



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

"ANISOTROPIA EN LA ILUSION DE HERMANN".

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
B I O L O G O
P R E S E N T A :
VICTOR HUGO DE LAFUENTE FLORES

DIRECTOR DE TESIS: DR. OCTAVIO RUIZ DE LEON



MEXICO, D. F.



2002

300178

FACULTAD DE CIENCIAS SECCION ESCOLAR



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

M. EN C. ELENA DE OTEYZA DE OTEYZA
Jefa de la División de Estudios Profesionales de la
Facultad de Ciencias
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:

"Anisotropía en la ilusión de Hermann"

realizado por **Victor Hugo De Lafuente Flores**
con número de cuenta **9559945-0**, quién cubrió los créditos de la carrera de **Biología**

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis	Dr. Octavio Ruiz de León
Propietario	Dr. Ramulfo Romo Trujillo
Propietario	Dra. Hortensia González Gómez
Suplente	Dr. Julio Prieto Sagredo
Suplente	Dr. Alfonso Vilchis Peluyera

Consejo Departamental de **Biología**

Dra. Patricia Ramos Morales

FACULTAD DE CIENCIAS
U N A M.



DEPARTAMENTO
DE BIOLOGIA

Este trabajo se realizó bajo la dirección del Dr. Octavio Ruiz de León, en el Departamento de Fisiología, Biofísica y Neurociencias del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del I.P.N.

A mis padres y a mis hermanos.

Agradezco a Jazmín, Adrián, Marlene, Alejandro y Lizette por su participación en los experimentos psicofísicos. Julio Antonio de Lafuente, además de participar en los experimentos, realizó el dibujo del sistema experimental utilizado en el trabajo (figura 16). Reconozco de manera especial la ayuda, los comentarios y sugerencias que Valentina Islas aportó en las distintas etapas del trabajo. Agradezco la tutoría de Octavio Ruiz, con quien siempre estaré en deuda.

Índice

	página
I. Resumen	1
II. Introducción	2
II.1 Campos receptivos centro-periferia (CRcp) de las células ganglionares retinianas	2
II.2 La ilusión de Hermann y los CRcp	5
II.3 Planteamiento del problema	9
III.1 Objetivo general	10
III.2 Objetivos particulares	10
IV. Métodos y resultados	11
IV.1 Estimación subjetiva de la ilusión	11
IV.1.1 Métodos	11
IV.1.2 Resultados	12
IV.1.3 Discusión	14
IV.2 Estimación de la ilusión por cancelación activa	14
IV.2.1 Métodos	14
Programa de computadora	15
Perfil de luminancia de las áreas de cancelación (AC) según la excentricidad	17
Forma y tamaño de las AC	17
Características de la trama de Hermann	18
Condiciones experimentales	18
Protocolo de estimación de la ilusión por cancelación activa	29
IV.2.2 Resultados	20
IV.2.3 Discusión	21
IV.3 Medición mediante la técnica de cancelación con respuesta forzada	21
IV.3.1 Métodos	21
Experimento control	23
IV.3.2 Resultados	24
La intensidad de las ilusiones a 0° y 45° de inclinación	25
Pruebas estadísticas	28
V. Discusión general	30
V.1 Posibles explicaciones a la anisotropía de la ilusión	30
Los errores de refracción en el ojo	30
La estructura de los CRcp retinianos	30
El núcleo lateral geniculado	32
La corteza visual primaria	32
V.2 El origen de la ilusión y su anisotropía. Implicaciones para los modelos actuales de percepción.	33
VI. Conclusiones.	34
APÉNDICE I. Estructura y fisiología de la retina	35
APÉNDICE II. Diseño del programa de computadora	38
APÉNDICE III. Calibración del monitor	40
APÉNDICE IV. Pruebas de agudeza visual	41
VII. Bibliografía citada	43

I. Resumen

Además del atractivo intrínseco de las ilusiones visuales, el interés en ellas nace de la posibilidad de que su estudio ayude en la comprensión de los mecanismos de percepción. Un requisito fundamental para el estudio de las ilusiones es contar con caracterizaciones cuantitativas de estos fenómenos. En este trabajo desarrollamos un método de estimación para la intensidad de la ilusión de Hermann. La ilusión de Hermann consiste en la percepción de manchas oscuras en las intersecciones de franjas blancas horizontales y verticales colocadas sobre un fondo negro. El método consistió en determinar la cantidad de luz necesaria para desaparecer las sombras ilusorias en las intersecciones de la trama. De esta manera, la intensidad de la ilusión de Hermann se estimó mediante la cantidad de luz necesaria para cancelar la ilusión. El método de estimación, integrado por una combinación de la técnica de cancelación con un protocolo de respuestas forzadas de dos alternativas, se utilizó para estudiar un fenómeno intrigante de anisotropía en la percepción de la ilusión de Hermann: cuando las franjas de la trama -comúnmente presentadas en orientación horizontal-vertical- se inclinan unos 45° grados, la intensidad de la ilusión parece reducirse. Para obtener una estimación cuantitativa de la sensibilidad a la orientación se midió la intensidad de la ilusión cuando las franjas presentan orientación horizontal-vertical y cuando se presentan en orientación diagonal. Los resultados demuestran que al inclinar la trama la ilusión se reduce entre 60-70% con respecto a su intensidad en orientación cardinal (horizontal-vertical). Estos resultados no concuerdan con la explicación actual de la ilusión de Hermann que propone que ésta se genera por la acción de los campos receptivos centro-periferia de las células ganglionares de la retina. Se propone la influencia de estructuras de procesamiento visual localizadas en la corteza cerebral como posible origen de la percepción anisotrópica de la ilusión.

II. Introducción

Las ilusiones visuales son fenómenos que resultan atractivos por sí mismos (p. ej. Wade, 1978). Sin embargo, más allá de la curiosidad que provocan, el interés en ellas nace de la posibilidad de que su estudio aporte información sobre la organización y funcionamiento del sistema visual (Adelson, 2000).

Se ha propuesto que el primer arreglo neuronal involucrado en el procesamiento de la información visual son los campos receptivos centro-periferia (CRcp) de las células ganglionares de la retina (Lindsay y Norman, 1972; Anderson, 1995). Los CRcp son un concepto fundamental en la fisiología de la visión y se considera que realizan la primera transformación de la información en el procesamiento visual (Kuffler, 1956; Reid, 1999; Dacey *et al*, 2000). En el sentido matemático, se ha pensado en ellos como el primer operador del sistema visual (Linsker, 1986; Grossberg y Todorovic, 1988; Henry *et al*, 1994). La percepción del contraste, discriminación de la orientación, capacidad de resolución y sensibilidad a la luz (Leventhall y Schall, 1983; Hirsch y Curcio, 1989; McIlwain, 1996), son procesos que se han relacionado con los CRcp de las células ganglionares de la retina.

La ilusión de Hermann (Fig. 6) se ha considerado como una consecuencia de la inhibición lateral y el funcionamiento de los CRcp (Baumgartner, 1990). Sin embargo, la intensidad de la ilusión de Hermann parece variar con la orientación en que se presenta la trama (Fig. 8, ver también Spillmann, 1994). En este trabajo se estudia de manera cuantitativa la dependencia a la orientación de la ilusión de Hermann y algunas de sus variantes. Los resultados ponen en duda la explicación de la ilusión mediante los CRcp retinianos. Se discuten explicaciones alternativas y sus consecuencias en los modelos de procesamiento visual.

II.1 Campos receptivos centro-periferia (CRcp) de las células ganglionares de la retina

Las células que componen la retina de los vertebrados están organizadas en capas (Fig. 1). Los patrones de energía luminosa son transducidos a cambios eléctricos mediante los receptores (conos y bastones), los cuales forman la capa más externa de la retina. Este patrón de actividad eléctrica se transmite a las células ganglionares (capa interna) mediante las células bipolares (transmisión vertical) y las células horizontales y amácrinas (transmisión horizontal). De esta forma, en la retina la información de muchos receptores converge en una célula ganglionar (con excepción de un área de unos 0.25 mm² de la fovea, donde cada receptor está conectado a una sola célula ganglionar mediante una célula bipolar).

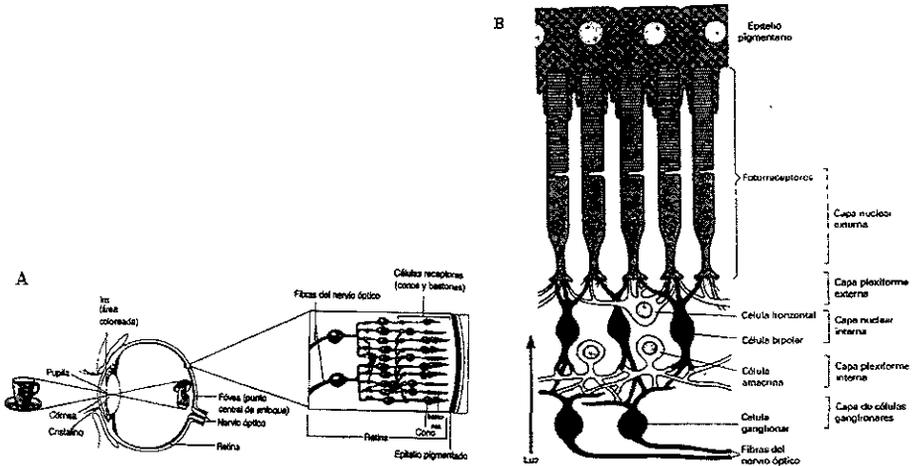


Figura 1. (A) Estructuras del ojo y disposición de las células que forman la retina de los seres humanos (Goldstein, 1999). (B) Los patrones de luminosidad son transducidos a señales eléctricas por los fotorreceptores. Esta información es transmitida de las capas externas a las internas mediante las células bipolares y de manera lateral por las células horizontales y amácrinas, convergiendo finalmente en las células ganglionares cuyos axones forman el nervio óptico (Randall *et al*, 1998).

El campo receptivo de una célula se define como el área de la retina que al ser estimulada con luz produce cambios en la actividad eléctrica de la célula. En la figura 2 se esquematiza el campo receptivo una célula bipolar que podría formar a su vez el campo receptivo de una célula ganglionar (Fig. 1).

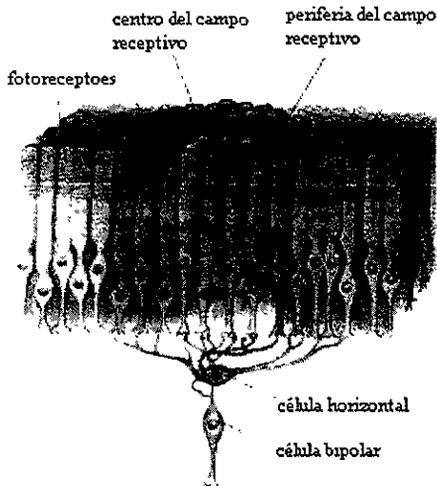


Figura 2. Campo receptivo de una célula bipolar de la retina. Las células bipolares reciben entradas directas de información de un grupo de receptores que constituyen el centro su campo receptivo. Además

reciben entradas indirectas de receptores que rodean el centro, mediadas por las células horizontales (modificado de Bear *et al*, 1996).

Los estudios de S. W. Kuffler (1953) sobre las propiedades de los campos receptivos de las células ganglionares de la retina del gato mostraron que, además de que existen dos tipos de células ganglionares ("on", que incrementan su tasa de disparo y "off" que la disminuyen al ser estimuladas con luz), sus campos receptivos están divididos en dos regiones: una central y otra periférica que la rodea formando un anillo. La respuesta que produce la estimulación separada de estas áreas es antagonica, fenómeno que se conoce como inhibición lateral (Fig. 3). Cuando la luz que incide en el centro incrementa la tasa de disparo de la célula ganglionar y la luz que incide en la periferia la disminuye, se dice que dicha célula posee un campo receptivo centro-on periferia-off ó centro-excitatorio periferia-inhibitoria. Cuando la estimulación del centro del campo receptivo produce un decremento en la tasa basal de disparo de la célula ganglionar y la estimulación de la periferia un incremento, se dice que la célula ganglionar posee campo receptivo centro-off periferia-on (Fig. 3 A).

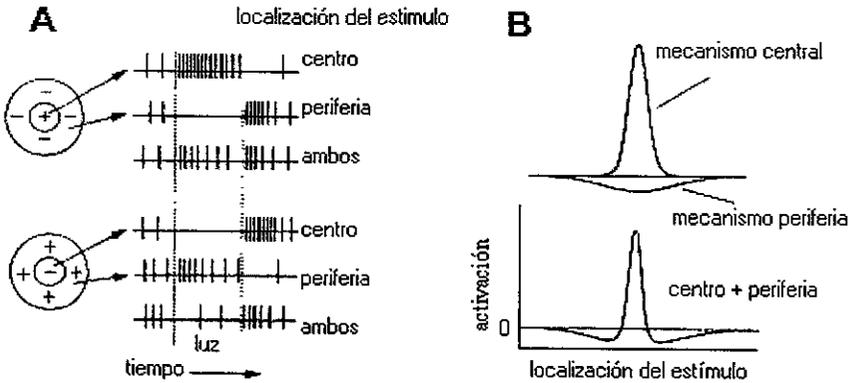


Figura 3. (A) Dos tipos de CRcp de las células ganglionares de la retina. Arriba: centro-"on", periferia-"off". Abajo: centro-"off", periferia-"on". Los trazos de cada renglón muestran el efecto sobre la frecuencia de disparo que produce la estimulación del centro, la periferia o ambos al mismo tiempo. (B) Desde un punto de vista formal, las respuestas de las células ganglionares pueden reproducirse utilizando un modelo de diferencia de gaussianas. La influencia de la estimulación sobre la tasa de disparo esta representada por la altura de la curva (modificado de McIlwain, 1996).

En la vía visual principal, la información sale de la retina por los axones de las células ganglionares, que forman el nervio óptico, hasta el núcleo geniculado lateral (NGL) que proyecta axones, a su vez, hasta la corteza visual (Fig. 4).

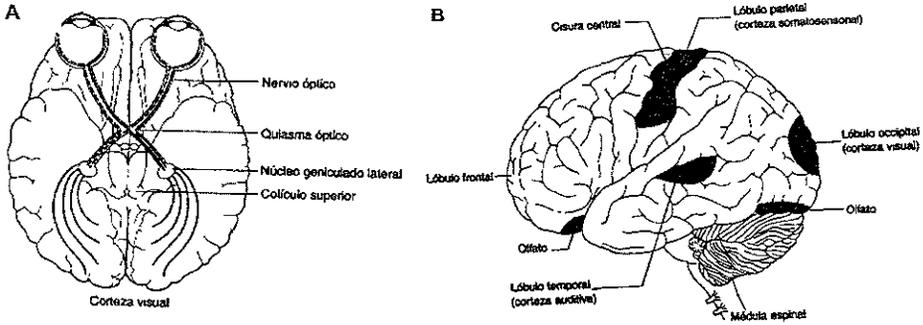


Figura 4. (A) Vía principal del sistema visual de los primates. Los axones de las células ganglionares (nervio óptico) conducen la información visual desde la retina hasta el núcleo geniculado lateral que, a su vez, envía axones hasta la corteza visual. (B) Localización de la corteza visual en relación con otras áreas sensoriales y motoras (Goldstein, 1999).

