

Predicción del valor motor ocular y la profundidad subjetiva en estereopsis visual

José Antonio Aznar
José Bayo
Universitat de Barcelona

En este trabajo partimos del constructo de «valor motor» asociado a las áreas retinianas estimuladas, en particular las que presentan grados de disparidad susceptibles de fusión. Mediante dos procedimientos, uno fundamentado en la óptica geométrica y otro en la psicofísica directa de Stevens, utilizando estereogramas de puntos aleatorios, se abordan tres objetivos. En primer lugar, obtener un ajuste lineal entre alguna transformación del indicador del valor motor de los movimientos oculares y el índice de disparidad binocular (IDB) propuesto. En segundo lugar, se diseña un experimento psicofísico que posibilite la elaboración de un modelo, basado en la regresión lineal, el cual permita predecir la estimación subjetiva de profundidad a partir del IDB. Finalmente, verificur el ajuste de ambas funciones, la obtenida desde una geometría euclídea y la obtenida a través de la psicofísica. Los resultados evidencian un ajuste lineal cuasi perfecto entre el valor motor y la estimación subjetiva de profundidad, según el IDB.

Palabras clave: Estereopsis, profundidad estereoscópica, estereogramas de puntos aleatorios, disparidad retiniana, percepción de la profundidad, medición psicofísica directa, emparejamiento de modalidad cruzada.

In this paper we start on the «motor-value» construct associated at the retinal's areas stimulated, especially those that show a degree of disparity in which the fusion is possible. By means of two procedures, one based in the geometric optic and another based in the Stevens' direct psychophysical methods, utilizing the random-dot stereogram, three objectives are dealt whit. First, to get a linear fit between some transformation of the motor-value sign relative at the eye movements and at the proposed binocular disparity index (DBI). Second, a psychophysical experiment is designed to allow the elaboration of a model, based in the linear regression, which permit us to predict the subjective depth estimated in function of BDI. Finally, to verify the fit between both functions, the obtained one from a euclidean geometry and the other obtained by psychophysicals pro-

cedures. The results show a nearly perfect linear adjustment between the motor-value and the subjective depth estimation, according to DBI.

Key words: Stereopsis, Stereoscopic depth, Random-dot-stereo images, Retinal disparity, Depth perception, Direct psychophysical measurement, Cross-modality matching.

La investigación perceptual en nuestros días, de acuerdo con Marr (1982), debe cimentarse en el pluralismo teórico-metodológico integrado. Particularmente, podríamos destacar tres aproximaciones al estudio de la problemática perceptiva, cuya confluencia de aportaciones está contribuyendo, en buen grado, a esclarecer y propiciar la comprensión de las cuestiones más relevantes que han sido planteadas, nos referimos a los acercamientos neurofisiológico, psicofísico y computacional-representacional.

Las investigaciones psicofísicas en visión binocular adquieren una gran relevancia ante la necesidad de verificar los hallazgos obtenidos merced a metodologías electrofisiológicas, especialmente las realizadas durante los tres decenios anteriores (Hubel y Wiesel, 1959, 1962, 1979; Barlow, Blakemore y Pettigrew, 1967; Poggio y Fisher, 1977; Crawford y Noorden, 1980, etc.). En efecto, las valiosísimas aportaciones procedentes de las citadas investigaciones se realizaron fundamentalmente recurriendo a ciertos mamíferos que, como el gato o los primates, se hallan dotados de sistemas visuales morfológicamente similares al de los seres humanos. Sin olvidar que, en los inicios de esta línea de experimentos, también se utilizaron otras especies muy distantes de la nuestra en la escala filogenética, como por ejemplo el octopus¹ (Sutherland, 1957), la rana² (Lettvin, Maturana, McCulloch y Pitts, 1959), etc.

En definitiva, las evidencias neurofisiológicas encontradas en el «modus operandi» del aparato visual de animales inferiores, filogenéticamente, al humano, han sido extrapoladas a este último, lo cual debe implicar una profunda fundamentación de estas ideas, desde la aproximación psicofísica.

Las investigaciones fisiologistas, merced al desarrollo tecnológico que permitió el registro de la actividad bioeléctrica de las neuronas, hicieron avanzar de forma notable el conocimiento del sistema visual. En este trabajo vamos a ocuparnos de un aspecto concreto del sistema visual humano, la estereopsis y el factor o clave binocular que, en opinión de numerosos autores (Julesz, 1964; Bishop, 1981, etc.), es condición necesaria y suficiente para elicitarla, a saber, la «disparidad retiniana».

Es sabido que la visión estereoscópica, al permitirnos obtener información sobre la profundidad respecto al observador y la distancia entre las superficies y objetos, desempeña un papel preponderante en la percepción del espacio y en la guía visual de la acción humana. Aunque puede extraerse monocularmente alguna información acerca de la profundidad, la estereopsis visual es una consecuencia de la visión binocular.

Por lo común, si exceptuamos el enfoque de la óptica ecológica (percep-

1. Molusco cefalópodo, vulgarmente conocido como pulpo.

2. Anfibio anuro.

ción directa) representado por Gibson (1950, 1966, 1979), se acepta que dicha información resulta inferida de la disparidad entre las dos imágenes bidimensionales de sendas retinas.

Parece ser que, para lograr la visión estereoscópica de profundidad, cada área de la retina debe tener asociados, al menos, dos parámetros relacionados con la disparidad y que se hallan interrelacionados. Uno, el signo o sentido de la disparidad que indica la dirección visual, de tal manera que a un cierto locus retiniano le corresponde un determinado locus en el espacio subjetivo del sujeto. Esta localización espacial depende de que se produzca simetría o asimetría, entre las dos retinas, del punto-imagen respecto a la fovea, lo que, a su vez, se deriva del hecho de que tal punto-imagen se halle situado bien más allá de la línea imaginaria que atraviesa el punto de fijación de la mirada u horóptero, lo que da lugar a disparidad no-cruzada, o bien más próximo del observador que dicho punto de fijación, lo que da lugar a disparidad retiniana cruzada. Por tanto, el signo de la disparidad vendrá determinado por la posición retinotópica del punto-imagen. El otro parámetro, la magnitud o cuantía de la disparidad, es la distancia que un punto imagen de una de las retinas debería trasladarse para que incidiese sobre un punto correspondiente en la otra retina. Dicha magnitud podría representar el valor que permita dirigir al globo ocular en la ejecución de un movimiento, que tendrá como consecuencia la fijación en la fovea del estímulo observado y al que suele denominarse «valor motor», siendo, este movimiento, en caso de producirse, uno de los más relevantes reflejos optomotores. Por tanto, tal valor motor se hallaría en función de la distancia entre el área retiniana estimulada y la fovea, de modo que a mayor distancia correspondiese mayor valor motor y viceversa. Es importante hacer notar que el movimiento, propiamente, no tiene que ser ejecutado necesariamente, pero que la evaluación, a nivel del córtex visual, de la amplitud del movimiento ocular que la disparidad produce, aporta, probablemente, una información determinante en la concepción del espacio subjetivo. Evidentemente, la estimulación de la fovea proporciona un valor motor nulo.

A fin de que una misma porción del estímulo excite ambas foveas simultáneamente, el sistema visual requiere un sensible mecanismo de ajuste, el cual tiene lugar mediante otros reflejos optomotores o psicomotores (movimientos oculares, diferenciados en sacádicos y fijaciones oculares).

En este sentido podemos afirmar que las «áreas retinianas correspondientes» son las que poseen igual valor motor. Y como cabía esperar, las investigaciones neurofisiológicas (Barlow, Blakemore y Pettigrew, 1967; Hubel y Wiesel, 1970) apoyan el hecho de que la integración de las áreas correspondientes tenga lugar en la corteza visual.

Mediante otro conocido reflejo optomotor denominado fusión, un estímulo dado que origina dos patrones de excitaciones (uno por cada ojo en la visión binocular), se percibirá con unicidad. Además, si bien la correspondencia de áreas retinianas es condición suficiente para producir la fusión, no obstante, ello no es condición necesaria, puesto que puede lograrse la fusión (estereoscópica o en relieve), dentro de ciertos límites, incluso entre áreas retinianas no correspondientes o dispares y que se hallan situadas en torno al horóptero (área de fusión de Pa-

num). Más allá de dichos límites no habría unicidad de imagen, sino diplopia. Aquí, la diferencia entre el valor motor indicado por las distintas coordenadas relativas a las proyecciones de un mismo punto-imagen sobre cada retina, permite al sistema visual calcular la posición espaciotópica de tal punto-imagen. En síntesis, mientras que la fusión permite localizar objetos en un plano bidimensional, la estereopsis lo hace en un plano tridimensional.

