0,206	0,007	1,097	0,3715
Error	60	0,375	0,006		

MEDIAS DE L

L1	0,6301
L2	0,6325
L3	0,6190

MEDIAS DE T

T	0,4885
2T	0,5081
4T	0,5961
8T	0,9161

MEDIAS DE L*T

L1	T	0,5100
L1	2T	0,5378
L1	4T	0,5800
L1	8T	0,8928
L2	T	0,4922
L2	2T	0,5394
L2	4T	0,5761
L2	8T	0,9222
L3	T	0,4633
L3	2T	0,4472
L3	4T	0,6322
L3	8T	0,9333

MEDIAS DE E

E1	0,2431	E4	0,7642
E2	0,3089	E5	0,9789
E3	0,4706	E6	0,9978