II.2 La ilusión de Hermann y los CRcp

Cuando se observa una trama de franjas negras sobre un fondo blanco se perciben manchas claras en las intersecciones de las franjas (Fig. 5). Estas manchas son de naturaleza ilusoria porque la intensidad luminosa a lo largo de las franjas es homogénea. Este fenómeno, observado por W. Selwyn a principios de la década de 1840, fue reportado por Sir David Brewster en 1844 en el decimocuarto Congreso de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia.

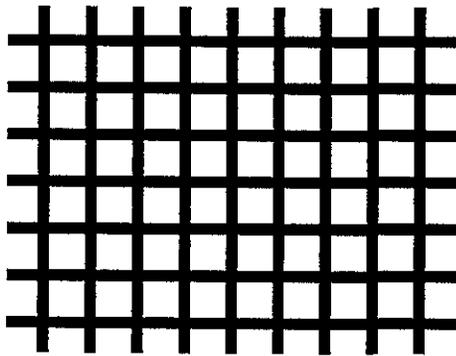


Figura 5. En las intersecciones de las franjas negras se perciben manchas blancas. Estas manchas son ilusorias ya que cada franja posee luminancia¹ homogénea.

¹ La fotometría trata con la medición de la radiación óptica tal como la percibe el ojo humano. La unidad de la intensidad luminosa (llamada luminancia en este trabajo) emitida por un objeto es la candela (cd). Esta se define actualmente como 1/60 de la intensidad irradiada por un cuerpo negro de 1 cm² a 1773.5°C (temperatura a la que se funde el platino). Otra unidad fotométrica se refiere a la iluminación que recibe una superficie. La iluminación se mide en unidades lux, el cual se define como la cantidad de luz que recibe una superficie colocada a un metro de distancia de una fuente luminosa de 1 cd de intensidad (Ryer, 1998).

Si se invierte el contraste de la trama (franjas blancas sobre un fondo negro) (Fig. 6), se perciben manchas oscuras en las intersecciones de las franjas. Este oscurecimiento ilusorio fue notado por Ludimar Hermann en 1870 y a partir de entonces se le conoce como ilusión de Hermann (Spillmann, 1994).

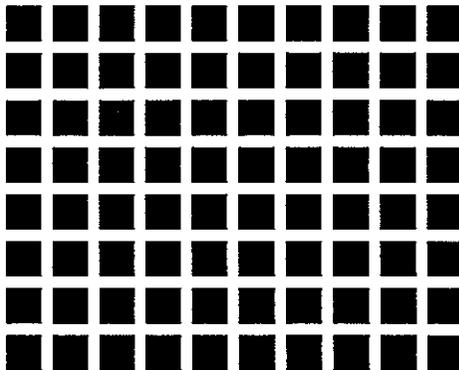


Figura 6. Ilusión de Hermann. Las manchas oscuras que se perciben en las intersecciones de las franjas son colocadas allí por nuestro sistema visual ya que, en realidad, cada franja blanca posee luminancia homogénea. Esta ilusión es producto de alguna etapa de procesamiento de la información que normalmente pasa desapercibido.

La explicación actual de la ilusión de Hermann fue propuesta por Baumgartner en 1960 y hace referencia a la organización centro-periferia de los campos receptivos de las células ganglionares de la retina (Baumgartner, 1990). De acuerdo con esta explicación, el oscurecimiento ilusorio en las intersecciones de la trama es provocado por la diferencia en inhibición lateral que reciben los centros de los CRcp sobre los cuales se proyectan distintas partes de la imagen (Fig. 7). Bajo este esquema, una célula cuyo campo receptivo se sitúa sobre una intersección (Fig. 7A) recibe dos veces más inhibición lateral que otro situado entre dos intersecciones (Fig. 7B). De acuerdo con esta explicación, la menor activación de las células ganglionares con campos receptivos situados sobre las intersecciones provocaría la percepción de las manchas oscuras de la ilusión (ver Apéndice I, Estructura y fisiología de la retina).

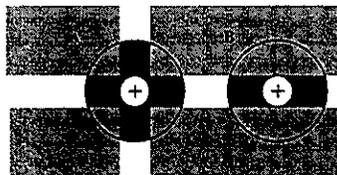


Figura 7. Esquema de dos CRcp retinianos hipotéticos situados sobre una intersección y una franja de la trama de Hermann. El centro del CRcp situado sobre la intersección (A) recibe dos veces más inhibición

lateral que el se encuentra sobre la franja (B). La mayor inhibición los CRcp situados en las intersecciones provocaría la percepción de oscurecimiento en las intersecciones de la trama de Hermann.

Con esta explicación en mente, se ha dicho que la ilusión de Hermann provee una experiencia consciente del funcionamiento de los CRcp retinianos (Lindsay, 1972; Baumgartner, 1990; Spillmann, 1994; McIlwain, 1996). Sin embargo, una maniobra sencilla sugiere que la explicación de la ilusión mediante los CRcp de las células ganglionares de la retina es incompleta: cuando la trama de Hermann se presenta a 45° de orientación la intensidad de la ilusión parece disminuir (Fig. 8).

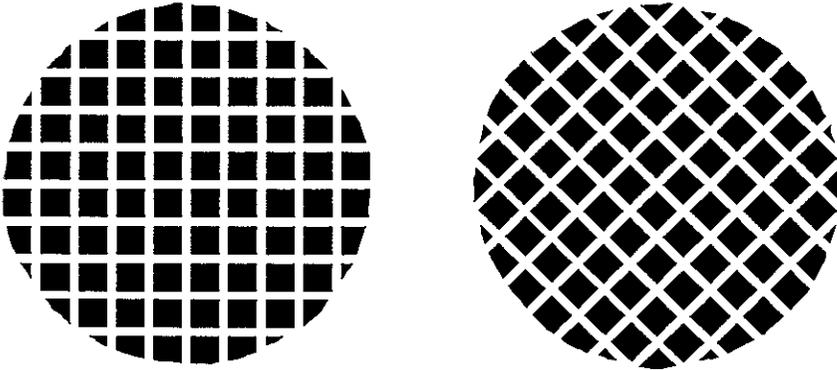


Figura 8. La ilusión de Hermann parece reducir de intensidad cuando la trama se presenta a 45° de orientación. Además de la disminución de intensidad, aparecen líneas diagonales que conectan las esquinas de los cuadros. Esta sencilla prueba nos indica que la intensidad de la ilusión y la percepción de las líneas son fenómenos que dependen de la orientación.

El cambio en intensidad de la ilusión no es congruente con la explicación por CRcp simétricos y concéntricos ya que el área de las zonas periféricas que producen la inhibición lateral permanece constante en cualquier orientación (Fig. 9).

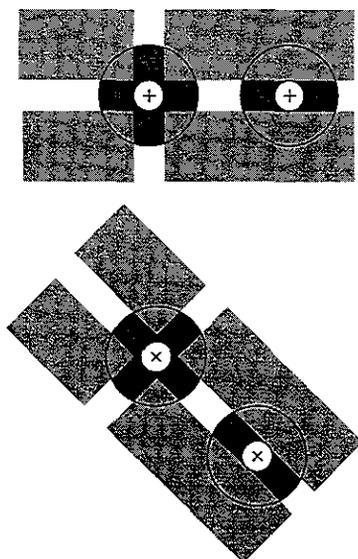


Figura 9. De acuerdo con la explicación en términos de CRcp retinianos, la intensidad con que se percibe la ilusión no debería variar con la orientación de la imagen. Las áreas que determinan la inhibición lateral permanecen constantes a distintas orientaciones.

Además de la trama de Hermann que ya se ha presentado existe una variante llamada trama de Hermann hueca (“hollow Hermann grid”; Fig. 10 A; Berbaum y Chung, 1981). En esta versión, en la que sólo se presenta la orilla de la trama se observan también manchas oscuras en las intersecciones de las franjas blancas (esquinas de los cuadros). La similitud entre las ilusiones de Hermann hueca y llena parece evidente a primera vista, sin embargo, creemos que la explicación de la ilusión llena fue forzada para que diera cuenta también de la ilusión hueca. En la literatura no se reportan CRcp con periferia tan pequeñas como las que se sugiere que generan la ilusión hueca (Fig. 10 C). En la mayoría de los CRcp retinianos, el diámetro de la periferia es 6-7 veces más grande que el del centro (Croner y Kaplan, 1995; ver Apéndice I, Estructura y fisiología de la retina). El gran tamaño de la periferia provoca que la diferencia en inhibición lateral entre los CRcp situados en las intersecciones con respecto a los situados en las franjas sea pequeña. Por esta razón los CRcp de la retina no pueden ser el origen de la ilusión hueca. Ni la intensidad ni la dependencia a la orientación de la variante de la trama de Hermann hueca han sido estudiadas anteriormente.

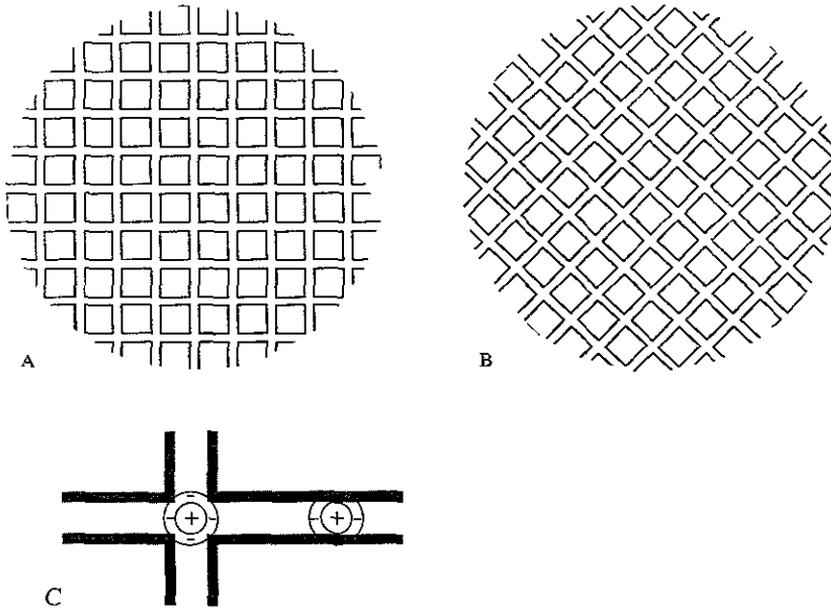


Figura 10. (A) Variante "hueca" de la ilusión de Hermann ("hollow Hermann grid"). Se perciben pequeñas sombras redondas en las intersecciones de las franjas. (c) La explicación es también en términos de CRcp.

II.3 Planteamiento del problema

Dada la incapacidad del modelo de CRcp retinianos para esclarecer la influencia de la orientación en la intensidad de la ilusión de Hermann, es necesario plantear una revisión de este modelo.

Hasta ahora, la ilusión de Hermann y su relación con el contraste, el color, las dimensiones de la trama, la adaptación a la oscuridad, el número y el arreglo de las intersecciones se ha estudiado utilizando descripciones subjetivas de sujetos que participan en experimentos psicofísicos. Tales descripciones se obtienen comparando la ilusión que generan tramas de Hermann prueba contra las que generan tramas control y son del tipo "presente" o "ausente" (Wist, 1976); "más débil", "más fuerte" (Spillmann y Levine, 1971; Levine et al, 1980); o mediante la asignación de un valor en una escala arbitraria (McCarter, 1979). Sin embargo, en los casos de estudios cuantitativos de la ilusión (Troscianko, 1982; Schrauf, 1997), los métodos no han sido utilizados para probar el efecto de la orientación.

Consideramos que el primer paso en la revisión del conocimiento que tenemos de la trama de Hermann y de su explicación, es la caracterización cuantitativa de la ilusión y de

su dependencia a la orientación. Por lo tanto, en este trabajo nos hemos propuesto los siguientes objetivos.

III.1 Objetivo general

Estudiar en términos cuantitativos la sensibilidad a la orientación de la ilusión de Hermann con el fin de revisar su explicación por campos receptivos centro-periferia retinianos.

III.2 Objetivos particulares

(1) Desarrollar un sistema para evaluar, de manera cuantitativa, la intensidad de la ilusión de Hermann.

(2) Estimar la intensidad con que se percibe la ilusión de Hermann llena y la ilusión de Hermann hueca a orientaciones de 0° y 45° , y evaluar si la magnitud de la ilusión es significativamente distinta en una orientación con respecto a la otra.

su dependencia a la orientación. Por lo tanto, en este trabajo nos hemos propuesto los siguientes objetivos.

III.1 Objetivo general

Estudiar en términos cuantitativos la sensibilidad a la orientación de la ilusión de Hermann con el fin de revisar su explicación por campos receptivos centro-periferia retinianos

III.2 Objetivos particulares

- (1) Desarrollar un sistema para evaluar, de manera cuantitativa, la intensidad de la ilusión de Hermann.
- (2) Estimar la intensidad con que se percibe la ilusión de Hermann llena y la ilusión de Hermann hueca a orientaciones de 0° y 45° , y evaluar si la magnitud de la ilusión es significativamente distinta en una orientación con respecto a la otra.

IV. Métodos y resultados

Para estudiar la dependencia a la orientación de la ilusión de Hermann se adoptaron tres estrategias. En la primera se estudió la percepción subjetiva que los sujetos tienen de la ilusión en función de la orientación. En las siguientes dos estrategias se estimó de manera cuantitativa la intensidad de la ilusión y su posible cambio con la orientación. Estas tres estrategias se listan a continuación:

(1) *Estimación subjetiva.* En esta prueba participaron sujetos experimentales que evaluaron la ilusión mediante la asignación de valores tomados de una escala arbitraria.

(2) *Estimación por cancelación activa.* Se introduce un método de estimación de la ilusión por cancelación. Para este método se desarrolló un programa de computadora que presenta tramas de Hermann en monitor y permite a los sujetos variar las características de luminancia de las intersecciones de la trama con el objetivo de encontrar la cantidad de luz que es necesario incrementar para hacer desaparecer los oscurecimientos ilusorios.

(3) *Estimación por cancelación usando estímulos constantes.* Estas pruebas se basan también en el principio de cancelación. Utilizando un programa de computadora desarrollado especialmente para esta tarea se presentó a los sujetos tramas de Hermann en cuyas intersecciones se colocaron áreas de luminosidad variable. La tarea de los sujetos en estas pruebas fue juzgar como “luces” o “sombras” (respuesta forzada de dos opciones) la percepción de las intersecciones de trama. La intensidad de la ilusión se estimó mediante el análisis del perfil de respuestas de los sujetos en función de la luminancia de las áreas de cancelación

IV.1 Estimación subjetiva de la ilusión

IV.1.1 Métodos

Como una primera aproximación al estudio del efecto de la orientación en la intensidad de la ilusión se realizaron pruebas de estimación subjetiva. En ellas se pidió a diez sujetos experimentales (7 hombre y 3 mujeres, entre 24 y 45 años de edad) que juzgaran la intensidad de la ilusión, producida por tramas de Hermann a distintas orientaciones, mediante la asignación de un valor comprendido dentro de una escala arbitraria. Los sujetos no tenían conocimiento de la intención del experimento. Los estímulos consistieron en 3 tramas de Hermann llenas y 3 tramas huecas presentadas simultáneamente (Fig. 11). A una distancia de observación de 45 cm los cuadros y las franjas tuvieron 1.2° y 0.6° de ancho, respectivamente, y cada trama de Hermann cubrió 22.6° del campo visual (a esta distancia y con estas dimensiones de la trama la ilusión de Hermann es fácilmente observable). La iluminación ambiental fue de 398 lux^2 . Los cuadros presentaron 2 cd/m^2 de luminancia y las franjas 30 cd/m^2 , proporcionando un contraste de Michelson $C = 0.89$ definido como:

² Las mediciones de iluminación (lux) e intensidad luminosa (cd/m^2) se realizaron con un exposfmetro Sekonic L-508.

$$C = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$

donde:

L_{max}

luminancia máxima de la trama (franjas blancas),

L_{min}

luminancia mínima de la trama (cuadros negros) (McIlwain, 1996).