Ahora bien, es preciso señalar que se requiere cierto grado de similitud entre las dos imágenes, ya que cuando son claramente disímiles, en lugar de fusión, se produce rivalidad retiniana (Ogle, 1962). Si bien el sistema tolera determinados grados de disimilitud, por ejemplo, Julesz (1971) ha evidenciado visión estereoscópica ante estereogramas presentados dicópticamente que diferían en un 15 % del tamaño. También juega un papel de interés la similitud en cuanto al brillo de cada uno de los elementos del par estereoscópico, de manera que si ambos son iguales o uno más brillante que otro, se producirá fusión, pero si es más oscuro no. Estos fenómenos, fusión, rivalidad y estereopsis, pueden ponerse de manifiesto utilizando un estereoscopio.

Es importante resaltar que al ser estimuladas áreas retinianas correspondientes se informa al sistema visual sobre la dirección en que se halla localizado el estímulo, en tanto que al estimularse áreas dispares, se informa sobre la distancia o profundidad del estímulo. Más concretamente, cuando una porción del estímulo excita con disparidad áreas de hemirretinas temporales (una de cada ojo), puede provocar movimientos oculares convergentes; mientras que si son excitadas las dos hemirretinas nasales, los movimientos que pueden ser inducidos son divergentes. Sin embargo, si la porción del estímulo excita en ambos ojos la hemirretina derecha (en un ojo nasal y en otro temporal), puede provocar en cada ojo movimientos hacia la derecha y si se excitan las hemirretinas izquierdas de ambos ojos, éstos se pueden desplazar hacia la izquierda (Boring, 1933, 1942; Tudela, 1981; Goldstein, 1984; Marcos-Ruiz, 1992, etc.). Sin olvidar que, al proyectarse el estímulo sobre áreas dispares, se asignan valores motores diferentes en cada ojo, que la corteza visual conoce, tanto si se ejecuta el movimiento como si no. De este modo, si la disparidad retiniana suministra una información de movimientos convergentes y asimétricos en los dos ojos, el sistema visual interpretará que la porción del estímulo se halla «delante de» o «más próximo» que el punto de fijación de la mirada (horóptero); pero si la información aportada es de movimientos divergentes, la interpretación consiguiente será la de «detrás de» o «más lejos» que dicho punto de fijación.

Según Bishop (1981), la única ventaja, que no es poco, que ofrece la binocularidad frente a la visión monocular es la de permitir la posibilidad de ocurrencia de la estereopsis, la cual tiene lugar gracias a la excitación de puntos retinianos dispares contenidos en el área fusional de Panum.

El sentido de la estereopsis (exodisparidad=hacia fuera; endodisparidad=hacia dentro) viene determinado por el sentido de la disparidad horizontal de porciones del estímulo (hacia la derecha o hacia la izquierda, respectivamente), no influyendo apenas las disparidades verticales. Y, al parecer, los elementos informativos relevantes en la estereopsis son los contornos dispares, en cuanto

que facilitan los valores motores que representan el sentido y la magnitud de los movimientos de vergencia (convergencia o divergencia).

La utilización, en experimentos psicofísicos, de estereogramas de puntos aleatorios generados por ordenador, los cuales no contienen otras claves sobre la profundidad que la disparidad, permitió a Julesz (1964) extraer conclusiones de gran interés. Así, evidenció: a) que no se requieren claves monoculares para lograr la síntesis estereoscópica; b) que la estereopsis no depende del grado de familiaridad con los estímulos, ni apenas utiliza información de arriba-abajo; c) que la estereopsis puede lograrse antes del reconocimiento del objeto (estos estereogramas de puntos deben satisfacer la condición de que no sea visible la forma diseñada en la visión separada de cada ojo); d) que no se requiere la información cinestésica (propioceptiva) proporcionada por las claves de vergencia³ ocular. Ciertamente, los movimientos de convergencia ocular, y las consiguientes claves propioceptivas, pueden eliminarse mediante la utilización de brevísimas presentaciones taquistoscópicas de los pares estereos. El hecho de que el tiempo de percepción-atención del par estereo sea inferior a 50 ms hace que resulte improbable la ocurrencia de tales movimientos, lo que no debe confundirse con el valor motor, que representa el signo y la cuantía de la disparidad retiniana.

Por otra parte, además del desplazamiento horizontal de porciones homólogas de uno de los dos estímulos (o de los dos) y de la brillantez de los puntos homólogos, resultan relevantes otros factores tales como la distancia interpupilar del sujeto observador, la distancia de fijación de la mirada, la distancia del observador al par estereo, así como también se ha constatado (Larson, 1985; Castañé, Peris, Borrás y Rallo, 1992) una alta correlación entre «agudeza visual» y «estereoagudeza», evaluada mediante la obtención del umbral de profundidad u otras pruebas clásicas (Howard-Dolman; Timus-Stereo-Test y TNO).

Como señala Julesz (1964), las investigaciones en estereopsis se centraban, tradicionalmente, en cuantificar las relaciones entre disparidad retiniana y percepción de la profundidad. ¿En qué grado correlaciona el espacio real, físico u objetivo, con el espacio subjetivo interpretado por el perceptor?, ¿localizamos los objetos en la posición que realmente se hallan o, simplemente, en el lugar que nuestro sistema perceptual interpreta?, ¿en qué medida concuerdan sendas localizaciones? No obstante, desde los años 60, de acuerdo con Frisby (1979), el impulso experimentado en esta parcela ha incrementado considerablemente su comprensión en los tres frentes desde los que se aborda: neurofisiológico, psicofísico y computacional. Ello no implica que no queden aspectos por resolver, si bien los intentos de solución propuestos desde estos tres planos de investigación deberán ser concurrentes.

En efecto, uno de los principales problemas a los que se enfrenta la experimentación en estereopsis se refiere a explicar el mecanismo mediante el cual tiene lugar el emparejamiento apropiado de los «puntos» correctos de las dos imágenes retinianas, es decir, ¿cómo determina el córtex visual los pares apropiados

3. Se entiende por vergencia el ángulo formado por los ejes imaginarios que se ajustan a la dirección de la mirada por parte de cada globo ocular, pudiendo tener lugar: convergencia, divergencia o paralelismo (vergencia nula).

de puntos-objeto a fusionar (emparejar)?, cuestión a la que suele aludirse como «problema de la estereopsis global».

En esta línea, Marr y Poggio (1976) propusieron, desde una aproximación computacional-representacional, una solución informática a la que denominaron «algoritmo cooperativo», fundamentada en una teoría de cálculo que trataba de eludir la mayor dificultad, la de inhibir las falsas dianas. El propio Marr (1982) consideró, posteriormente, que ciertos datos provenientes de investigaciones psicofísicas (Julesz, 1971; Mayhew y Frisby, 1976) no encajaban en el planteamiento del cooperativismo, sugiriendo la posibilidad de que la información relativa a la disparidad fuese conducida por canales de estereoscopia que se ajustan a distintas frecuencias. Además, las investigaciones fisiológicas y clínicas de Richards (1970) parecen apoyar la idea de que los detectores estereo se hallen organizados en tres grupos diferenciados, según que el tipo de información contenida sea de convergencia, divergencia o vergencia nula (disparidad cero), lo cual parece verse confirmado por la neurofisiología.

Debido a estos argumentos, Marr y Poggio (1979) propusieron otra teoría de la fusión estereo basada en el emparejamiento a distintas escalas de resolución (filtraje de distintas frecuencias espaciales), según la cual serían los emparejamientos quienes controlarían los movimientos de vergencia de sendos ojos (valores motores), posibilitando que la información procedente de máscaras grandes aproxime a las más pequeñas a su rango de correspondencia. Dicho control de vergencia, en opinión de Marr (1982), podría ser directo (derivado de las propias neuronas de emparejamiento), indirecto (interviniendo como mediador el retén de memoria), o incluso, con mayor probabilidad de ambos tipos a la vez. Sin embargo, este segundo algoritmo, no cooperativo, de Marr y Poggio no parece ajustarse totalmente a la evidencia psicofísica disponible sobre la estereopsis.

Frisby y Mayhew (1980) y Mayhew y Frisby (1981) desarrollaron otro modelo computacional, en el cual los procesos de emparejamiento estereo se consideran íntimamente vinculados a la elaboración de descripciones en el bosquejo primario bruto, apartándose de la concepción de Marr sobre la estereopsis como un módulo independiente del procesamiento visual. Posteriormente, Pollard, Mayhew y Frisby (1985) propusieron otro algoritmo estereo alternativo (conocido por PFM), habiendo sido diseñado para mostrarse más acorde con los hallazgos psicofísicos, mediante la implementación de una regla acerca de qué emparejamientos de puntos debían tolerarse y cuáles evitarse. Estos algoritmos se basan en un procesamiento de abajo-arriba, sin considerar que puedan hallarse implicados otros procesos cognitivos, de más malto nivel, en el logro de la estereopsis, como habían sugerido Harris y Gregory (1973) y, ulteriormente, Ramachandran y Cavanagh (1985), en experimentos que utilizaban como pares estereo los denominados contornos subjetivos.