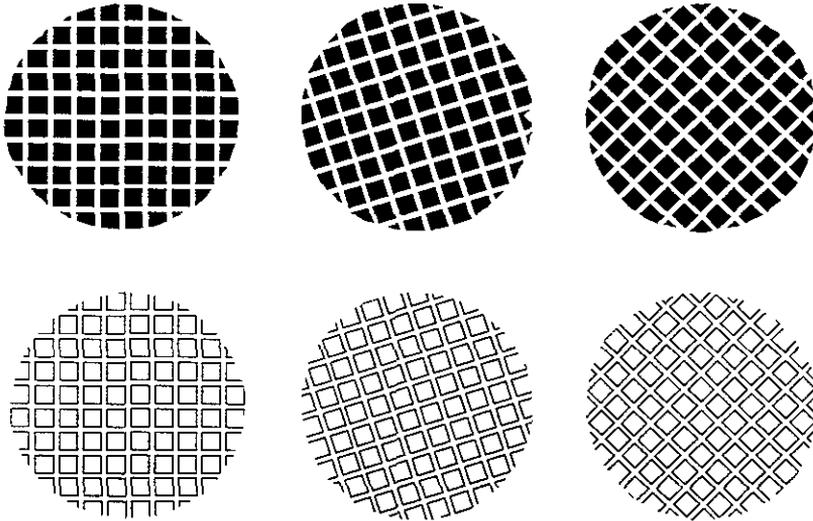


Figura 11 Esquema de las tramas de Hermann a 0°, 22° y 45° de orientación, utilizadas durante los experimentos de estimación subjetiva de la ilusión

La primera parte del experimento consistió en pedir a los sujetos una descripción libre de las tramas de Hermann a 0°, 22° y 45° de inclinación. Eventualmente, todos los sujetos reportaron, sin la instrucción de los experimentadores, las sombras ilusorias en las intersecciones de la trama llena. De los 10 sujetos, 8 reportaron ver las sombras ilusorias en la trama hueca.

En la segunda parte del experimento, una vez que reportaron espontáneamente las sombras ilusorias, se pidió a los sujetos que estimaran la intensidad (tarea de medición subjetiva o "subjective scaling"; Luce y Krumbhansl, 1988) con que percibieron la ilusión con la trama de Hermann en las tres orientaciones (0°, 22° y 45°). Los sujetos fueron instruidos para asignar a la intensidad un valor comprendido entre 0 y 10. Se les dijo que cuando no percibieran la ilusión, es decir, cuando las intersecciones fueran tan brillantes como el resto de las franjas, le asignaran a la ilusión el valor 0. Por el contrario si las sombras ilusorias fueran tan oscuras como los cuadros, les correspondería un valor de 10

IV.1.2 Resultados de la estimación subjetiva de la ilusión

La figura 12 muestra los valores de intensidad subjetiva reportados por los sujetos para las tramas de Hermann a 0° y 45°. En las abscisas se muestra el valor reportado a 0° y en las ordenas el valor a 45°. La línea diagonal representa los valores de igual intensidad para ambas orientaciones. El hecho de que los valores reportados por los sujetos se sitúen debajo de esta línea diagonal indica que la ilusión es más débil cuando la trama se presenta a 45° de orientación. La figura 12 muestra que todos los sujetos juzgaron que tanto la ilusión de la trama de Hermann llena como la hueca son más intensas cuando las franjas de la trama se presentan en orientación horizontal-vertical (0°).

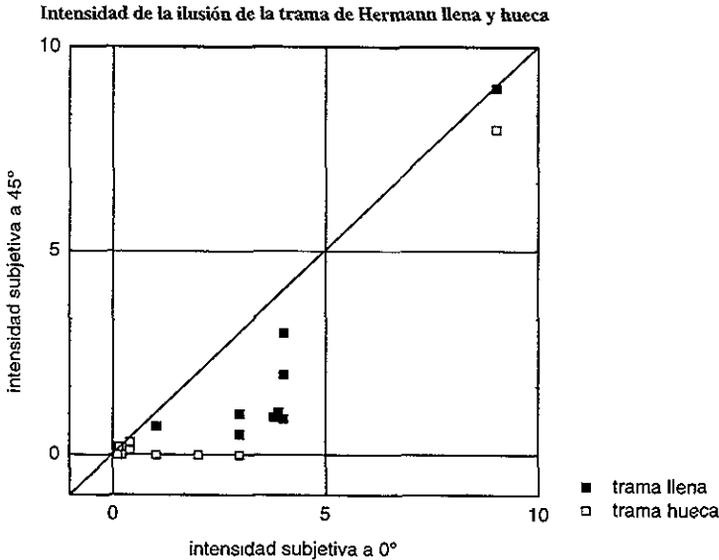


Figura 12. Resultados de las pruebas subjetivas. Los puntos indican la intensidad que los diez sujetos asignaron a la trama de Hermann a 0° y a 45° de inclinación (un punto por sujeto para cada trama). Se puede ver que la intensidad de la ilusión fue, en la mayoría de los casos, mayor a 0°, tanto para la trama llena como para la hueca (prueba del signo, $p < 0.05$, $n=10$ para cada trama).

Para probar la significancia de los resultados (probabilidad de obtener los resultados de manera azarosa) se aplicó la prueba de signo (Siegel y Castellan, 1995). La prueba analiza la dirección de las diferencias entre dos medidas bajo el supuesto de que las medidas se pueden ordenar según su magnitud. Supone que la variable a analizar es de distribución continua y no hace ninguna suposición sobre la distribución de los valores que ésta puede tomar.

La prueba del signo, aplicada a los valores de intensidad de la ilusión reportados por los sujetos, nos dice que la probabilidad de que la dirección de las diferencias entre la intensidad de la ilusión a 0° y a 45 haya resultado de manera azarosa es menor al 3% ($p=0.023$) para la trama hueca y menor al 1% ($p=0.008$) para la trama llena. Podemos

decir entonces que las ilusiones provocadas por las tramas de Hermann llena y hueca, a 0° son significativamente más intensas que las ilusiones provocadas por las tramas a 45°.

IV.1.3 Discusión de la estimación subjetiva

Esta primera fase experimental mostró que a los sujetos examinados les parece que la intensidad de la ilusión es mayor cuando las franjas de la trama de Hermann se presentan en orientación vertical y horizontal. Sin embargo, es necesario resaltar los inconvenientes de la estrategia de estimación subjetiva. Primero; la elección de diferentes escalas probablemente influya en el criterio del sujeto para asignar valores. Además, no se pueden comparar los resultados obtenidos por distintos sujetos ya que cada uno puede seguir un criterio distinto para asignar los valores. Segundo; la escala de medición no tiene relación con los parámetros físicos que caracterizan el estímulo, a partir del cual, se origina la ilusión. Al desarrollar un método para evaluar de manera cuantitativa la intensidad de la ilusión, se espera que la escala adoptada se relacione de manera directa con algún aspecto del fenómeno.

A pesar de estos inconvenientes, las pruebas subjetivas confirmaron la percepción subjetiva de la anisotropía de la ilusión de Hermann y en ellas se realizaron algunas observaciones importantes que fueron útiles en la siguiente fase del trabajo. Entre ellas destacan: (1) los sujetos reportan que las sombras provocadas por la trama de Hermann llena son más grandes que las sombras provocadas por la trama hueca y tal vez, (2) las sombras tienen distinta forma; y (3) la ilusión es más débil en las intersecciones cercanas al punto donde los sujetos fijan la vista (que se proyecta sobre la fóvea) (también descrito por Spillmann, 1994).

IV.2 Estimación de la ilusión por cancelación activa

III.2.1 Métodos

La siguiente estrategia experimental consistió en desarrollar un sistema de estimación cuantitativa de la intensidad de la ilusión. Ya que la ilusión de Hermann consiste en la percepción de manchas oscuras (áreas de poca luminosidad aparente), una forma de estimarla es contrarrestando con luz este oscurecimiento (Fig. 13). Así, una medida de la intensidad de la ilusión es la cantidad de luz necesaria para compensarla. Este método, llamado de cancelación, fue utilizado por primera vez por Troscianko (1982) para estimar el oscurecimiento ilusorio que produce una intersección de la trama de Hermann. Para ello colocó un disco de luminosidad variable sobre la intersección. La tarea de los sujetos en estos experimentos fue disminuir gradualmente la intensidad luminosa del disco, al principio claramente brillante, hasta que ya no fuera posible distinguirlo de la iluminación del fondo. Estimaciones de la intensidad de la trama de Hermann llena en función del contraste de la trama se han obtenido utilizando la técnica de cancelación (Schrauf *et al*, 1997). Sin embargo, el efecto de la orientación sobre las tramas llena y hueca no ha sido estudiado anteriormente.

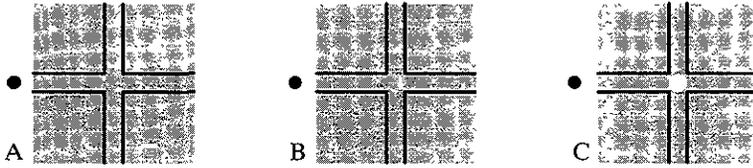


Figura 13. Esquema del principio de cancelación. (A) Cuando se fija la vista en algún punto cercano a la intersección de las franjas (como el que aparece a la izquierda) se percibe una tenue sombra en la intersección. En (B) y (C) se ha aumentado progresivamente la luminancia de un círculo situado en el lugar de la sombra ilusoria. En (C) la luminancia es demasiado alta y el círculo se percibe claramente luminoso.

Programa de computadora

Con el objetivo de implementar la técnica de cancelación y estimar la influencia de la orientación en la intensidad de la ilusión de Hermann, se desarrolló un programa de computadora que presentara la trama de Hermann a 0° y 45° y que fuera capaz de incrementar la luminancia en las intersecciones de la trama para cancelar el oscurecimiento ilusorio. El programa se escribió en MATLAB® versión 4.0, que es un sistema de análisis numérico y visualización. Se utilizó este sistema porque el desarrollo de programas requiere pocos conocimientos de programación en comparación con otros lenguajes. Además, la representación de imágenes mediante matrices con las coordenadas de los puntos que las forman permite su transformación mediante operaciones sencillas que se programan fácilmente (ver Apéndice II).

Las funciones básicas del programa son:

- (1) Presentar tramas de Hermann, definidas por
 - a) el ancho de las franjas y cuadros,
 - b) el contraste entre las franjas y los cuadros y,
 - c) la orientación de la imagen.
- (2) Implementar la técnica de cancelación de la ilusión presentando áreas de luminancia variable en las intersecciones de la trama (Fig. 14).
- (3) Leer archivos de protocolos experimentales y generar archivos de resultados.

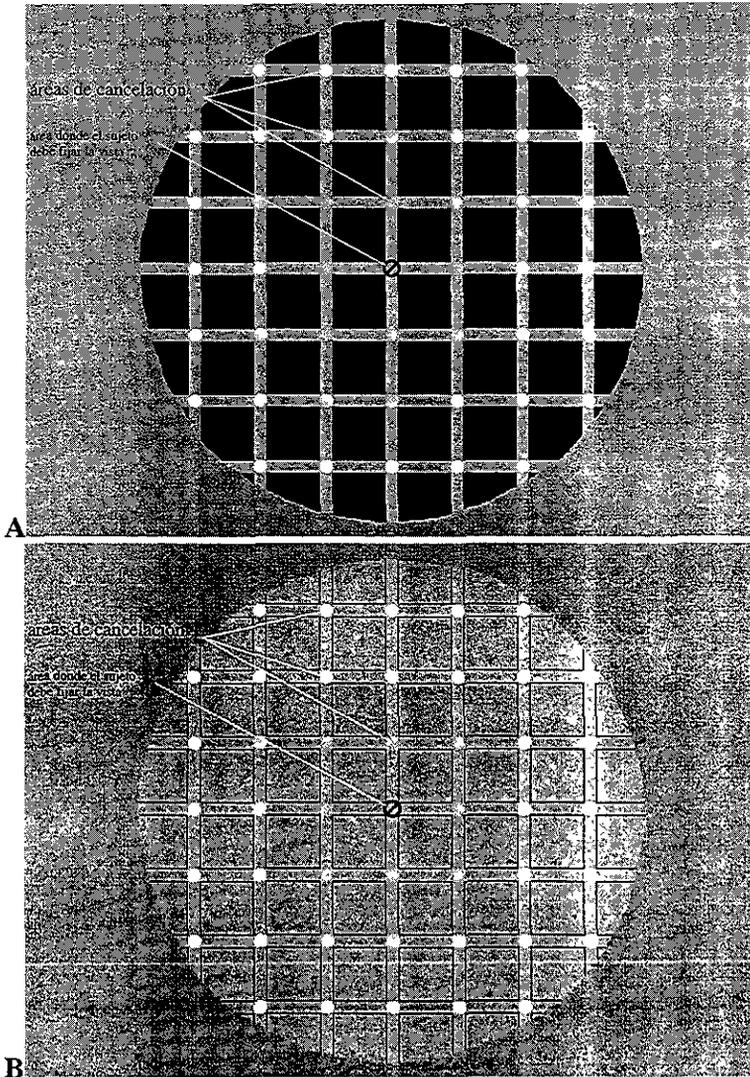


Figura 14. Implementación de la técnica de cancelación para estimar la intensidad de la ilusión de Hermann llena (A) y hueca (B). Modificando la luminancia de los círculos en las intersecciones (áreas de cancelación) es posible compensar el oscurecimiento ilusorio. La luminancia de las áreas de cancelación disminuye desde la periferia hasta el punto en el cual los sujetos deben fijar la vista (área de fijación) (ver Fig 17). Aún cuando tienen el mismo perfil de luminancia, las áreas de cancelación son más notorias en B. Esto sugiere que la ilusión de la trama de Hermann hueca es más débil que la ilusión de la trama llena.

De acuerdo con observaciones realizadas en experimentos piloto con cinco sujetos, la eficacia de la técnica de cancelación para compensar la ilusión depende de por lo menos tres características de las áreas de cancelación:

- 1) luminancia según la excentricidad medida a partir del punto de fijación,
- 2) tamaño de las áreas de cancelación,
- 3) forma de las áreas de cancelación.

La manera en que se manejaron estas características de las áreas de cancelación se discute a continuación.

Perfil de luminancia de las áreas de cancelación según la excentricidad

Las observaciones preliminares indicaron que la ilusión de Hermann es más fuerte en las intersecciones más alejadas del punto de fijación (también descrito por Spillmann, 1994). De acuerdo con esto, el programa se diseñó de manera que las áreas de cancelación aumentarían su luminancia en función de la excentricidad de la siguiente manera:

$$\text{luminancia} = (h1 - h0) \cdot \text{excentricidad}^x + h0 \tag{eq. 2}$$

donde:

<i>h1</i>	luminancia del área de cancelación más lejana,
<i>h0</i>	luminancia del área de cancelación en el punto de fijación,
<i>excentricidad</i>	excentricidad del área de cancelación a partir del punto de fijación,
<i>x</i>	exponente que modifica el incremento de luminancia.

Modificando el exponente *x* de la ecuación que controla el aumento de luminancia (eq. 2) se modifica la forma del incremento de luminancia, tal como se muestra en la figura 15. Durante las pruebas de cancelación activa los sujetos ajustaron *x* para determinar el perfil de luminancia que mejor cancela la ilusión de Hermann.

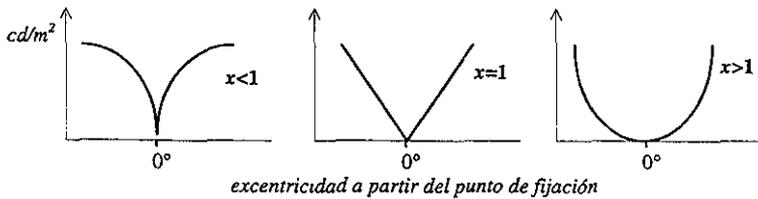


Figura 15 La forma del incremento de luminancia de las áreas de cancelación se controla mediante el valor del exponente *x* de la función representada en la eq. 2.

Forma y tamaño de las áreas de cancelación

De acuerdo con reportes de los sujetos que participaron en las pruebas subjetivas (sección IV.1), las sombras pueden percibirse como áreas redondas o como áreas cuadradas con las esquinas situadas en los vértices de los cuatro cuadros que forman una intersección. Por esta razón, en las pruebas de cancelación activa se presentó a los sujetos la opción de

utilizar sombras cuadradas o redondas. El tamaño de las áreas de cancelación se determinó también durante estas pruebas.

Características de la trama de Hermann utilizada en los experimentos

Las franjas de la trama de Hermann presentadas durante los experimentos fueron de tono gris claro. De esta manera, la luminancia en las intersecciones podía incrementarse hasta cancelar la ilusión. Los cuadros presentaron 0.18 cd/m^2 de luminancia (la luminancia mínima del monitor) y el fondo 44 cd/m^2 , resultando en un contraste $C=0.99$. Como se puede apreciar en la figura A.III.1 del apéndice III (línea de luminancia de las franjas), el monitor todavía es capaz de aumentar la luminancia en las intersecciones. Con estos valores de luminancia la cancelación de la ilusión de Hermann fue posible en todos los casos, para todos los sujetos.

El tamaño de los cuadros y las franjas de la trama de Hermann que se usó en las estimaciones de intensidad de la ilusión se escogió de manera que generara la ilusión que subjetivamente fuera igual a la que provoca una trama de Hermann impresa en papel. En esta configuración los cuadros tienen 2.0° y las franjas 0.7° de ancho. Se utilizó toda el área de graficación del monitor, situado a una distancia normal de observación (recomendada en el manual de operación del monitor) de 65 cm, cubriendo 20° del campo visual.

Condiciones experimentales

Para que las imágenes se presentaran en condiciones constantes de iluminación y para que los sujetos mantuvieran los ojos alineados horizontalmente y a una distancia constante de observación (65 cm) se construyó un sistema experimental en que el monitor se sitúa dentro de una caja de madera, cerrada a la luz y con el interior de color negro. En el extremo de la caja opuesto al monitor se montó un visor anatómico desde donde los sujetos observaron las imágenes (Fig. 16).

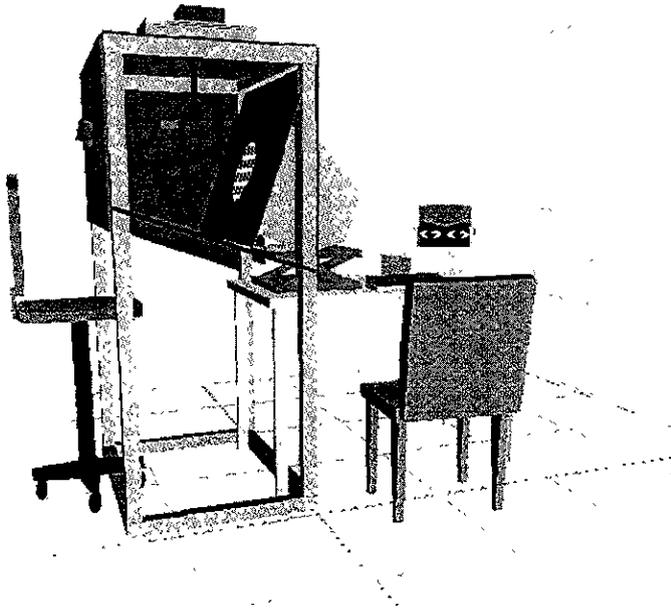


Figura 16 Esquema del sistema experimental. El monitor se colocó dentro una caja cerrada a la luz. En el extremo opuesto se montó un visor anatómico desde el cual los sujetos observaron a una distancia fija las imágenes. La posición de los ojos fue vigilada mediante una cámara de video montada en el interior de la caja

Para que los sujetos se encontraran todos en las mismas condiciones de adaptación a la luz, antes de los experimentos se mantuvieron por lo menos 15 minutos en un cuarto iluminado por una lámpara de pie con foco de halógeno a una intensidad constante de 20 lux (intensidad que produce el monitor dentro del sistema experimental, Fig. 16).

Protocolo de estimación de la ilusión por cancelación activa

Los parámetros relevantes para cancelar la ilusión (forma, tamaño y perfil de luminancia de las áreas de cancelación) se determinaron en 4 sesiones experimentales en las que participaron 4 sujetos y 2 experimentadores. Durante cada sesión se presentaron 24 imágenes en orden aleatorio: 6 tramas de Hermann llenas a 0° , 6 tramas llenas a 45° , 6 tramas huecas a 0° y 6 tramas huecas a 45° . Para cada imagen, se les pidió a los sujetos realizaran las siguientes tareas:

- (1) observar cuidadosamente la ilusión,
- (2) decidir si las sombras ilusorias son cuadradas o redondas,
- (3) habilitar las áreas de cancelación (utilizando el teclado de la computadora) y ajustar su tamaño hasta que cubrieran las sombras provocadas por la ilusión,
- (4) fijar la vista en área indicada para ello e ir aumentando la luminancia de las áreas de cancelación hasta hacer desaparecer la ilusión en las intersecciones más alejadas de la fovea,

(5) ajustar el exponente de la función que controla el aumento de luminancia según la excentricidad hasta hacer desaparecer la ilusión de las intersecciones que se encuentran entre el punto de fijación (donde no hay ilusión) y las intersecciones más alejadas (10° de excentricidad).

IV.2.2 Resultados de la estimación de la ilusión por cancelación activa

Los resultados de la determinación de los parámetros de cancelación son los siguientes:

(1) Todos los sujetos decidieron que, en comparación con la forma cuadrada, la forma redonda de las áreas de cancelación es más adecuada para cancelar la ilusión.

(2) El diámetro de las áreas de cancelación que mejor compensa la ilusión es 0.82 veces el ancho de las franjas para la trama de Hermann hueca y 1.1 veces para la llena. Esto muestra que el oscurecimiento generado por la trama de Hermann hueca es de menor tamaño que el que genera la trama llena.

(3) Las pruebas en las que se intentó estimar la forma del perfil de luminancia de las áreas de cancelación (exponente x , eq. 2, Fig. 15), no arrojaron resultados sistemáticos. Se decidió que, en las pruebas subsiguientes, el exponente x tomaría valor 1. De esta manera, la función de incremento de luminancia fue una línea recta cuya pendiente es el parámetro que los sujetos utilizaron para cancelar la ilusión (Fig. 17).

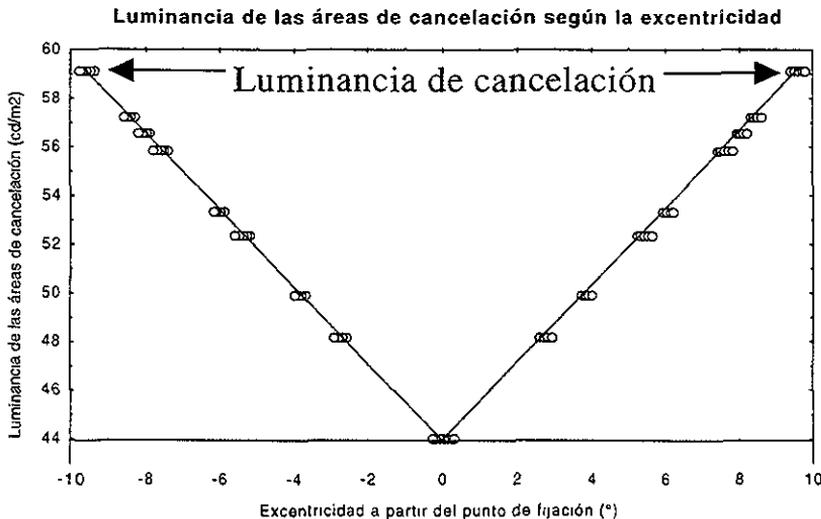


Figura 17. Incremento de la luminancia de las áreas de cancelación. Cada punto en la gráfica representa la luminancia de los círculos concéntricos que conforman un área de cancelación. La serie de puntos que tienen un mismo valor de luminancia forman un área de cancelación. La línea horizontal en 44 cd/m^2 indica la luminancia de las franjas de la trama. En lugar de referirnos a la pendiente del incremento de luminancia

que cancela la ilusión mencionaremos solamente de la luminancia de las áreas con mayor excentricidad (10°) y nos referiremos a ella como la luminancia de cancelación.

La importancia de estos resultados en el desarrollo del trabajo se discute a continuación.

IV.2.3 Discusión de estimación de la ilusión por cancelación activa

Utilizando el método de cancelación activa pudo determinarse:

- el diámetro de las áreas de cancelación y,
- la forma de las áreas de cancelación.

Sin embargo, el método de cancelación activa fue insuficiente para determinar:

- la función de incremento de luminancia (parámetro x , eq. 2),
- la intensidad de la ilusión.

El método de cancelación activa no fue adecuado para estimar la intensidad de la ilusión de Hermann. Esto se debió posiblemente al excesivo número de combinaciones de parámetros de cancelación. Durante las pruebas de cancelación activa los sujetos debían ajustar tamaño la forma y el perfil de luminancia de las áreas de cancelación. Es probable que los sujetos no pudieran evaluar con claridad cómo la combinación de estos parámetros influía en la cancelación de la ilusión de Hermann.

Debido a la incapacidad del método de cancelación activa para obtener mediciones de la intensidad de la ilusión de Hermann fue necesario desarrollar otro método de estimación. Uno de los requisitos que debía cumplir el nuevo método fue que las respuestas que se requirieran de los sujetos experimentales fueran lo más sencillas posible.

A pesar de no haber obtenido estimaciones de la intensidad de la ilusión, los resultados en la determinación del diámetro y la forma de las áreas de cancelación fue útil en el desarrollo del siguiente protocolo experimental.

IV.3 Medición de la ilusión mediante la técnica de cancelación con respuesta forzada de dos opciones

IV.3.1 Métodos

En este protocolo se utilizó el método de cancelación en combinación con una estrategia de respuesta forzada de dos opciones. En esta nueva estrategia experimental se presentó a los sujetos, repetidamente, tramas de Hermann con diferentes luminancias de las áreas de cancelación (definida como la luminancia en cd/m^2 de las áreas de cancelación de mayor excentricidad, Fig. 17). La tarea de los sujetos fue responder “luces” o “sombras”, basados en la percepción de luminancia de las intersecciones de la trama. De esta manera, cuando la luminancia de las áreas de cancelación de las intersecciones de la trama es muy baja los sujetos contestarán “sombras” en todas las ocasiones. En tramas de Hermann con mayor luminancia en las áreas de cancelación la tendencia de respuesta del sujeto irá cambiando de “sombras” a “luces”. Cuando las áreas de cancelación presenten una

luminancia suficientemente elevada el sujeto contestará “luces” siempre que se le presente esa imagen. Presentando repetidamente imágenes con distintas luminancias en las áreas de cancelación se pudo construir el perfil de probabilidad de respuesta del sujeto en función de la luminancia de cancelación. Este perfil permitió estimar la luminancia necesaria para hacer desaparecer la ilusión, a la cual llamamos luminancia de cancelación. La luminancia de cancelación la definimos como aquella luminancia en la que la probabilidad de respuesta “luces” es igual a la probabilidad de respuesta “sombras” (ambas 0.5). En esta luminancia, la luz emitida por las áreas de cancelación “compensa” o “cancela” el oscurecimiento que produce la ilusión de Hermann. Debido a la cancelación, los sujetos no ven ni las sombras de la ilusión ni la luminancia de las áreas de cancelación, lo cual provoca que las respuestas de los sujetos sean azarosas (50% de las ocasiones “luces”, 50% “sombras”, aproximadamente).

Cada imagen de la trama de Hermann se presentó por 3 segundos durante los cuales el sujeto debía mantener la vista en el área de fijación marcada en el centro de la trama (Fig. 14). Después de los tres segundos de presentación, la trama de Hermann desaparecía y en su lugar se presentaba un signo de interrogación indicando al sujeto que comunicara su respuesta (luces o sombras) y cerrara los ojos para el cambio a la siguiente imagen (Fig. 18).

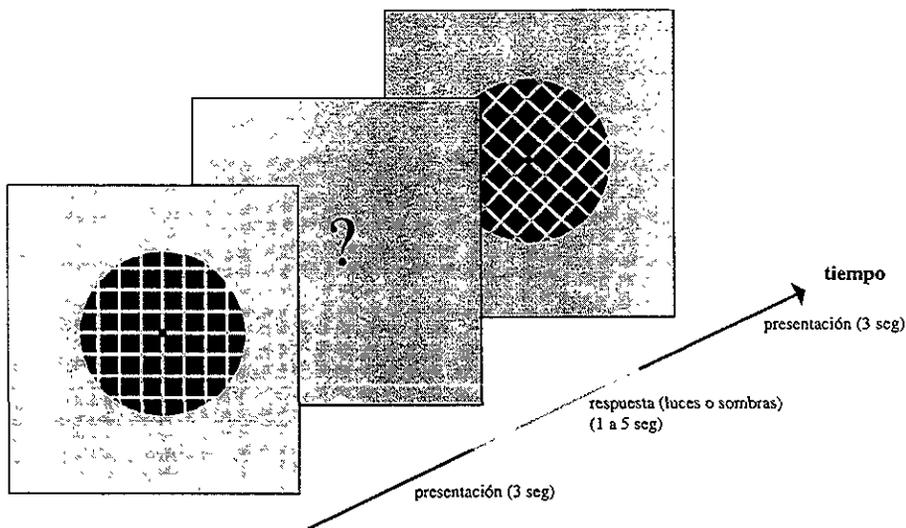


Figura 18. Ejemplo del curso temporal del protocolo experimental de respuesta forzada de dos alternativas. Cada imagen de la trama de Hermann se presenta por tres segundos. Concluido del tiempo de presentación la trama de Hermann desaparece indicando al sujeto que debe comunicar su respuesta, luces o sombras, dependiendo de la luminancia que percibió en las intersecciones de la trama. Después de la respuesta una nueva trama de Hermann es presentada.