Ahora bien, dejando establecido que los emparejamientos de puntos-objeto determinan los valores motores de los movimientos oculares que pueden, o no, inducir las consecuentes vergencias, cabría considerar un isomorfismo entre las coordenadas de los vectores resultantes de las proyecciones geométricas de estereogramas de puntos aleatorios y la localización en profundidad sobre el espacio subjetivo humano. No obstante, habida cuenta de que la óptica geométrica se

desarrolla sobre un espacio euclidiano, en tanto que la retina presenta una forma abovedada (como una cúpula), deberíamos verificar, por un lado, si es posible un ajuste lineal de la función correspondiente a las coordenadas sobre las que se proyecta la imagen en un espacio plano, según el desplazamiento horizontal de uno de los elementos del par estereo, mediante algún tipo de transformación matemática aplicable a las coordenadas obtenidas geoméricamente. Por otro lado, deberíamos verificar qué función matemática se adecúa mejor a la función definida por el índice de disparidad establecido en el par estereo sobre la estimación subjetiva de profundidad de las personas. Finalmente, compararemos ambas funciones obtenidas, lo cual serviría de fundamento al isomorfismo entre la teórica imagen 2-D (geométrica) y la empírica imagen 2-D, que se forma en la retina, a partir de la cual se genera el esbozo primario en las etapas iniciales de la visión (procesamiento temprano). Estos tres objetivos establecidos, en definitiva, vienen a constituir la estrategia de verificación empírica de una serie de problemas que serán tratados en las páginas sucesivas. Tales problemas y la forma de abordarlos se expresan en los enunciados que, a continuación exponemos.

Dado el papel crítico que asignamos a los dos valores motores oculares (entendidos como una operativización de la disparidad retiniana) en la visión estereoscópica, ¿qué relación geométrica, entre los elementos implicados en la situación de percepción de estereogramas de puntos aleatorios, puede ser utilizada como indicadora de los hipotéticos valores motores oculares asignados por el córtex visual? Puede ser factible resolver esta cuestión mediante cálculo trigonométrico, a partir de la representación de dicha situación desde una geometría euclidiana clásica.

Una vez superada la cuestión relativa a la operacionalización del valor motor, se plantea un primer problema, ¿es posible obtener un ajuste lineal de la función definida por el citado indicador (valor motor ocular), calculado geoméricamente, según la disparidad binocular contenida en la situación estimular? Este problema puede resolverse mediante el tratamiento numérico propio del ajuste de curvas o funciones. Siendo posible aplicar alguna transformación numérica que permita linealizar la función trigonométrica obtenida.

Paralelamente al anterior, se plantea un segundo problema, ¿es posible develar la relación existente entre las disparidades binoculares mostradas a los sujetos y las estimaciones subjetivas (perceptuales) a que dan lugar? y en relación con ello, ¿resulta posible la obtención de una ecuación predictora de tales estimaciones subjetivas, a partir del grado de disparidad binocular? Evidentemente el abordaje del primer aspecto se fundamenta en el análisis correlacional (lineal o curvilíneo), en tanto que el segundo presupone satisfacer el supuesto de linealidad, o realizar, si procede, la transformación pertinente y aplicar, posteriormente, el modelo lineal de la regresión estadística. No obstante, a diferencia del problema anterior en el que los datos se generan geoméricamente, aquí se requiere diseñar un procedimiento psicofísico que permita registrar los juicios perceptivos de los sujetos.

Finalmente, en el caso de resolver satisfactoriamente los problemas precedentes, debemos analizar la relación existente entre ambas variables (valor motor y estimación subjetiva), al objeto de verificar su dependencia o independencia

y, consecuentemente, obtener la ecuación que permita predecir la estimación subjetiva de profundidad a partir del indicador del valor motor de los movimientos oculares.

PROBLEMA 1

¿Es posible obtener un ajuste lineal de la función definida por los indicadores de los valores motores, determinados por las coordenadas geométricas relativas (correspondencia-disparidad), y el índice de disparidad binocular?

Previamente debemos resolver la cuestión de hallar qué aspecto de la geometría plana, implícita en la situación, puede servir para obtener una operativización del constructo hipotético de «valor motor». Ciertamente, en las diferentes condiciones experimentales de disparidad binocular que pueden producirse, mediante nuestra adaptación de la técnica de los estereogramas de puntos aleatorios elaborada por Julesz (1964), intervienen los siguientes factores a considerar (véase una representación de los mismos en las Figuras 1 y 2).

1. Centro geométrico de las posiciones espaciales de los elementos del par estereo mostrados al sujeto:

- Elemento izquierdo del par estereo (E_1).
- Elemento derecho del par estereo sin disparidad ($E_{2,0}$).
- Elemento derecho del par estereo con disparidad ($E_{2,+n}$ o $E_{2,-n}$).

2. Distancias entre elementos relevantes de la situación estimular:

— Distancia que separa los dos elementos del par estereo cuando se produce correspondencia total de puntos homólogos del estímulo (no disparidad), es decir, cuando no existe desplazamiento de la porción central del estereograma derecho [Ej.: $DPE1 = d(E_1, E_{2,0})$].

— Distancia que separa los dos elementos del par estereo cuando se produce disparidad entre puntos homólogos del estímulo, es decir, cuando existe desplazamiento de la porción central del estereograma derecho [$DPE2 = d(E_1, E_{2,-n})$].

— Distancia interpupilar del sujeto perceptor [$DIP = d(PI, PD)$]. Siendo PI = centro de pupila izquierda y PD = centro de pupila derecha.

— Distancia que media entre la línea imaginaria que une los dos elementos del par estereo y la línea imaginaria que atraviesa las dos pupilas del sujeto (D).

3. Proyecciones geométricas:

- Línea que pasa por los puntos E_1 y PI (P_1).
- Línea que pasa por los puntos $E_{2,0}$ y PD (P_2).
- Línea que pasa por los puntos $E_{2,+n}$ y PD (P_3).