Cada sujeto participó en seis sesiones experimentales durante las cuales se presentaron tramas de Hermann con 10 luminancias distintas, 4 veces cada una, en 2 orientaciones (0° y 45°), para los 2 tipos de tramas (llena y hueca) y para el experimento control (ver más

adelante). De esta manera el protocolo experimental consistió en 240 imágenes clasificadas por sesión, en un tiempo aproximado de 40 minutos. En estos experimentos participaron 7 sujetos (4 mujeres y 3 hombres), de entre 18 y 26 años, sin conocimiento del objetivo del experimento. Para cada sujeto se realizaron 5 repeticiones de las estimaciones de intensidad de la trama llena, 6 repeticiones de la trama hueca y 3 del experimento control.

Dado que la percepción de luminancia de una escena depende de la luminancia a la cual ha sido expuesta previamente la retina (fenómeno de adaptación a la luz), para que los sujetos experimentales se encontraran siempre en las mismas condiciones de adaptación a la luz, antes del inicio de los experimentos permanecieron al menos 15 minutos a 20 lux de iluminación, que es la iluminación que produce el monitor de la computadora dentro del sistema cerrado a la luz (Fig. 16).

Para cada una de las 10 luminancias de las áreas de cancelación, utilizando las respuestas de los sujetos a las 4 repeticiones de cada luminancia, se calculó la probabilidad de que el sujeto respondiera "lucos". Se observó que esta probabilidad aumentó de manera sigmoideal con la intensidad luminosa de las áreas de cancelación. Para describir esta relación y representar los datos proponemos la función que se representa en la ecuación 3:

$$p(l) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{L}{L_{50}}\right)^b} \quad \text{eq. 3}$$

donde:

- $p(l)$ probabilidad de respuesta "lucos",
- L luminancia de las áreas de cancelación,
- L_{50} luminancia de las áreas de cancelación cuando la probabilidad de respuesta "lucos" es 0.5. En este valor de luminancia la ilusión ha sido cancelada. L_{50} indica, entonces, la intensidad de la ilusión.
- b exponente que determina el ancho de la función.

Definimos la intensidad de la ilusión como aquel valor de luminancia de las áreas de cancelación en el cual la probabilidad de que el sujeto responda "lucos" es 0.5 (Fig. 19). Dado que la probabilidad de respuesta 0.5 significa que el sujeto responde de manera azarosa (lucos en 50% de las ocasiones y sombras en el otro 50%, aproximadamente), es decir, que no puede percibir ni las sombras ilusorias ni la luminancia de las áreas de cancelación, decimos que en ese valor de luminancia, la ilusión ha sido cancelada.

Experimento control

Para descartar la posible influencia de factores metodológicos que afectaran las mediciones de intensidad de la ilusión en las dos orientaciones (0° y 45°), se realizó un protocolo control. Si la percepción de luminancia de las áreas de cancelación hubiera cambiado con la orientación se habrían obtenido diferencias en la intensidad estimada de la ilusión pero éstas hubieran sido debidas al método de estimación y no a diferencias en

la percepción de la ilusión misma. Para descartar esta posibilidad se realizaron curvas de detección de las áreas de cancelación a 0° y 45° de inclinación. Este protocolo consistió en presentar imágenes que sólo contenían áreas de cancelación con distintas luminancias. La tarea de los sujetos fue clasificar la luminancia de estas áreas en luces o sombras. Con estos datos, se calculó la probabilidad de respuesta luces y se ajustó una función sigmoidea (eq. 3) para obtener una curva psicofísica de detección. De esta curva, de la misma manera que con las tramas de Hermann llena y hueca, se obtuvo la luminancia de las áreas de cancelación en la cual la probabilidad de respuesta “luces” fue 0.5.

Si la percepción de luminancia de las áreas de cancelación no cambia con la orientación de la imagen, entonces, los valores de luminancia a 0.5 de probabilidad no serán significativamente distintos a 0° y 45° de inclinación, descartando al método de estimación como explicación de una posible anisotropía en la percepción de la intensidad de la ilusión.

IV.3.2 Resultados de las pruebas de respuesta forzada

En la figura 19 se presentan los resultados de una sesión experimental típica en la que se determinó la intensidad de la ilusión de la trama de Hermann llena a 0° y a 45° . Cada punto en la gráfica representa el porcentaje de veces, de las cuatro repeticiones, que el sujeto contestó “luces” para una determinada luminancia de las áreas de cancelación. En el conjunto de puntos del mismo símbolo se observa el cambio en la probabilidad de respuesta del sujeto a medida que se incrementa la luminancia en las áreas de cancelación para la trama de Hermann a determinada orientación. A este conjunto de puntos se les ajustó una curva sigmoidea para describir su comportamiento. En la figura se observa que la curva que describe el cambio de probabilidad de respuesta para la trama a 45° está desplazada hacia la izquierda con respecto a la curva para la trama a 0° de orientación. El desplazamiento hacia la izquierda de la curva para la trama de Hermann a 45° indica que fue necesaria menos luz para que el sujeto percibiera la transición de sombras a luces en las intersecciones de la trama, es decir, que la ilusión es menos intensa cuando la trama de presenta a 45° de orientación.

En la figura 19 también se presentan los resultados de un experimento control en el que presentó al sujeto imágenes de las áreas de cancelación únicamente. Utilizando presentaciones repetidas de imágenes con áreas de cancelación de distintas luminancias se construyó la curva de probabilidad de respuesta “luces” del sujeto para las distintas luminancias. De esta manera la curva del experimento control representa la sensibilidad del sujeto para discriminar la luminancia de las áreas de cancelación con respecto a la luminancia del fondo de la imagen. Los valores L_{50} del experimento control para 0° y 45° de orientación no presentaron diferencias significativas (ver adelante, pruebas estadísticas). Esto significa que la disminución en intensidad que se observa para en la curva para la trama de Hermann a 45° no se debe a que la luminancia de las áreas de cancelación haya cambiado.

Estimación de la luminancia de cancelación de la ilusión de Hermann

modelo (eq. 3): $p(l) = 1 - \{1 / (1 + (L / L50)^b)\}$

sujeto VI, trama de Hermann llena, 3a sesión

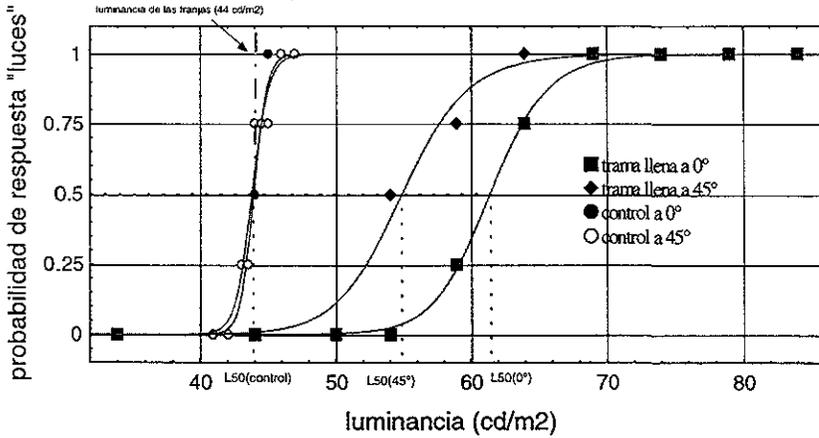


Figura 19. Resultados de un experimento para la estimación de la luminancia que cancela la ilusión de la trama de Hermann llena a 0° (■) y 45° (◆). Se presentan también los resultados de un experimento control en el que se determinaron las curvas de detección de las áreas de cancelación (0° ●, 45° ○). Se observa que la luminancia necesaria para cancelar la ilusión a 0° L50(0°) es mayor que la necesaria para cancelarla cuando la trama se inclina 45° L50(45°).

La intensidad de las ilusiones a 0° y 45° de orientación

En la figura 20 se comparan los valores de intensidad de las ilusiones que produjo la trama de Hermann a 0° y 45°. Cada punto compara las estimaciones de intensidad para las dos orientaciones en cada sesión experimental, para todos los sujetos. La línea diagonal marca los valores de igual luminancia para las dos orientaciones y, el hecho de que los valores se encuentren por debajo de esta línea indica que la ilusión es más débil para la inclinación de 45°. Los puntos que corresponden a la trama de Hermann llena caen todos (excepto uno) debajo de la línea diagonal. Esto significa que la ilusión se reduce al inclinar la trama a 45°.

Luminancia de cancelación de la trama de Hermann

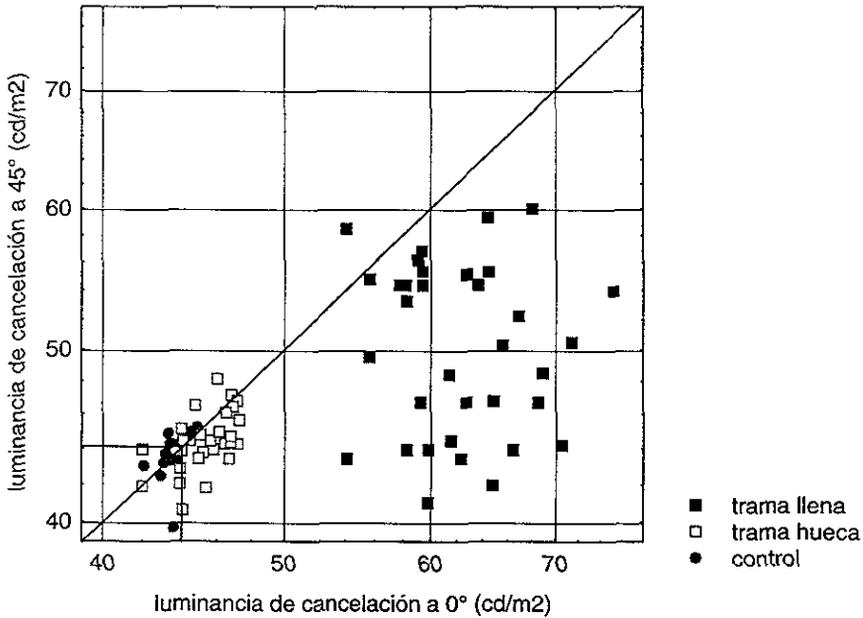


Figura 20. Luminancia de cancelación para las ilusiones de la trama de Hermann llena y hueca a 0° y 45° de orientación. Se presentan también los resultados de los experimentos control para la detección de las áreas de cancelación (control). La cantidad de luz necesaria para cancelar la ilusión de la trama de Hermann llena es mayor que la necesaria para cancelar la ilusión de la trama hueca. Como lo muestra la distribución de puntos (la mayoría están debajo de la diagonal) ambas ilusiones son reducen su intensidad cuando la trama se presenta a 45° de orientación.

La trama de Hermann hueca produce una ilusión más débil que la trama llena. En la figura 21 se muestra una ampliación de los resultados de estimación de la intensidad de la trama de Hermann hueca y de los experimentos control. El hecho de que la mayoría de los puntos que corresponden a la trama de Hermann hueca se encuentren por debajo de la línea diagonal significa que ésta produjo una ilusión, más débil, también sensible a la orientación.

Los resultados del experimento control se muestran también en la figura 21. La distribución homogénea de los puntos hacia arriba y abajo de línea diagonal significa que la percepción de luminancia de las áreas de cancelación no varía con la orientación y que los sujetos tampoco cambiaron su criterio de respuesta en función de la orientación. Asimismo, la distribución homogénea de los puntos hacia arriba y debajo de la línea que marca la luminancia del fondo de la imagen (44 cd/m^2) indica que la preferencia de los sujetos para decir luces o sombras está equilibrada. Los resultados del experimento control sugieren que la anisotropía que se observa en la intensidad de las ilusiones de

Hermann no se debe al método de estimación ni a un cambio, dependiente de la orientación, del criterio de respuesta de los sujetos

Luminancia de cancelación de la trama de Hermann hueca

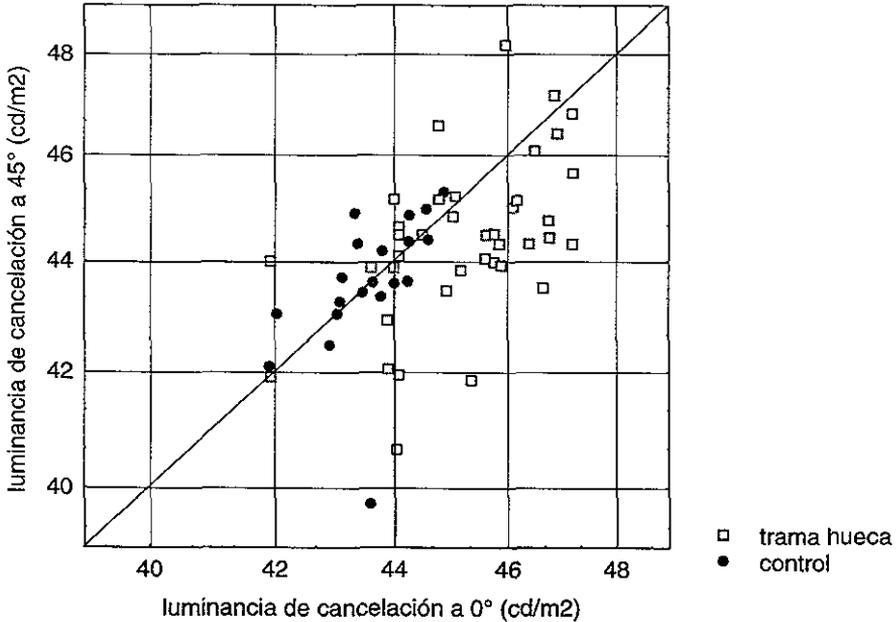


Figura 21. Ampliación de los resultados de estimación de intensidad de la ilusión de la trama de Hermann hueca y del experimento control. La luminancia necesaria para cancelar la ilusión es mayor a 0° que a 45°. Esta anisotropía no se encuentra en la percepción de las áreas de cancelación. Los valores de la ilusión están significativamente arriba de los valores de los experimentos control (ver tabla 2), demostrando que la trama de Hermann hueca produce una ilusión aún cuando esta sea difícil de percibir. Las líneas verticales y horizontales en el valor de 44 cd/m² representan la luminancia de las franjas de la trama.

Los resultados de los experimentos de estimación de la intensidad de las ilusiones así como los del experimento control se resumen en la figura 22. Se muestra el promedio de la luminancia de cancelación para la trama de Hermann llena y hueca así como el promedio de los valores L_{50} (eq. 3) del experimento control. La línea punteada marca la luminancia de las franjas de la trama de Hermann. Los valores que se sitúan por arriba de esta línea indican la luminancia a la que es necesario incrementar las áreas de cancelación para cancelar la ilusión. Las barras oscuras y claras comparan los valores de cancelación de la ilusión para las tramas a 0° y 45°. A 0° de orientación la trama llena produce una ilusión más fuerte que la trama hueca. A 45° se reduce la intensidad de las ilusiones provocadas por ambas tramas. La luminancia de cancelación para la trama hueca a 45° no es significativamente distinta (prueba de t para muestras independientes, $p=0.08$) de los valores L_{50} de los experimentos control lo que indica que la ilusión hueca desaparece al inclinar la trama 45°.