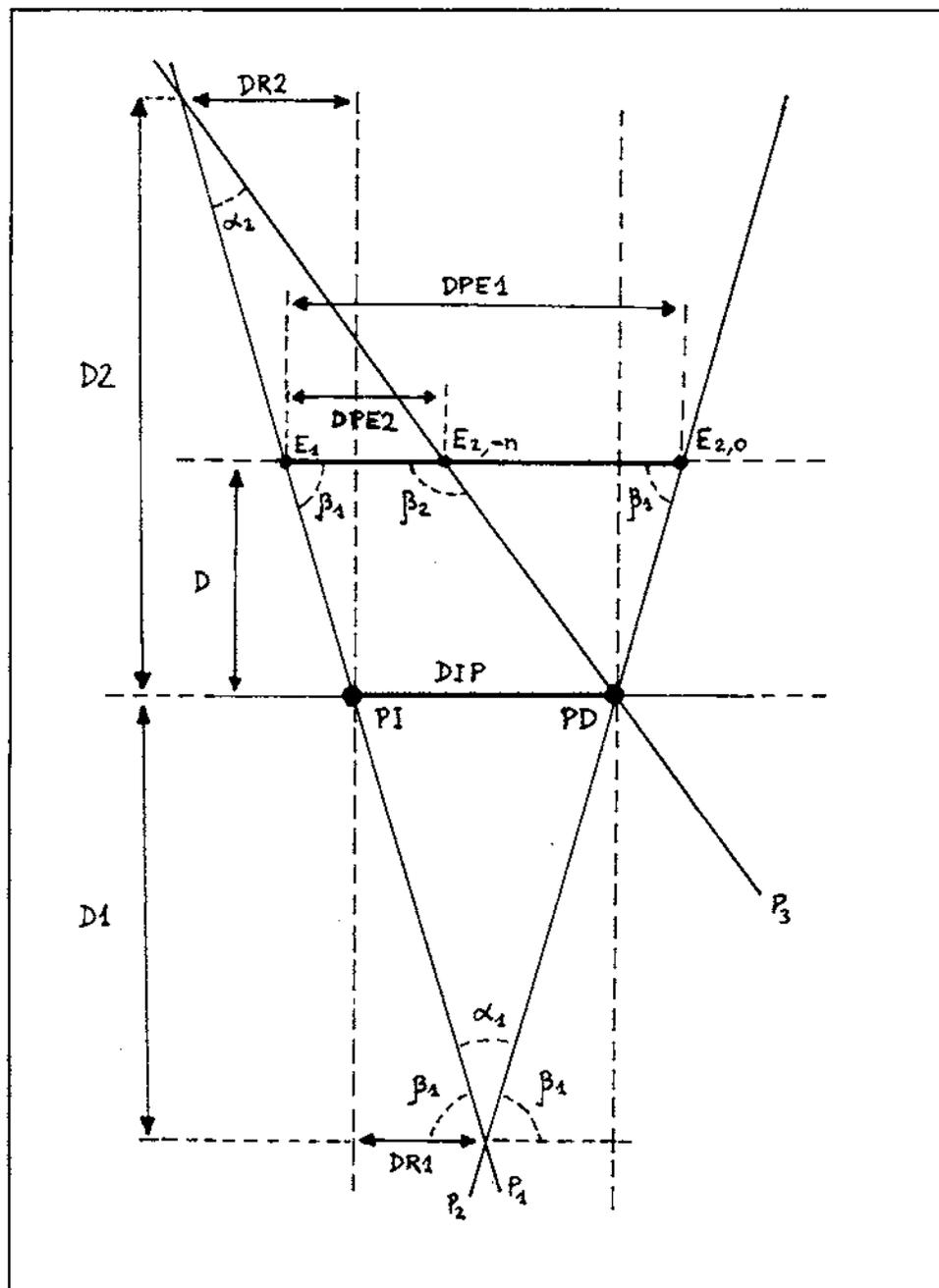


Figura 1. Representación según una geometría euclidiana de la situación estimular correspondiente al Caso 1, así como de las proyecciones, ángulos, distancias y coordenadas.

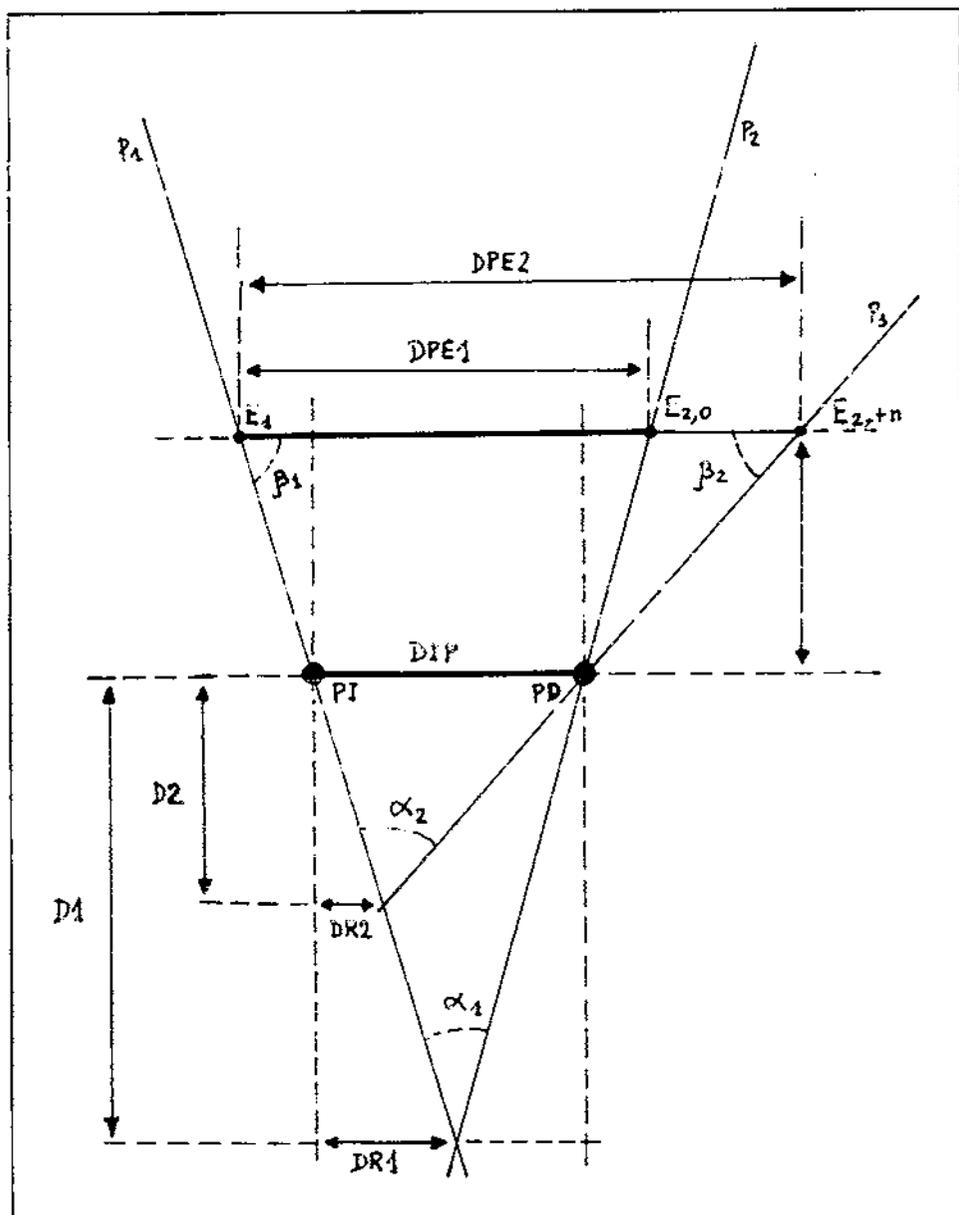


Figura 2. Representación según una geometría euclidiana de la situación estimular correspondiente al Caso 3, así como de las proyecciones, ángulos, distancias y coordenadas.

4. Ángulos:

— Ángulo comprendido entre la línea imaginaria que determina DPE1 (o DPE2) y la proyección P_1 (β_1).

- Ángulo comprendido entre la línea imaginaria que determina DPE1 (o DPE2) y la proyección P, (β).
- Ángulo comprendido entre las proyecciones P₁ y P₂ (α_1).
- Ángulo comprendido entre las proyecciones P₁ y P₃ (α_2).
- Ángulo de disparidad binocular: diferencia entre α_1 y α_2 (η).

5. Índice de disparidad binocular (IDB) obtenido mediante el cociente entre: $IDB = (DPE2 + DIP) / (DPE1 + DIP)$.

6. Coordenadas relativas de las supuestas proyecciones euclidianas sobre unas hipotéticas retinas planas:

6.1. Coordenadas relativas a un «punto de la fovea» sobre el que, euclidianamente, se proyectaría el centro geométrico del estereograma cuando, obviamente, exista correspondencia (DR1, D1):

— Distancia sobre la paralela a DIP que pasa por el vértice de α_1 , que media entre la perpendicular a DIP que atraviesa P1 y el vértice de α_1 (DR1).

— Distancia sobre la perpendicular a DIP que pasa por P1, que media entre la propia DIP y el vértice de α_1 (D1).

6.2. Coordenadas relativas del «punto periférico» sobre el que, euclidianamente, se proyectaría el centro geométrico del estereograma cuando, obviamente, exista disparidad (DR2, D2):

— Distancia sobre la paralela a DIP que pasa por el vértice de α_2 , que media entre la perpendicular a DIP que atraviesa P1 y el vértice de α_2 (DR2).

— Distancia sobre la perpendicular a DIP que pasa por P1, que media entre la propia DIP y el vértice de α_2 (D2).

En este supuesto espacio euclídeo, trataremos de verificar si estas coordenadas podrían considerarse como indicadores válidos de los «valores motores» asignados a los movimientos oculares por el córtex visual.

Por otra parte, si mantenemos constante la distancia entre el par estereo y la DIP (D), pueden presentarse diferentes condiciones experimentales de observación, las cuales dependerán de la relación de orden entre las distancias DPE1, DPE2 y DIP. Para simplificar, vamos a ocuparnos de aquella en la que $DIP < DPE1$. En esta condición pueden presentarse tres casos de interés:

Caso 1: $DPE2 < DIP < DPE1$.

Caso 2: $DIP < DPE2 < DPE1$.

Caso 3: $DIP < DPE1 < DPE2$.

En estos tres casos pueden calcularse, trigonométricamente, los factores de interés antes señalados (véanse Cuadro 1 y Cuadro 2), en particular las distancias, ángulos y coordenadas relativas. A partir de las fórmulas expuestas, generamos los valores correspondientes al índice de disparidad binocular (IDB) y los valores correspondientes a DR2 (distancia respecto a la fovea en presentación dispar) que, en nuestra opinión representa el valor motor del posible movimiento ocular, el cual (de producirse) posibilitaría la fusión.

Si hallamos los valores de estas variables (IDB y DR2), manteniendo constante la $DIP = 65$ mm (promedio humano), la $D = 240$ mm (distancia de observación), la $DPE1 = 72$ mm (distancia entre los dos estereogramas sin disparidad) y

hacemos fluctuar el desplazamiento horizontal del elemento izquierdo del par estereo (DPE2) en torno a 72 mm, por ejemplo en un intervalo entre 4-114 mm, al representarlos gráficamente en unos ejes cartesianos se observa una relación inversa entre IDB y DR2 (véase Figura 3).

CUADRO 1. FÓRMULAS TRIGONOMÉTRICAS CORRESPONDIENTES AL CASO 1

$$\beta_1 = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{D}{(DPE1 - DIP) / 2} \right]$$

$$\beta_2 = 180 - \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{D}{(\operatorname{ABS}(DPE2 - (DPE1 - DIP) / 2) - DIP)} \right]$$

$$\alpha_1 = 180 - 2\beta_1; \quad \alpha_2 = (\beta_1 + \beta_2) - 180; \quad \eta = \alpha_1 - \alpha_2$$

$$D1 = \frac{DIP}{\operatorname{tg}(\alpha_1)}; \quad D2 = \operatorname{tg}(\beta_1) * DR2$$

$$DR1 = \frac{D1}{\operatorname{tg}(\beta_1)}; \quad DR2 = \frac{(DIP * \operatorname{tg}(180 - \beta_2))}{(\operatorname{tg}(\beta_1) - \operatorname{tg}(180 - \beta_2))};$$

CUADRO 2. MODIFICACIONES PERTINENTES EN LAS FÓRMULAS CORRESPONDIENTES A LOS CASOS 2 Y 3

$$\beta_2 = \operatorname{tg}^{-1} \left[\frac{D}{(\operatorname{ABS}(DPE2 - (DPE1 - DIP) / 2) - DIP)} \right]$$

$$\alpha_2 = 180 - (\beta_1 + \beta_2)$$

$$DR2 = \frac{(DIP * \operatorname{tg}(180 - \beta_2))}{(\operatorname{tg}(\beta_1) - \operatorname{tg}(180 - \beta_2))};$$

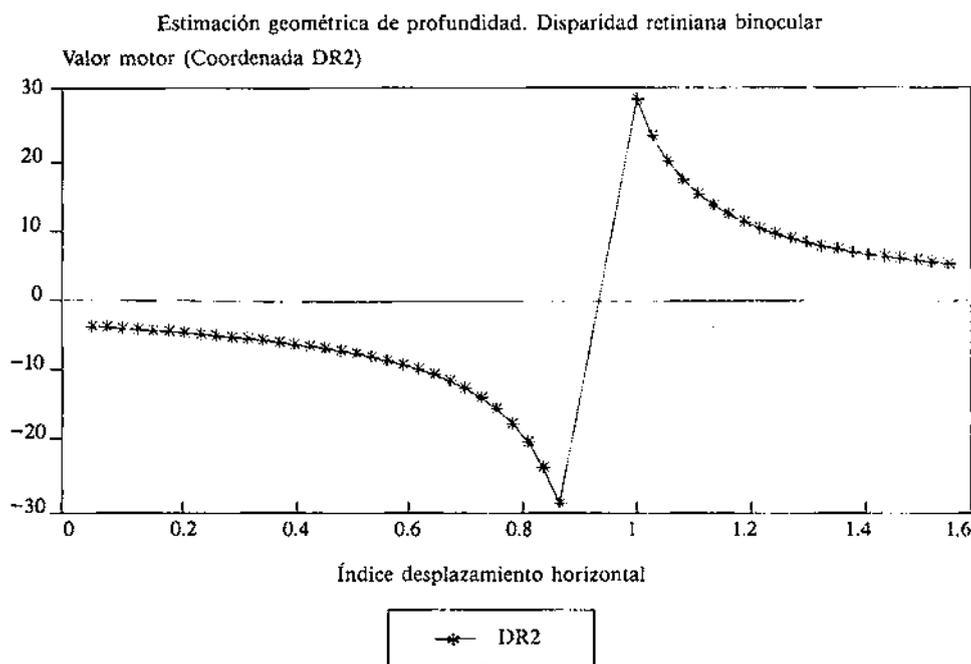


Figura 3. Representación del «valor motor» (DR2) geoméricamente obtenido, en función del «índice de desplazamiento horizontal» (DPE2/DPE1).

Mateniendo constantes los valores indicados y limitando el rango de los índices de disparidad (DPE2) al intervalo entre (-18)-(+18) pixeles con incremento de 2 pixeles (66-78 mm, en torno a 72 mm), a fin de permitir posteriores comparaciones con las estimaciones subjetivas humanas, y mediante una transformación ($1000/DR2$), logramos un ajuste lineal de la función, como puede observarse en la Figura 4. El coeficiente de correlación lineal (Pearson) entre las variables descritas [IDB y $1000*(1/DR2)$], como cabía esperar en esta hipotetizada condición ideal, era positiva y perfecta. La ecuación de regresión, que permite predecir la transformación de DR2 ($1000/DR2$) a partir del IDB, mateniendo los otros factores constantes en los valores indicados, resulta ser:

$$(1000/DR2) = 601.252 \text{ IDB} - 601.239$$

El error tipo de estimación obtenido fue S.E. = 0.00033 y el coeficiente de correlación de Pearson fue positivo y perfecto ($r_{xy} = .99994$).

Como era de suponer, de acuerdo con los hallazgos neurofisiológicos, la distancia y el sentido, respecto a la fovea, de cada punto-objeto de la imagen es suficiente (y necesaria) para que el sistema visual pueda determinar la posición espacial de dichos puntos-objeto en una hipotética imagen ciclópea. La inversión del locus se produce a consecuencia de que la distancia entre el par estereo con disparidad (DPE2) sea mayor o menor que la DIP.

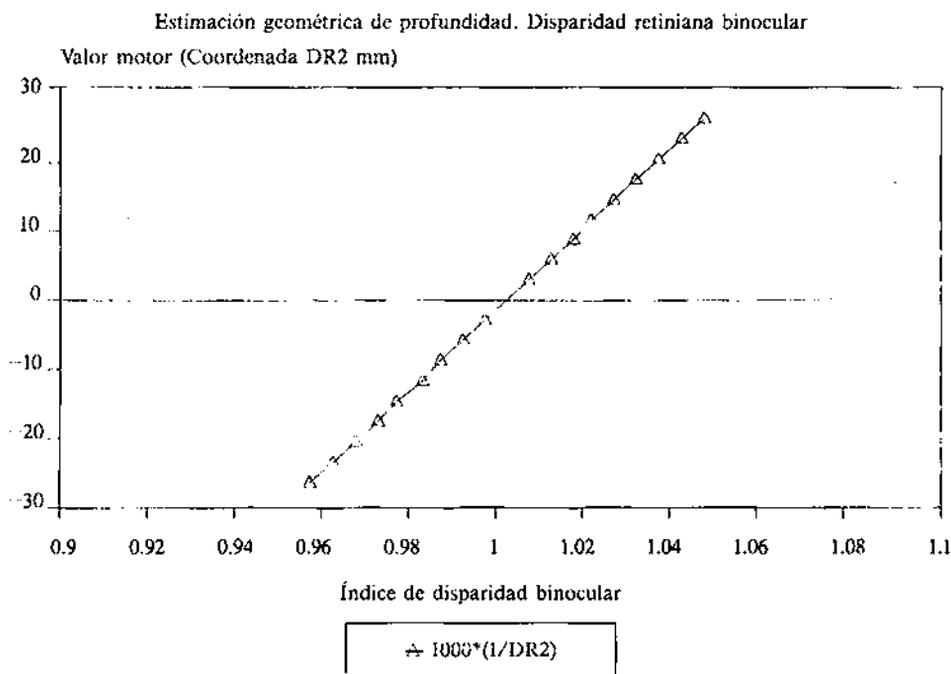


Figura 4. Representación de la transformación efectuada sobre el «valor motor» [$1000 \cdot (1/DR2)$], en función del «índice de disparidad binocular» (IDB).

PROBLEMA 2

¿Es posible obtener una función que nos permita predecir la estimación de profundidad de los sujetos (espacio subjetivo) a partir del índice de disparidad binocular (IDB) que producen los estímulos (estereogramas de puntos al azar)?

Método

Sujetos

Seleccionamos 10 alumnos voluntarios, estudiantes de cuarto de Psicología con agudeza visual foveal (monocular y binocular) normal ($AV=5/5$,⁴ según optotipo de Rivadeneyra, S.A.), elevada estereoagudeza (entre 50-60 segundos de arco, a 40 cm de distancia, según Timus Stereo Test) y alta habilidad de emparejamiento de longitudes (errores no superiores al 20 % del valor objetivo).

4. Una agudeza visual de 5/5 indica que el sujeto, al menos, ve a 5 m los caracteres que una persona con agudeza visual normal puede ver a 5 m.

Material

Se utilizó el material que seguidamente se expresa:

— Una mentonera que permitía mantener constante la distancia de los sujetos al estímulo.

— Una regla graduada para medir la distancia interpupilar (DIP).