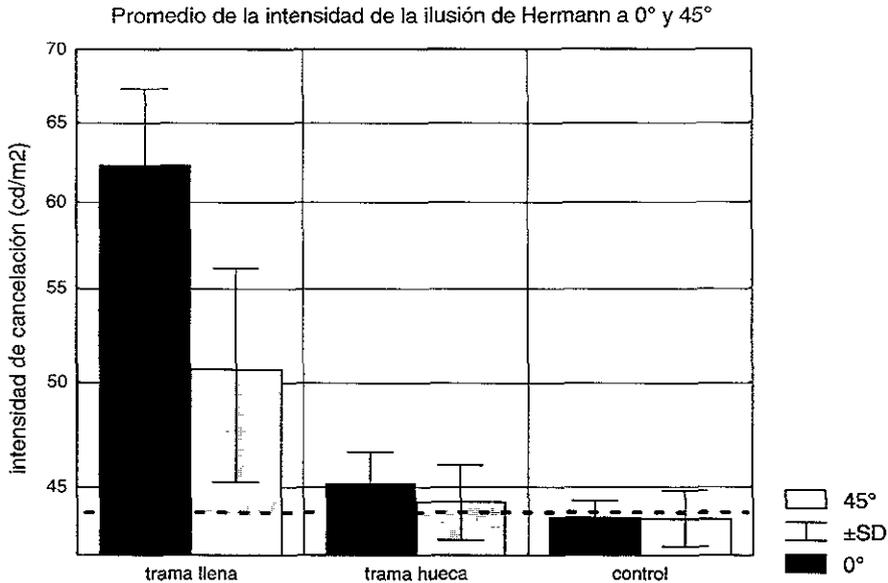


Figura 22. Promedio y desviación estándar de los valores L_{50} (intensidad de cancelación, eq.3) para las ilusiones llena y hueca así como para el experimento control. La línea punteada horizontal (---) marca la luminancia de las franjas de la trama. Tanto la ilusión de Hermann llena como la hueca reducen su intensidad cuando la trama se presenta a 45° orientación. Los valores de intensidad de la trama de Hermann hueca a 45° son estadísticamente indistinguibles (prueba de Wilcoxon, $p=0.394$, ver Pruebas estadísticas) de los valores L_{50} del experimento lo cual sugiere que ésta ilusión desaparece al inclinar la trama.

Pruebas estadísticas

Las diferencias en la intensidad de las ilusiones a 0° y 45° de orientación se evaluaron mediante cuatro pruebas que se discuten a continuación y cuyos resultados se presentan en la tabla 1

(1) Prueba del signo. Esta prueba no paramétrica analiza la dirección de las diferencias entre dos grupos de mediciones, sin tomar en cuenta la magnitud de esta diferencia. Supone que la variable a analizar es de distribución continua y no hace ninguna suposición sobre la distribución de los valores que esta puede tomar. Esta prueba se utiliza para comparar mediciones en las que el valor numérico no tiene significado y sólo se puede ordenar los datos del menor al mayor, sin que sea posible determinar que tan grande es la diferencia.

(2) Prueba de Wilcoxon (no paramétrica). Analiza tanto la dirección como la magnitud de las diferencias entre dos grupos de medidas. Esta es una prueba más poderosa que la del signo porque, en el cálculo de la significancia, asigna más peso a los pares de mediciones

cuya diferencia sea mayor. La utilización de esta prueba esta justificada porque el método de estimación que desarrollamos permite colocar la intensidad de la ilusión en una escala de valores ascendentes, es decir, podemos saber en que pareja de valores (intensidad a 0° y a 45°) la diferencia es mayor.

(3) Prueba de t para muestras dependientes (paramétrica). Esta prueba es la más sensible a las diferencias entre los pares de valores analizados (intensidad a 0° y a 45°) pero, a su vez, es la que más suposiciones hace sobre las poblaciones muestreadas: supone que son normales y tienen la misma varianza.

Tabla 1. Nivel de significancia de la anisotropía en los valores de intensidad de la ilusión de Hermann a 0° y 45°. Los valores en negritas indican significancias menores a 0.05. Los valores de detección de los experimentos control no muestran anisotropía significativa; “n” indica el número de parejas de valores (0° y 45°) que fueron analizadas.

Prueba	Nivel de significancia (p) de las diferencias entre los valores de intensidad de la ilusión a 0° y 45° de orientación		
	Trama de Hermann llena (n=35)	Trama de Hermann hueca (n=42)	Control (n=21)
t muestras dependientes	0.00001	0.0003	0.95
Wilcoxon	0.00001	0.0008	0.59
Signo	0.00001	0.0058	0.82

Los resultados de las cuatro pruebas estadísticas seleccionadas (tabla 1) indican que las intensidades de las ilusiones llena y hueca son significativamente distintas a 0° y 45° de inclinación. Además, los experimentos control muestran que las diferencias en intensidad de la ilusión para 0° y 45° no pueden explicarse por una anisotropía en el método de estimación ni por un cambio de criterio de los sujetos para las dos condiciones.

V. *Discusión general*

El resultado más importante de este trabajo es haber mostrado que la ilusión de Hermann es sensible a la orientación de la trama. La ilusión es más fuerte cuando la trama se presenta en orientación horizontal-vertical que cuando se presenta con orientación diagonal.

Demostrada la dependencia de la ilusión a la orientación, una pregunta sigue de manera inmediata, ¿a qué se debe la anisotropía de la ilusión de Hermann? Para tratar de responderla discutiremos los factores que podrían inducir anisotropías en el procesamiento visual del humano y otros primates:

- errores de refracción del ojo,
- estructura elíptica de los CRcp de las células ganglionares de la retina,
- modulación del tálamo, preferente a orientaciones cardinales (horizontal-vertical),
- influencia de procesamiento cortical superior en procesos de bajo nivel.

Estos factores se discuten a continuación.

V.1 Posibles explicaciones a la anisotropía de la ilusión Los errores de refracción en el ojo

La anisotropía de la ilusión podría deberse a errores refractivos en los ojos. El astigmatismo es un error refractivo de la córnea en el que esta no es esférica sino toroidal o esfero-cilíndrica. Esto provoca que los rayos de luz en plano paralelo al eje toroide tengan diferente foco que los rayos en plano perpendicular (Mitchell, 1974). Se dice que el astigmatismo es "con la regla" cuando el meridiano vertical es más convergente que el horizontal (70% de los casos). El astigmatismo es "contra la regla" cuando ocurre lo contrario (15% de los casos). El astigmatismo es oblicuo cuando el meridiano de mayor potencia está inclinado (Malacara, 1989).

Para descartar la influencia de los errores refractivos como explicación de la anisotropía de la ilusión, a los sujetos que participaron en los experimentos se les realizaron pruebas de agudeza visual (ver apéndice III). Las pruebas con las cartas de Snellen muestran que los sujetos (exceptuando el ojo de izquierdo de uno de ellos) poseen agudeza visual normal. Tres de ellos presentan astigmatismo ligero (no interfiere en la capacidad de distinguir letras) en uno o ambos ojos, en distintas orientaciones. Debido a que el astigmatismo detectado es pequeño y a que se presentó sólo en 3 de los 7 sujetos y en diferentes orientaciones cada uno, descartamos la posibilidad de que este error refractivo sea la causa de la anisotropía de la ilusión, en la cual, la intensidad es siempre mayor a 0°, independientemente de la dirección del astigmatismo de los sujetos.

La estructura de los CRcp retinianos

Si la ilusión de Hermann se generase en la retina, tal como sugiere la explicación convencional, la manera más inmediata de explicar la anisotropía de la ilusión sería postular la existencia de CRcp de forma elíptica (Fig. 23). Si los campos estuvieran

orientados como se muestra en la figura 23A la reducción en intensidad sería fácilmente explicable por el cambio en la relación de las áreas excitatorias e inhibitorias que son activadas por la luminancia de la trama (Fig. 23B). Los estudios sobre la arquitectura funcional de la retina en gatos y primates han demostrado que los CRcp son, efectivamente, elípticos. Se sabe que el 88% de las células ganglionares de la retina del gato (Leventhal y Schall, 1983) y el 89% de la información que llega al NLG proveniente de las células ganglionares de primates, tiene CRcp elípticos. Sin embargo, estos campos receptivos no están arreglados como en la Fig. 23A sino que están orientados con su eje mayor apuntando a la fóvea (Fig. 23C) (Smith et al, 1990). La relación entre las áreas excitatorias e inhibitorias que se activan mediante la luz de las franjas de la trama no cambia con la orientación como (ver Fig. 23 C y D). Estas consideraciones sugieren que el origen de la anisotropía de la ilusión de Hermann no esta en la retina sino en estructuras de procesamiento superior.

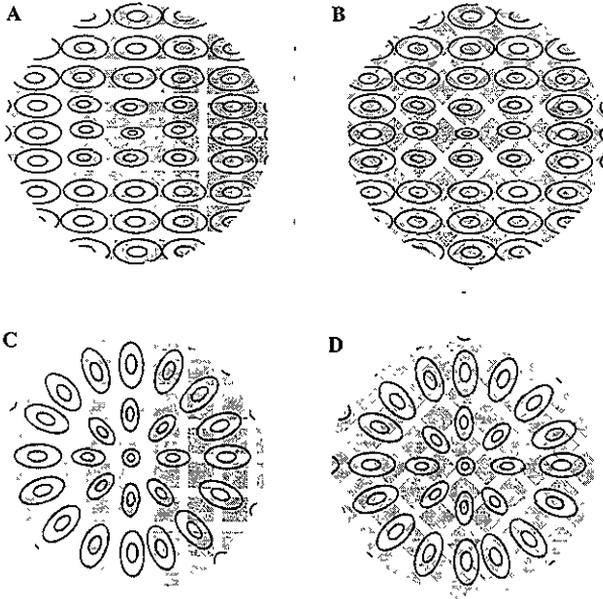


Figura 23. Esquema de la trama de Hermann proyectada sobre CRcp de células ganglionares. Campos receptivos centro-periferia elípticos con un arreglo como el que se esquematiza en A podrían explicar la reducción en intensidad de la ilusión de Hermann. Al inclinar la trama (B) la periferia inhibitoria recibiría menos luz e inhibiría en menor grado el centro de cada CRcp, disminuyéndose el efecto de oscurecimiento en las intersecciones. Sin embargo, la evidencia actual sobre la geometría y arreglo de los CRcp retinianos (Smith *et al.*, 1990) indica que estos campos son efectivamente alargados pero con el eje mayor apuntando hacia la fóvea (C). La relación excitación-inhibición de CRcp con este arreglo no cambia con la orientación de la trama (D), por lo tanto, ni la geometría ni el arreglo de los CRcp retinianos explica la reducción de la intensidad de la ilusión cuando el patrón se presenta en orientación diagonal.

El núcleo lateral geniculado

En la vía visual principal, la información luminosa transducida por los receptores (conos y bastones) de la retina converge en las células ganglionares cuyos axones forman el nervio óptico que proyecta hacia el NLG. El NLG es la primer estructura donde la transmisión de la información visual puede ser modulada por la corteza y por otros núcleos talámicos. La importancia de esta modulación potencial se revela por el hecho de que solamente el 20% de las de las aferencias sinápticas del NLG pertenecen a los axones que envían las células ganglionares de la retina (McIlwain, 1998). El resto de la información que llega al NLG proviene del tallo cerebral y de la corteza visual. De esta manera, la modulación de la transmisión de la información visual en el NLG podría originar la anisotropía en la ilusión de Hermann. Esta modulación puede deberse a estructuras que analizan características globales de en la composición de las imágenes, tales como la orientación (“top-down modulation”) (He, Cavanagh, Intrilligator, 1996). Sin embargo, la estructura de los campos receptivos de las células del NLG refleja, prácticamente sin cambios, la estructura de los campos receptivos centro periferia de las células ganglionares (Smith *et al*, 1990; Shapley, comunicación personal). Por esta razón, consideramos improbable que el origen de la anisotropía de la ilusión de Hermann este en el NLG.

La corteza visual primaria

Hubel y Wiesel (1952) mostraron que las respuestas de las neuronas en el área V1 de la corteza visual son selectivas a la orientación de los estímulos en la retina (Wurtz y Kandel, 2000). Estudios recientes sugieren que existe un mayor número de neuronas que responden preferentemente a contornos orientados horizontal y verticalmente y que el área dedicada al procesamiento de la información con estas orientaciones es mayor (Furmanski y Engel, 2000) que el área que responde a estímulos con orientación diagonal. Se piensa que esta diferencia en la cantidad de recursos dedicados al análisis de la orientación está relacionada con el menor desempeño en la percepción de información visual diagonal, fenómeno conocido como efecto oblicuo. Este efecto, que se ha encontrado en animales tan diversos como pulpos, peces, ratas, gatos y chimpancés, consiste en una reducción del desempeño en tareas de detección de contraste, poder de resolución, discriminación de la orientación y agudeza de Vernier cuando la información se presenta en orientación diagonal (25% a 50% dependiendo de la tarea, Furmanski y Engel, 2000; Coppola et al, 1998). Podemos decir entonces, que la dependencia a la orientación de la ilusión de Hermann, medida en este trabajo, se suma a las observaciones englobadas bajo el término de efecto oblicuo.

Dado que hemos descartado el origen de la anisotropía de la ilusión en estructuras anteriores a la corteza (retina y NLG) proponemos que la anisotropía -y probablemente la ilusión misma- se está originando en la corteza visual primaria o en regiones visuales posteriores.

V.2 El origen de la ilusión y su anisotropía. Implicaciones para los modelos actuales de percepción

La evidencia generada en este trabajo sobre la dependencia a la orientación de la ilusión de Hermann y la evidencia discutida en los apartados anteriores sugiere la posibilidad de que la ilusión no se genere por los campos receptivos centro-periferia de las células ganglionares de la retina como se había propuesto en la explicación original (Baumgartner, 1990). La estructura de los campos receptivos de las células del NLG refleja, prácticamente sin cambios, la estructura de los campos receptivos centro-periferia de las células ganglionares de la retina así que consideramos poco probable que el origen de la anisotropía se encuentre en el NLG Smith *et al.*, 1990. La corteza visual primaria (V1) es la primera área del sistema nervioso donde la información sobre características globales de las imágenes parece ser codificada (Hubel y Wiesel, 1952; Wurtz y Kandel, 2000). Esta estructura (V1) y las que le siguen en la jerarquía del procesamiento visual (V2, V4, MT) son lugares posibles para el origen de la ilusión de Hermann y de su anisotropía. De acuerdo con esta hipótesis está la evidencia de que el área cortical de V1 dedicada al procesamiento de la información diagonal es menor que el área que analiza información en orientación cardinal (horizontal-vertical) (Furmanski y Engel, 2000).