— Un calibre o «pie de rey» para realizar el emparejamiento de magnitudes (profundidad estimada-abertura del calibre).

— Unas gafas adaptadas provistas de dos prismas plano-plano, con 12^a y 15^a (dioptrías prismáticas), colocadas en el lado izquierdo y derecho, respectivamente. Estos prismas se hallaban colocadas en posición de base externa, de manera que produjeran convergencia nasal.

— Optotipo de Rivadeneyra, S.A. Madrid. Basado en el de Snellen, para evaluar la agudeza visual.

— Timus-Stereo-Test y Deluxe Polaroid Viewing Glasses, para evaluar la esteroagudeza visual.

Aparatos

Un ordenador FOXEN-80C286-16, a 20 MHz, con display de cristal líquido retroiluminado de 11". Disponía de control de brillo y contraste ajustable.

Adaptamos a la pantalla un panel separador de los elementos del par estereoo, de forma que permitía presentar a cada ojo, independientemente, uno de dichos elementos.

Un programa en BASIC generaba aleatoriamente los estereogramas (véase Figura 5) y controlaba la secuencia experimental.

Procedimiento

El experimento se desarrolló siguiendo las fases que, a continuación, se exponen:

— Medición de la AV (agudeza visual) con el optotipo citado en el apartado *material*.

— Medición de la esteroagudeza con el Timus-Stereo-Test.

— Medición de la DIP (distancia interpupilar) con una regla graduada.

— Entrenamiento en el manejo del calibre. El experimentador presentaba al sujeto, secuencialmente, tres segmentos dibujados en una hoja y el sujeto debía ajustar la abertura interna del calibre hasta igualar la longitud de tales segmentos, superponiendo el primero sobre el segundo.

— Aplicación de la prueba de emparejamiento de longitudes (segmentos-calibre). Se trataba de la clásica prueba psicofísica, en la que el sujeto debía ajustar el calibre a la longitud del segmento que, en cada ensayo, se presentaba en orden aleatorio en la pantalla del ordenador. Esta prueba se introdujo con una doble finalidad, por una parte, nos permitió seleccionar un homogéneo grupo

de sujetos, en cuanto a la capacidad de realizar estimaciones de distancias, resultando adecuados aquellos sujetos que cometen errores no superiores al 20 % (ej., si un segmento presentado medía 40 mm, el error cometido no debía exceder ± 8 mm). Por otra parte, el análisis de los datos de esta pre-prueba nos proporciona unas referencias (útiles en la posterior interpretación de la estimación de la profundidad), tales como el error tipo de estimación de los sujetos en esta tarea, el coeficiente de correlación lineal y una ecuación predictora fundamentada en el modelo lineal de regresión.

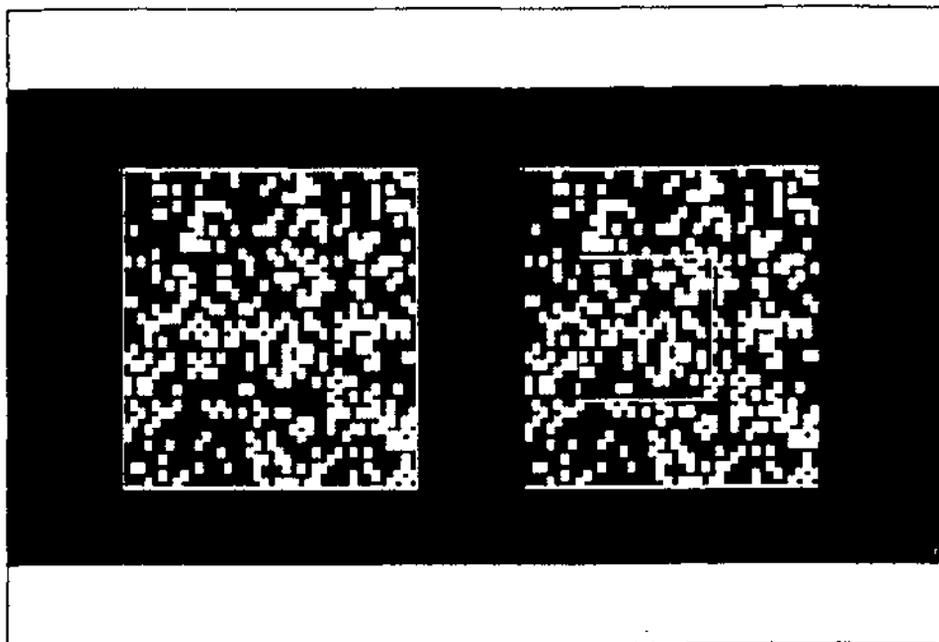


Figura 5. Ejemplo de estereograma de puntos aleatorios utilizados.

— Selección de los sujetos, en función de la agudeza visual, estereoagudeza y prueba de emparejamiento de longitudes.

— Entrenamiento del sujeto en percepción estereoscópica, mediante la utilización de las gafas provistas de dos prismas (uno para cada ojo). El examinador sometía a cada sujeto a seis ensayos de identificación en estereogramas de puntos aleatorios, en tres de los cuales existían diferentes figuras estereoscópicamente destacadas que el sujeto debía denominar y en los otros tres ensayos no se presentaba disparidad alguna en los pares estereo.

Finalmente, se aplicaba la prueba de emparejamiento de profundidades. Ésta consistía en que el sujeto ajustara un calibre (o «pie de rey»), que podía modular voluntariamente según la profundidad percibida sobre el par de estereogramas de puntos aleatorios, los cuales le mostraba, en cada ensayo, la pantalla del orde-

nador siguiendo un orden de presentación aleatorio. Previamente, el sujeto debía responder, a requerimiento del programa, si percibía que el cuadrado central del estereograma «flotaba» o estaba «más cerca» que la zona de fondo periférica de dicho estereograma, o si, por el contrario, tal zona central se «hundía» o estaba «más lejos» que la expresada zona circundante.

Esta prueba de emparejamiento de profundidad constaba de dos bloques de 19 ensayos (38 en total), expuestos en una secuencia aleatoria. Cada uno de los dos bloques presentaba disparidades estereo que variaban entre (-18) y (+18) pixeles, con incremento de dos pixeles; es decir, 18 ensayos con endodisparidad (nueve en cada bloque), otros 18 con exodisparidad (nueve, también, en cada bloque) y dos sin disparidad o, lo que es lo mismo, con disparidad cero (uno en cada bloque).

La magnitud del desplazamiento horizontal de la porción central del estereograma derecho nos permitía obtener el índice de disparidad binocular particular de cada ensayo ($IDB = DPE2 + DIP / DPE1 + DIP$).

La secuencia de un ensayo se iniciaba mostrando un par de estereogramas, que el sujeto debía observar con ayuda de las gafas. A continuación se le preguntaba la localización de la porción central (*más cerca, igual o más lejos*). Seguidamente, debía producir en el calibre la misma separación de las lengüetas que la profundidad percibida en el estereograma.

Para informar al sujeto del objetivo de su tarea, el experimentador le proporcionaba las instrucciones impresas, solicitándole su lectura. Las pruebas se presentaban a los sujetos como un medio de evaluar la agudeza visual a través de ejercicios viso-motores y se enfatizaba la precisión en la estimación, sin importar el tiempo que invirtiese.

Los parámetros del estímulo que se mantuvieron constantes fueron: iluminación de la sala, contraste y brillo de la pantalla, distancia del observador a la pantalla (240 mm) y distancia entre los centros geométricos del par estereo (72 mm).

Diseño estadístico

Todos los sujetos realizaron las pruebas en condiciones uniformes. Para tratar de ajustar los valores de las estimaciones subjetivas de profundidad (ESTPROF), en función del índice de disparidad binocular (IDB), se recurrió al modelo lineal de regresión. Los valores de profundidad subjetiva se obtuvieron calculando las medianas de los sujetos para cada IDB, tanto en la situación de endodisparidad como en la de exodisparidad.

Análogamente, las estimaciones subjetivas de distancias, registradas en la prueba de emparejamiento de longitudes (segmentos-calibre), se obtuvieron a partir de la mediana de los sujetos en cada diferente longitud presentada. También, en este caso, se utilizó el modelo lineal de regresión del IDB sobre las estimaciones subjetivas de las longitudes de segmentos. El método de ajuste de los parámetros de la recta de regresión (ordenada en el origen y pendiente) fue según el criterio de los mínimos cuadrados.

Resultados

El coeficiente de correlación lineal (Pearson) obtenido entre las variables IDB y la «Estimación subjetiva de profundidad» (ESTPROF) fue muy alto y positivo ($r = .996$; $P < .001$). El ajuste a una función lineal puede ser observado en la Figura 6. La ecuación de regresión que permite pronosticar la «Estimación subjetiva de profundidad» a partir del «Índice de Disparidad Binocular» (IDB) fue la siguiente:

$$\text{ESTPROF} = 715.03 \text{ IDB} - 713.97 \quad \text{ERROR ESTÁNDAR} = 1.68$$

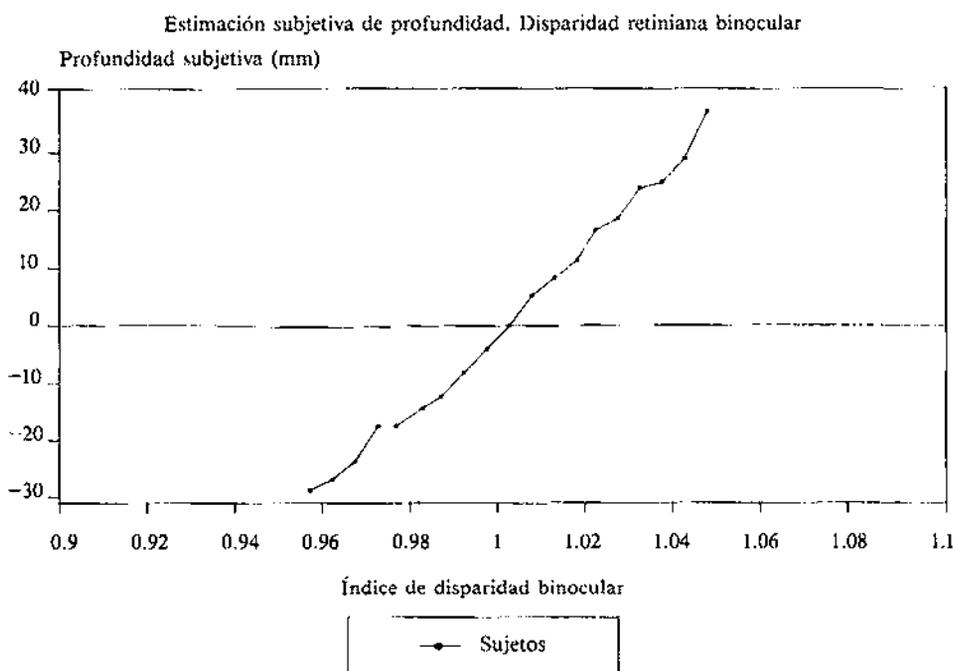


Figura 6. Representación de la «estimación subjetiva de profundidad», obtenida psicofísicamente, en función del «índice de disparidad binocular» (IDB).

Si bien es cierto que, como manifestaban los propios sujetos, la tarea de emparejamiento de longitudes de segmentos les resultaba más fácil que la de emparejamiento de profundidades, no es menos cierto que ambas tareas guardan cierta relación en cuanto que en las dos deben realizar una estimación en una escala subjetiva e igualarla en un dispositivo mecánico (el calibre). Por consiguiente, los resultados del análisis de estos datos pueden orientarnos, particularmente, en cuanto a la capacidad de hacer estimaciones de los sujetos experimentales.

Así, el coeficiente de correlación lineal entre la magnitud física del estímulo

lo (valor objetivo) y la estimación subjetiva de estas personas resultó positivo y perfecto ($r = .998$).

La ecuación de regresión que permite predecir la estimación subjetiva, dada la medida objetiva del segmento fue:

$$\text{ESTLONG} = 0.755 \text{ MEDIDA-REAL} + 2.425$$

Obteniéndose un error estándar S.E. = 0.589.

PROBLEMA 3

¿Es posible obtener una ecuación que permita predecir la estimación subjetiva de profundidad, a partir del indicador del valor motor ocular?

Para ello utilizamos la transformación de dicho indicador que logra su linealidad ($1000/\text{DR}2$).

La relación evidenciada entre ambas variables (valor motor y estimación subjetiva) es muy alta y positiva ($r = .996$). Recordemos que, como se ha visto anteriormente, estas dos variables se hallan, a su vez, relacionadas de modo cuasi-perfecto con el índice de disparidad binocular (IDB). En la Figura 7 se representan las funciones correspondientes a la profundidad juzgada por los sujetos y la predicha desde una geometría euclidiana.

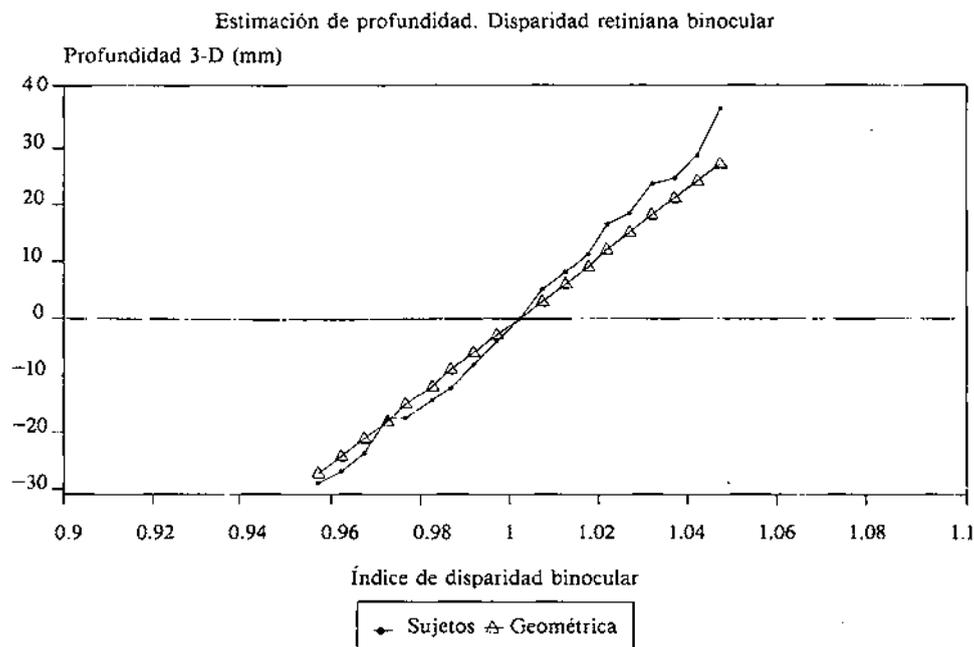


Figura 7. Representación del «valor motor» linealizado mediante la transformación y de la «estimación subjetiva de profundidad», según el IDB (eje de abscisas) y la distancia de profundidad (eje de ordenadas).

La ecuación de regresión que permite predecir la estimación de los sujetos a partir de la conocida transformación del valor motor es:

$$\text{ESTSUBJ} = 1.189 * (1000/\text{DR2}) + 1.09$$

Y el error de estimación obtenido fue S.E.=1.725.

Discusión

Los resultados obtenidos en el Problema 1 sugieren que el indicador del valor motor (DR2), geoméricamente calculado, representa, de modo congruente con los hallazgos de la neurofisiología, las distancias relativas a «puntos» (más bien pequeñas áreas) homólogos de las dos foveas. La necesidad de una transformación inversa de este indicador ($1000*1/\text{DR2}$), parece consistente con el funcionamiento del ojo y con el cambio de orientación angular determinado por el cambio de posición espacial de los puntos, según el sentido del desplazamiento. Efectivamente, dependiendo de si los «puntos» del estímulo se proyectan sobre áreas comprendidas en la misma orientación hemirretiniana o en diferente, el sentido del ángulo de giro ocular será el mismo o el opuesto, respectivamente, lo que implica que los movimientos oculares, si se ejecutan, se produzcan en el mismo sentido o en sentido inverso. Por otra parte, si estos puntos se hallan desplazados a la izquierda ($E_{2,-n}$) o a la derecha ($E_{2,+n}$) del punto estándar ($E_{2,0}$), las proyecciones (P_1 , P_2 y P_3) se intersectan en otro lugar del espacio plano, lo que tiene como consecuencia una inversión de la simetría y, por tanto, cambia la tendencia a incrementar o decrementar la DR2.

Como se ha evidenciado euclidianamente, la relación entre la magnitud del desplazamiento horizontal, de la que derivamos el índice de disparidad retiniana (IDB), y la transformación del valor motor que logra el ajuste a una función lineal ($1000/\text{DR2}$) es perfecta. Llegados a este punto, la validez y fiabilidad de este modelo predictivo podría verificarse utilizando complementariamente la técnica del registro de los movimientos oculares durante la ejecución de la tarea de emparejamiento de profundidades, lo que proporcionaría un apoyo empírico decisivo al modelo que proponemos. Debería tenerse en cuenta, en la verificación de este aspecto, la sensibilidad del aparato de electro-oculomiografía (EOG), puesto que han de registrarse los micromovimientos de ajuste fino que permiten la fusión de dos puntos homólogos.