Ayudando la noción de que la retina no es el lugar donde se origina la anisotropía ni la propia ilusión de Hermann, existen trabajos en los que se propone que la actividad eléctrica de las células ganglionares no se relaciona directamente con la percepción de luminancia (Rossi y Paradiso, 1999; Knill y Kersten, 1991; Mershon, 1972). La evidencia anterior, junto con la presentada en este trabajo sobre la influencia de la orientación en la ilusión de Hermann, plantean la necesidad de revisar la explicación de la ilusión en términos de CRcp retinianos así como de otros fenómenos de percepción de luminancia como las bandas de Mach. Es necesario revisar también los modelos computacionales que intentan explicar los fenómenos de percepción de luminancia mediante el procesamiento que se realiza en las primeras etapas del sistema visual (p. ej. Grossberg y Todorovic, 1988; Linsker, 1988; Anderson, 1995). Además del incremento local del contraste, otra función que se ha atribuido a los CRcp - que debería recibir más atención, es la de control de ganancia automática (Shapley y Enroth-Cugell, 1984). La periferia inhibitoria controlaría la tasa de disparo inhibiendo a la célula ganglionar en condiciones de luz abundante (escotópica) asegurándose de que la respuesta celular a altas cantidades de luz no se sature. En condiciones de luz tenues, la inhibición sería casi nula y las células ganglionares responderían a pequeñas cantidades de luz. Bajo este esquema, los CRcp habrían evolucionado para que el sistema visual respondiera eficientemente en condiciones extremas de luz. Debemos considerar, entonces, posibles funciones alternativas a los CRcp retinianos, además, la evidencia generada en este trabajo sobre la influencia de la orientación en la ilusión de Hermann y la incapacidad de los CRcp para explicar esta anisotropía apuntan a que la suposición de que la percepción del contraste es una función de bajo nivel debe ser revisada. Todo apunta hacia la hipótesis de que aún en los fenómenos más sencillos de percepción visual (determinación de la luminancia de una imagen) la interpretación de características globales (como la orientación de la imagen) influye en el análisis de las características básicas y locales.

VI. Conclusiones

- El sistema desarrollado en este trabajo (programa de computadora e instalación experimental) cumplió con el objetivo propuesto: estimar cuantitativamente la intensidad de la ilusión de Hermann y su dependencia a la orientación.
- Con este sistema, se comprobó cuantitativamente que la intensidad de la ilusión de Hermann llena se reduce cuando el patrón se presenta con orientación diagonal.
- En este trabajo se midió, por primera vez, la intensidad de la ilusión de la trama de Hermann hueca y se demostró que también es sensible a la orientación.
- La evidencia sobre la arquitectura funcional de la retina indica que la anisotropía en la ilusión no se explica mediante los campos receptivos centro periferia de las células ganglionares de la retina.
- La dependencia a la orientación de la ilusión de Hermann es más fácilmente explicable si la ilusión se produjese en estructuras superiores (áreas corticales visuales V1, V2, V4, MT) y no en la retina, como se ha propuesto tradicionalmente (Baumgartner, 1990).
- Los resultados de este trabajo se suman a los de otros (Rossi y Paradiso, 1999; Knill y Kersten, 1991; Shapley y Enroth-Cugell, 1984) en los que se cuestionan los procesos de percepción de luminancia como una función de bajo nivel, es decir, que se relaciona linealmente con la actividad de las células ganglionares de la retina. Surgen entonces, preguntas sobre el papel de los campos receptivos centro-periferia de la retina; sobre la razón de la anisotropía en la percepción de luminancia y sobre las posibles funciones o consecuencias que esta anisotropía tiene en los animales.

APENDICE I. Estructura y fisiología de la retina

La capa de receptores de la retina está formada por dos tipos celulares sensibles a la luz: los conos y los bastones. Los bastones poseen sólo un tipo de molécula receptora a la luz (rodopsina) por lo que únicamente pueden señalar cambios de luminancia en una banda restringida y continua de longitud de onda. Dado que los bastones no pueden indicar diferencias en la composición de longitudes onda, sino únicamente diferencias en intensidad luminosa, los bastones participan exclusivamente en la visión monocromática. En cuanto a los conos, existen tres tipos que poseen uno de tres pigmentos fotosensibles, (llamados colectivamente opsinas de conos) que absorben radiaciones en longitudes cortas, medianas y largas que corresponden a la percepción del azul, verde y rojo, respectivamente. La señal combinada de estos tres receptores genera la percepción del color. Los bastones son extremadamente sensibles a la luz y su actividad se satura con valores de luminancia por arriba de 2 ó 3 cd/m^2 (Purves *et al*, 1997). Debido a las condiciones de luminancia utilizadas en este trabajo podemos decir que la percepción de las tramas de Hermann utilizadas en los experimentos se debe predominantemente a las señales del sistema conos de la retina.

En la retina, la información de varios receptores converge en las células ganglionares por lo que cada célula ganglionar posee un campo receptivo definido por los fotorreceptores de los que recibe información y por el área que estos ocupan en la retina (ver figura 2, Introducción). En la retina de los primates existen dos tipos principales de células ganglionares que se distinguen por la dinámica de su respuesta a estímulos luminosos: las células ganglionares M responden de manera transitoria a un estímulo luminoso sostenido, responden óptimamente a objetos grandes y pueden seguir los cambios rápidos en los patrones de luminancia (Tessier-Lavigne, 2000). Las células ganglionares P poseen campos receptivos más pequeños y responden de manera sostenida a un estímulo luminoso sostenido en sus campos receptivos. El diámetro de los campos receptivos centro-periferia de las células M y P varía con la excentricidad. El tamaño promedio de los campos receptivos de la retina de los primates, para un área de 10° de radio con centro en la fóvea, se muestra en la figura A.I.1.

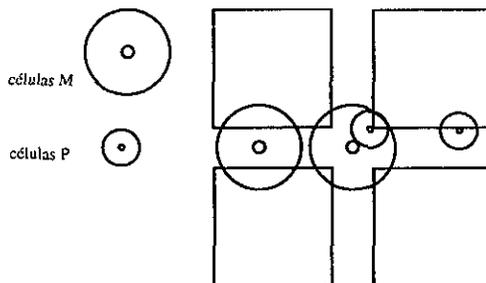


Figura A.I.1. Tamaño de los campos receptivos centro-periferia de las células ganglionares M y P con relación al tamaño de la trama de Hermann utilizada en los experimentos de respuesta forzada de dos opciones (ver Métodos sección IV.3). Se muestra el tamaño promedio de los campos receptivos de un área de 10° de radio con centro en la fóvea (dibujada a partir de los datos de Croner y Kaplan, 1995)

Las células tipo P representan el 80% de la población de las células ganglionares y son más abundantes cerca de la fóvea (figura 3 de Croner y Kaplan, 1995). El pequeño tamaño de los campos receptivos de la fóvea probablemente sea la causa de que la ilusión de Hermann sea difícil de percibir en las intersecciones de la trama que se miran directamente (figura 6, Introducción).

Dada la distribución de la densidad de conos en la retina (decreciente con la excentricidad) y el tamaño de los campos receptivos (creciente con la excentricidad) los centros de los campos receptivos de las células P (para los primeros 10° de excentricidad) resultan de la convergencia de información de unos 30-40 conos y la periferia resulta de la convergencia de unos 800 ó 900 conos. El centro del campo receptivo de las células ganglionares M está formado por más o menos 180 y la periferia por la convergencia de información de unos 8000 conos (estimaciones calculadas a partir de Croner y Kaplan, 1995; Purves *et al*, 1997; Sterling, 1998; y Tessier-Lavigne, 2000).

La estructura de la retina y su relación con la ilusión de Hermann se sintetiza en el modelo de la figura A.I.2, utilizado para explicar la ilusión de Hermann (figura 7, Introducción; Baumgartner, 1990). La célula ganglionar B recibe dos veces más inhibición lateral que la célula A, lo cual provocaría la percepción de menor luminancia en las intersecciones de la trama de Hermann.

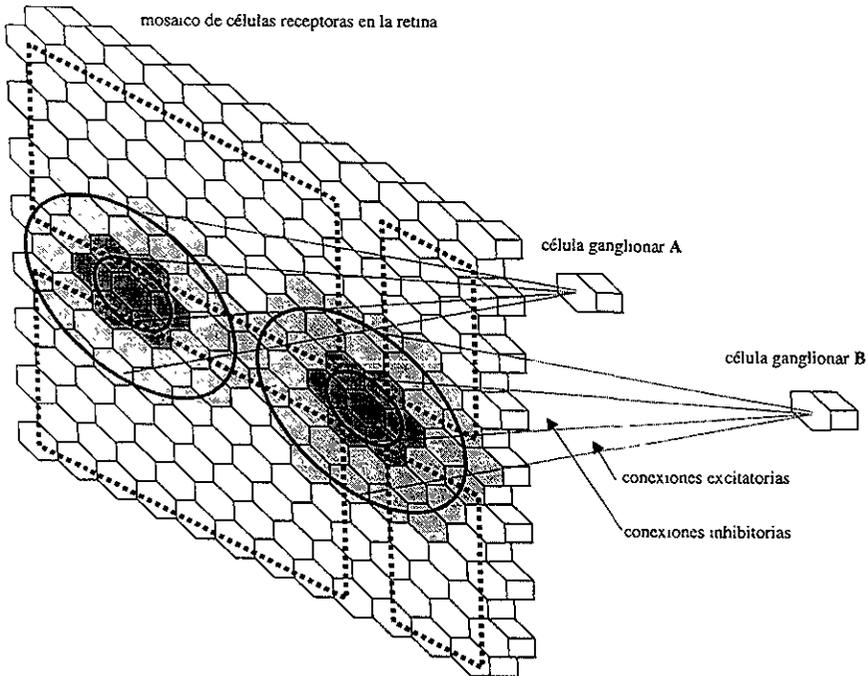


Figura A.I.2 Modelo del funcionamiento de los campos receptivos y su relación con la trama de Hermann. En la figura se muestran dos células ganglionares hipotéticas que reciben información de dos grupos de

receptores que, mediante las conexiones excitatorias centrales e inhibitorias laterales, conforman las áreas centro y periferia de los campos receptivos. La diferencia en la inhibición lateral que reciben las dos células ganglionares se propone como la base para la percepción de los oscurecimientos ilusorios en las intersecciones de la trama de Hermann (ver Introducción).

Sin embargo, es necesario subrayar que la explicación propuesta en la figura A.I.2 es una simplificación del conocimiento que se tiene de la estructura y fisiología de la retina. Cabe que destacar que en este modelo se muestran dos campos receptivos cuyas dimensiones maximizan la diferencia en inhibición lateral ente las dos células ganglionares y, por lo tanto, maximizan la intensidad de la ilusión de Hermann. Los datos sobre la estructura de los campos receptivos de la retina de los primates (Croner y Kaplan, 1995) no muestran la existencia de campos receptivos con esas dimensiones. Por esta razón, los dos campos mostrados en la figura A.I.2 intentan representar dos poblaciones de células ganglionares con campos receptivos que se sobrelapan.

La verificación de estas suposiciones espera ser comprobada. Para ello, podrían utilizarse modelos computaciones que calculen los patrones de salida de una red de receptores y células ganglionares (con las dimensiones y arreglo de los campos receptivos reportados en la literatura) cuando se le presentan tramas de Hermann como entrada.

APENDICE II. Diseño del programa de computadora.

El área de graficación del monitor se manejó como un plano complejo en el que las coordenadas de los puntos que forman una imagen se representan como la parte real e imaginaria de los componentes de un vector complejo. Esta representación permite que algunas transformaciones a las imágenes se realicen mediante operaciones sencillas (De Lafuente, Ruiz, 2000). Para construir una trama de Hermann, el programa genera primero un cuadrado con centro en el origen del plano complejo (en el centro del monitor). Los puntos de los vértices y los lados del cuadrado se representan mediante números complejos z_1, z_2, \dots, z_n , con los que se forma un vector \mathbf{v} definido como:

$$\mathbf{v} = [z_1, z_2, \dots, z_n]$$

donde:

$$z_j = x_j + y_j i$$

coordenadas del j -ésimo punto en el plano complejo, x_j es la parte real (coordenada horizontal), y_j es la parte imaginaria (coordenada vertical).

n

número de puntos que forman un cuadrado.

$$i = \sqrt{-1}$$

El cuadrado cuyos puntos están contenidos en el vector \mathbf{v} se multiplica por una variable real a que determina el tamaño final del cuadrado, después, se les suma un número complejo d con las coordenadas que el cuadrado ocupará en la pantalla. Este procedimiento se repite hasta llenar el área de graficación con los cuadrados que forman la trama de Hermann. Los puntos que forman los cuadrados de la trama se representan entonces mediante una matriz \mathbf{W} definida como:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{w}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{w}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a\mathbf{v} + d_1 \\ a\mathbf{v} + d_2 \\ \vdots \\ a\mathbf{v} + d_m \end{bmatrix}$$

donde:

- \mathbf{w}_m vector que contiene los puntos del cuadrado con su posición y tamaño corregidas,
- \mathbf{v} vector que contiene el cuadrado original,
- a factor que define el tamaño de los cuadrados,
- d_m número complejo con las coordenadas del k -ésimo cuadrado. Este parámetro determina la separación entre los cuadrados,
- m número de cuadrados en la trama.

La trama de Hermann (matriz \mathbf{W}) se presenta en la pantalla graficando el componente real contra el imaginario de esta matriz. Las tramas hueca y llena se grafican utilizando una función de MATLAB que puede graficar sólo el perímetro o también el área de los cuadros definidos en \mathbf{W} .

Para graficar la trama de Hermann con una orientación θ dada, la trama W se rota mediante la siguiente función:

$$U = f(W) = W \cdot e^{i \theta \pi / 180} \tag{1}$$

donde:

- W matriz que contiene la trama original
- U matriz que contiene la trama transformada
- θ orientación de la trama

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Para asegurar que las características del monitor (brillo, contraste, tamaño y posición horizontal y vertical del área de dibujo) fueran siempre las mismas en cada experimento, el programa se diseñó con varias rutinas de calibración. Cada vez que el programa se ejecuta se grafican líneas horizontales, verticales y diagonales y, mediante el ajuste de los parámetros de la geometría de graficación del monitor, se verifica que efectivamente las líneas presentadas en la pantalla sean líneas rectas, para cualquier orientación. A continuación aparecen cuatro cuadros con 0, 33, 66 y 100% del blanco máximo del monitor. Utilizando un fotómetro para medir la cantidad de luz emitida por estos cuadros se ajusta el brillo y el contraste del monitor de manera que la luminancia en candelas por metro cuadrado corresponda efectivamente al 0, 33, 66 y 100% de la luminancia máxima del monitor calculada en la fase de calibración de luz (Apéndice II).

APENDICE III. Calibración del monitor

Para controlar la luminancia de las imágenes utilizadas fue necesario conocer la luminancia de los 256 tonos de gris que el monitor puede presentar. Para obtener la luminancia en cd/m^2 de los tonos de gris se utilizó un exposímetro (Sekonic L-508) con el cual se midió la luminancia de 31 tonos de gris a lo largo del intervalo de funcionamiento de un monitor Hewlett-Packard. A estos datos se les ajustó una función que permitió interpolar la luminancia del resto de los tonos (Fig. A.III.1). Entre varias funciones probadas la que mejor se ajustó a los datos fue:

$$\text{luminancia} = \left(\frac{\text{tono de gris}}{a} \right)^2 + b$$

donde:

a, b parámetros de ajuste.

Los parámetros de la función se calcularon utilizando el algoritmo de minimización simplex (Nelder y Mead, 1965) incluido en el programa MATLAB. La función de error que definimos para ser minimizada por el algoritmo fue:

$$\text{error} = \left| \log_{10}(\text{datosLuminancia}) - \log_{10}(\text{valoresObtenidosdeLaFuncionAjustada}) \right|$$

Se utilizó la diferencia entre los logaritmos reducir el peso de los errores de los mayores valores de luminancia y producir un buen ajuste en toda la gama de tonos de gris que maneja MATLAB.

Datos sobre la luminancia de los 256 tonos de grises del monitor
Modelo $\text{luminancia} = (\text{tono de gris}/a)^2 + b$

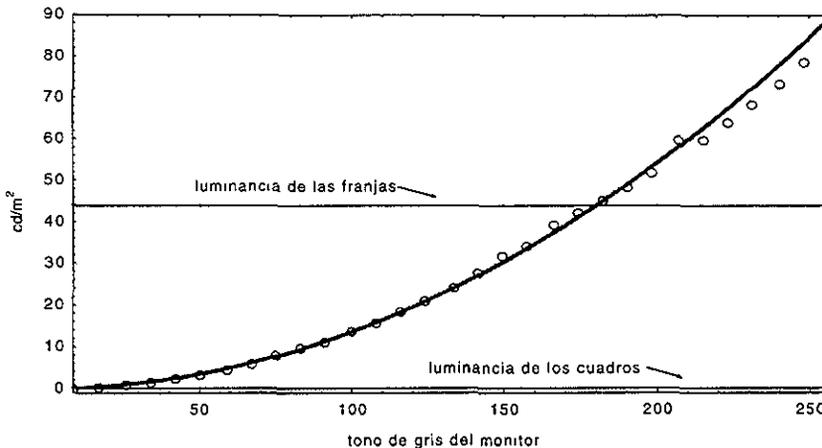


Figura A.III.1. Para calibrar el monitor se midió la luminancia de 31 tonos de gris del monitor. A estos datos se les ajustó una función que permitió la interpolación de la luminancia de todos los tonos gris utilizados por MATLAB

APENDICE IV. Pruebas de agudeza visual

Para determinar la agudeza visual de los sujetos que participaron en los experimentos se utilizaron las pruebas conocidas como carta de Snellen y reloj astigmático (Fig. IV.1). La carta de Snellen presenta letras de distintos tamaños. La prueba de agudeza visual consiste en determinar las letras más pequeñas que los sujetos pueden leer. El reloj astigmático consiste en un arreglo de líneas radiales en diferentes orientaciones. En esta prueba se les pide a los sujetos que indiquen la orientación de las líneas que se perciben con más definición, si es que alguna aparece más definida que las demás. Como en la carta todas las líneas tienen la misma definición, tamaño y contraste, las posibles diferencias detectadas por los sujetos se deben al astigmatismo. El astigmatismo es un error refractivo de la córnea (su forma no es esférica sino cilíndrica) que provoca que la calidad del enfoque de cada meridiano del ojo sea distinta y que por lo tanto el enfoque sea óptimo para uno de ellos y malo para el meridiano a 90° del óptimo.

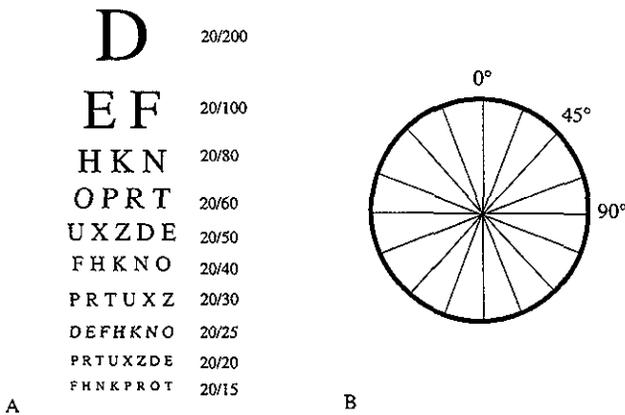


Figura IV.1. Esquema de las pruebas utilizadas para determinar la agudeza visual de los sujetos. En la carta de Snellen (A) se determina la capacidad de los sujetos para distinguir letras de determinado tamaño a una distancia de 6 m (20 pies). Un resultado de 20/20 indica que el sujeto está dentro de lo que se considera agudeza visual normal. En la prueba del reloj astigmático (B) se determina el meridiano de mayor potencia (donde las líneas se ven más definidas), que es perpendicular al eje en que se presenta astigmatismo.

De los siete sujetos que participaron en las pruebas de intensidad de la ilusión, 6 poseen agudeza visual normal en ambos ojos (definida como 20/20 de calificación en la prueba de la carta de Snellen). La prueba del reloj astigmático detectó que tres sujetos perciben diferencias en la definición de las líneas del reloj astigmático (tabla 2). Estas diferencias son debidas al astigmatismo. Sin embargo, podemos decir que el astigmatismo es pequeño ya que los resultados de la carta de Snellen muestran que estos tres sujetos poseen agudeza visual normal.

Tabla 2. Resultados de las pruebas de agudeza visual. Todos, excepto un sujeto (VI), poseen agudeza normal en ambos ojos (valor 20/20, determinado mediante la carta de Snellen). Las líneas dentro del círculo muestran el eje de mayor potencia en aquellos sujetos que percibieron diferencias en las líneas del reloj astigmático. Los círculos vacíos indican que no se percibieron diferencias

Sujeto	Ojo izquierdo		Ojo derecho	
	carta Snellen	reloj astigmático	carta Snellen	reloj astigmático
AL	20/20		20/15	
JD	20/20		20/20	
AD	20/20		20/20	
JA	20/20		20/20	
LI	20/20		20/20	
VI	20/25		20/20	
JL	20/20		20/20	

Dado que seis de los siete sujetos que participaron en las pruebas poseen agudeza visual normal, es posible descartar los errores refractivos como la causa de la anisotropía de la intensidad de la ilusión. Aunque los sujetos hayan percibido pequeñas diferencias en la definición de algunas líneas del reloj astigmático (tabla 2), la orientación de estas líneas no se correlaciona con el efecto de anisotropía en el que la intensidad de la ilusión es siempre menor cuando la trama de Hermann se presenta con 45° de orientación.

VII. Bibliografía citada

- Adelson, E. H. 2000. Lightness perception and lightness illusions, in: *The new cognitive neurosciences*, Ed. M. S. Gazzaniga, MIT Press. Cambridge, Mass. USA.
- Anderson, J. A. 1995. *An introduction to neural networks*. MIT. USA
- Baumgartner, G. (1990). Where do visual signals become a perception?. In: *The principles of design and operation of the brain*. Eds J Eccles, O Creutzfeldt (Pontificiae Academiae Scientiarum Scripta Varia, 78), pp 99-114.
- Bear, M. F., B. W. Connors, M. A. Paradiso. 1996. *Neuroscience. Exploring the brain*. Williams & Wilkins. U.S.A.
- Berbaum, K., C. S. Chung, 1981. Perceptive field sizes and a new version of the Hermann grid. *Perception*, 10: 85-89.
- Buchanan-Smith, H. M., D. W. Heeley, 1993. Anisotropic axes in orientation perception are not retinotopically mapped. *Perception*, 22:1389-1402.
- Callaway, E. M. 1998. Visual scenes and cortical neurons: what you see is what you get. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95:3344-3345.
- Campbell, F. W., J. J. Kulikowski, J. Levinson. 1966. The effect of orientation on the visual resolution of gratings. *J Physiol*. Nov;187(2):427-436.
- Coppola, D. M., H. R. Purves, A. N. McCoy, D. Purves. 1998. The distribution of oriented contours en the real world. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 95:4002-4006.
- Croner, L. S., E. Kaplan, 1995. Receptive fields of P and M ganglion Cells across the primate retina. *Vision Res.*, 35(1):7-24.
- Dacey, D., O. S. Packer, L. Diller, D. Brainard, B. Peterson, B. Lee. 2000. Center surround receptive field structure of cone bipolar cells in primate retina. *Vision Res.*, 40:1801-1811.
- De Lafuente, V.H. and Ruiz, O. A program for the study of Hermann illusion. Ninth Annual Computational Neuroscience Meeting. Julio de 2000. Brujas, Bélgica. Organizado por Jim Bower (California Institute of Technology) y Erik De Schutter (University of Antwerp, Bélgica).
- deCharms, R. C., M. M. Merzenich, 1998. Primary cortical representation of sounds by the coordination of action-potential timing. *Nature*, 381: 610-613.
- Furmanski, C. S., S. A. Engel, 2000. An oblique effect in human primary visual cortex. *Nat. Neurosci.* 3(6):535-536.
- Gary-Bobo, E., C. Milleret, P. Buisseret. 1986. Role of eye movements in developmental processes of orientation selectivity in the kitten visual cortex. *Vision Res.*, 26(4): 557-567.
- Goldstein, E. B. 1999. *Sensación y percepción*. International Thomson Editores. México.
- Grossberg, S., D. Todorovic, 1988. Neural dynamics of 1-D and 2-D brightness perception: A unified model of classical and recent phenomena. *Perception and psychophysics*, 43, 241-277.
- Hartline, H. K., H. G. Wenter, F. Ratliff. 1956. Inhibition in the eye of *Limulus*. *J Gen Physiol.* 39:651-673.
- He, S., P. Cavanagh, J. Intriligator. 1996. Attentional resolution and the locus of visual awareness. *Nature*, 383:334-337.

- Henry, G. H., A. Michalsky, B. M. Wimbome, R. J. McCart. 1994. The nature and origin of orientation specificity in neurons of the visual pathways. *Progress in Neurobiology*. Vol. 43, pp. 381-437.
- Hirsch, J., Curcio, C. A. 1989. The spatial resolution capacity of human foveal retina. *Vision Res.* 28(9): 1095-1101.
- Hubel, D. H., T. N. Wiesel. 1959. Receptive fields of single neurons in the cat's visual cortex. *J Physiol (London)* 184: 574-591.
- Knill, D. C., D. Kersten. 1991. Apparent surface curvature affects lightness perception. *Nature*, vol. 351, 228-230.
- Kuffler, S. W. 1953. Discharge patterns and functional organization of the mammalian retina. *J Neurophysiol.* 16:37-68.
- Leventhal, A. G., J. D. Schall. 1983. Structural basis of orientation sensitivity of cat retinal ganglion cells. *J Comp Neurology*, 220:465-475.
- Levine, J., L. Spillmann, E. Wolf, 1980. Saturation enhancement in colored Hermann grids varying only in chroma. *Vision Res.*, 20: 307-313.
- Lindsay, P. H., D. A. Norman. 1972. Human information processing. Academic Press. USA.
- Linsker, R. 1986. From basic network principles to neural architecture: Emergence of orientation columns. *Computer*, March. 110-118.
- Linsker, R. 1988. Self-organization in a perceptual network. *Computer*, March:105-17.
- Luce, R. D. y C. L. Krumhansl, 1988. Measurement, scaling, and psychophysics, en Steven's Handbook of Experimental Psychology., ed. R. C. Atkinson, R. J. Herrnstein, G. Lindzey and R. D. Luce. John Wiley and Sons. USA.
- Maffei, L., F. W. Campbell. 1970. Neurophysiological localization of the vertical and horizontal visual coordinates in man. *Science*, 167:386-387.
- Malacara, D. 1989. Optica básica. Fondo de Cultura Económica. México.
- McCarter, A. 1979. Chromatic induction effects in the Hermann grid illusion. *Perception*. Vol.8: 105-114.
- McIlwain, J. T. 1996. An introduction to the biology of vision. Cambridge University Press. U. S. A.
- Mershon, D. H. 1972. Relative contributions of depth and directional adjacency to simultaneous whiteness contrast. *Vision Res*, 12:969-979.
- Mitchell, D. E., F. Wilkinson. 1974. The effect of early astigmatism on the visual resolution of gratings. *J. Physiol*, 243, 739-756.
- Nelder, J. A. and R. Mead. 1965. "A Simplex Method for Function Minimization," *Computer Journal*, Vol. 7, p. 308-313.
- Ott, D., S. H. Seidman, R. J. Leigh. 1992. The stability of human eye orientation during visual fixation. *Neurosci Lett*, 142, 183-186.
- Pessoa, L. 1996. Mach bands: how many models are possible? Recent experimental findings and modeling attempts. *Vision Res*, 36(19):3205-3227.
- Pugh, M. C., D. L. Ringach, R. Shapley, M. J. Shelley. 2000. Computational modeling of orientation tuning dynamics in monkey primary visual cortex. *J Comput Neurosci* Mar-Apr;8(2):143-59.
- Purves, D., G. J. Augustine, D. Fitzpatrick, L. C. Katz, A. S. LaMantia, J. O. McNamara, 1997. Neuroscience. Sinauer. Massachussets, USA.

- Randall, D.,W. Burggren, K. French. 1998. Fisiología Animal, Mecanismos y Adaptaciones. McGraw-Hill Interamericana. España.
- Reid, R. C 1999. Vision, en: Fundamental neuroscience, Cap. 28. Ed. M. J. Zigmond, F. E. Bloom, S. C. Landis, J. L. Roberts, L. R. Squire. Academic Press. USA.
- Rossi, A. F., M. A. Paradiso. 1999. Neural correlates of perceived brightness in the retina, lateral geniculate nucleus, and striate cortex. *J. Neurosci*, Jul 15, 19(14):6145-6156.
- Ryer, A. 1997. Light measurement handbook. International light. USA.
- Troscianko, T. 1982. A given visual field location has a wide range of perceptive field sizes. *Vision Res.* Vol. 22, 1363-1369.
- Schrauf M, B. Lingelbach, E.R. Wist. 1997. The scintillating grid illusion. *Vision Res* Apr;37(8):1033-8.
- Shapley, R., C. Enroth-Cugell. 1984. Visual adaptation and retinal gain controls. *Prog. Retinal Res.* 3: 263-346.
- Shepherd, G. 1998. The synaptic organization of the brain. Oxford university press. USA.
- Siegel, S., N. J. Cstellan. 1995. Estadística no paramétrica. Ed. Trillas. 4ª ed. México.
- Smith, E. L. III, Y. M. Chino, W. H. Ridder III, K. Kitagawa, A. Langston. 1990. Orientation bias of neurons in the lateral geniculate nucleus of macaque monkeys. *Vis. Neurosci.*, 5, 525-545.
- Spillmann, L. 1971. Foveal perceptive fields in the human visual system measured with simultaneous contrast in grids and bars. *Pflügers Arch.*, 326:281-299.
- Spillmann, L., J. Levine. 1971. Contrast enhancement in a Hermann grid with variable figure-ground ratio. *Exp. Brain Res.* 13, 547-559.
- Spillmann, L. 1994. The Hermann grid illusion: a tool for studying human perceptive field organization. *Perception*, vol. 23,691-708.
- Sterling, P. 1998. Retina. In: The synaptic organization of the brain. 4th ed. G. M. Shepherd Ed. Oxford University Press.
- Tessier-Lavigne M, 2000. Visual processing by the retina. In: Principles of neural science. Kandel E.R., J. H. Schwartz, T. M. Jessel Ed. 4th ed. McGraw-Hill, USA:
- Underwood, J. B.1976. Psicología experimental. Biblioteca técnica de psicología, Trillas. México.
- Wade, N. J. 1978. Op art and visual perception. *Perception*, 7: 21-46.
- Westheimer, G.,B. L. Beard. 1998. Orientation dependency for foveal line stimuli: detection and intensity discrimination, resolution, orientation discrimination and vernier acuity. *Vision Res*,38(8):1097-1103.
- Wist, E. R., 1976. Dark adaptation and the Hermann grid illusion. *Perception and Psychophysics.* Vol. 20(1):10-12.
- Wolfe, J. M. 1984. Global factors in the Hermann grid illusion. *Perception*, vol. 13:33-40
- Wurtz, R. H., Kandel E. R. 2000. Central visual pathways. In: Principles in neural science. Kandel E. R., Schwartz, J. H., Jessell. T. M. McGraw-Hill. USA.
- Yu, C., D. M. Levi. 2000. Surround modulation in human vision unmasked by masking experiments. *Nat Neurosci.* 3(7):724-728.