En el experimento llevado a término para verificar el Problema 2, constatamos lo que bien parece el recurso de los sujetos a una escala subjetiva cuya naturaleza no ha sido interpretada siempre en los mismos términos por distintos autores. En efecto, algunos autores (Ogle, 1962) sostienen que los sujetos deben expresar las estimaciones sobre la profundidad en una escala ordinal y no en una métrica de intervalo o de razón. Y así parece, a primera vista, desprenderse de los datos que hemos registrado. En ellos se observa una importante variabilidad

interindividual (por supuesto superior a la registrada en el emparejamiento de longitudes); sin embargo, nosotros constatamos que los sujetos suelen mantener una alta consistencia intraindividual. La duda se disipa al considerar las verbalizaciones que ellos producen, ya que, en ocasiones, manifiestan observar profundidades, por ejemplo, «el doble de lejos que antes», o «la mitad de cerca», etc., lo que sugiere el uso de una escala métrica superior a la ordinal que sólo tiene en cuenta las distancias relativas (mayor que, menor que, igual que). Este hecho se ve apoyado cuando hacemos uso de la mediana, en vez del promedio de los valores estimados de profundidad, ya que se pone de manifiesto una relación casi perfecta entre ésta y el IDB. No obstante, debemos mantener cierta cautela, puesto que la ecuación predictora produce un error estándar que, aun siendo de pequeña cuantía (S.E. = 1.68), es tres veces superior al hallado en la ecuación predictora de emparejamiento de longitudes (S.E. = 0.589), cuya estimación sí parece proceder según una escala de intervalos. Ciertamente, este resultado nos remite de nuevo al problema de la escala métrica subjetiva empleada por los sujetos, la cual, a nuestro juicio, simplemente resulta menos precisa en el emparejamiento de profundidades; si bien, en nuestros datos, nada parece tener que ver la precisión lograda al estimar longitudes con la alcanzada en la estimación de profundidades. Así, al correlacionar, por un lado, la suma de valores absolutos de los errores cometidos en el emparejamiento de longitudes y, por otro lado, la suma de valores absolutos de las desviaciones de cada sujeto a la mediana de cada disparidad mostrada, se obtuvo un coeficiente de Pearson, prácticamente, nulo ($r = .05$). En otras palabras, los sujetos que cometen mayores errores en una prueba en la que se puede objetivizar el tamaño del error (segmentos) no son, exclusivamente, los que cometen mayores errores de estimación de la profundidad, sino que estos últimos errores se distribuyen al azar en todos los individuos. Luego, en consecuencia, parece tratarse de dos habilidades independientes, dado que la capacidad de estimar longitudes de segmentos nada tuvo que ver con la de estimar profundidades en estereogramas.

Finalmente, los datos registrados parecen apoyar la idea de que la óptica geométrica (plana o euclidiana) se halla altamente relacionada con la estimación subjetiva de profundidad. Al menos con la transformación del indicador del valor motor ($1000/DR_2$), como parece sugerir la Figura 7. No es de extrañar que un modelo plano (representacional) de una realidad curvada pueda resultar útil; los mapas geográficos dan buena muestra de ello. El hecho de que el espacio geométrico plano y el espacio subjetivo humano se comporten de modo isomórfico presenta importantes implicaciones. Concretamente, las imágenes discretizadas en una pantalla de ordenador (por ejemplo, mediante un scanner o una tarjeta digitalizadora de imágenes filmadas por una cámara de vídeo), sobre cuya representación de la iluminancia (matriz de nivel de grises, en imágenes B/N) operan los procesos tempranos, implementados en el procesamiento computacional de imágenes (visión artificial), son también planas, a diferencia de la imagen retiniana abovedada. Por otra parte, quedaría patente que la disparidad retiniana binocular, exclusivamente, sería la única clave visual imprescindible para lograr la estereopsis, al menos cuando la información proporcionada por el estímulo no sea ambigua en cuanto a la disparidad. Consecuentemente, en estos casos,

sería suficiente la información de abajo-arriba y no sería precisa la información aportada por los procesos guiados conceptualmente (arriba-abajo).

REFERENCIAS

- Barlow, H.B., Blakemore, C. & Pettigrew, J.D. (1967). The neural mechanism of binocular depth discrimination. *Journal of Physiology*, *193*, 327-342.
- Bishop, P.O. (1981). Binocular Vision. In R.A. Moses (Ed.), *Adler's Physiology of the eye: Clinical Applications* (7ª ed.). St. Louis: Mosby.
- Boring, E.G. (1933). *The physical dimensions of consciousness*. New York: Appleton-Century.
- Boring, E.G. (1942). *Sensation and perception in the history of experimental psychology*. New York: Appleton-Century.
- Castañé, M., Pêris, F., Borrás, R.M. y Rallo, M. (1992). Estudio de la estereopsis en jóvenes estudiantes. *Gaceta Óptica*, *248*, 10-24.
- Crawford, M.L.J. & Von Noorden, G.K. (1980). Optically induced concomitant strabismus in monkey. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, *19*, 1105-1109.
- Frisby, J.P. (1979). *Seeing. Illusion, Brain and Mind*. Oxford: Oxford University Press.
- Frisby, J.P. & Mayhew, J.E.W. (1980). Spatial frequency tuned channels: Implications for structure and function from psychophysical and computational studies of stereopsis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, *290*, 95-116.
- Frisby, J.P. & Mayhew, J.E.W. (1981). Psychophysical and computational studies towards a theory of human stereopsis. *Artificial Intelligence*, *17*, 349-385.
- Gibson, J.J. (1950). *The Perception of the visual world*. Boston: Houghton-Mifflin. (Trad. cast. *La percepción del mundo visual*. Buenos Aires: Infinito, 1974.)
- Gibson, J.J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton-Mifflin.
- Gibson, J.J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton-Mifflin. (Trad. cast. del cap. 14 en J.E. García-Albea, *Percepción y computación*. Madrid: Pirámide, 1986, 39-64.)
- Goldstein, E.B. (1984). *Sensation and Perception*. Belmont: Wadsworth Publishing Co.
- Harris, J.P. & Gregory, R.L. (1973). Fusion and rivalry of illusory contours. *Perception*, *2*, 235-247.
- Hubel, D.H. & Wiesel, T.N. (1959). Receptive fields of single neurones in the cat's striate cortex. *Journal of Psychology*, *148*, 574-591.
- Hubel, D.H. & Wiesel, T.N. (1962). Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *Journal of Psychology*, *160*, 106-154.
- Hubel, D.H. & Wiesel, T.N. (1970). Cells sensitive to binocular depth in area 18 of the macaque monkey cortex. *Nature*, *225*, 41-42.
- Hubel, D.H. y Wiesel, T.N. (1979). Mecanismos cerebrales de la visión. *Investigación y Ciencia*, *38*, 100-115.
- Julesz, B. (1964). Binocular depth perception without familiarity cues. *Science*, *145*, 356-362.
- Julesz, B. (1971). *Foundations of Cyclopean Perception*. Chicago: University of Chicago Press.
- Larson, W.I. (1985). Does the Howard-Dolman really measure stereoacuity. *American Journal of Optometry*, *62*, 763-767.
- Lettvin, J.Y., Maturana, H.R., McCulloch, W.S. & Pitts, W.H. (1959). What the frog's eye tells the frog's brain. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, *47*, 1940-1951.
- Marcos-Ruiz, R. (1992). Percepción del espacio. En J. Mayor y J.L. Pinillos (Eds.), *Atención y Percepción* (pp. 463-508). Madrid: Alhambra Universidad.
- Marr, D. (1982). *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. San Francisco: W.H. Freeman & Company.
- Marr, D. & Poggio, T. (1976). Cooperative computation of stereo disparity. *Science*, *194*, 283-287.
- Marr, D. & Poggio, T. (1979). A computational theory of human stereo vision. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, *204*, 301-328.
- Mayhew, J.E.W. & Frisby, J.P. (1976). Rivalrous texture stereograms. *Nature*, *264*, 53-56.
- Ogle, K.N. (1962). The visual space sense. *Science*, *135*, 763-771.
- Poggio, G.F. & Fisher, B. (1977). Binocular interaction and depth sensitivity of striate and prestriate cortical neurons of the behaving rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology*, *40*, 1392-1405.
- Pollard, S.B., Mayhew, J.E.W. & Frisby, J.P. (1985). PMF: A stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit. *Perception*, *14*, 449-470.
- Ramachandran, V.S. & Cavanagh, P. (1985). Subjective contours capture stereopsis. *Nature*, *317*, 527-531.

- Richards, W. (1970). Stereopsis and stereoblindness. *Experimental Brain Research*, 10, 380-388;
Sutherland, N.S. (1957). Visual discrimination of shape by octopus. *British Journal of Psychology*, 48, 55-70.
Tudela, P. (1981). *Psicología experimental*. Madrid: UNED.

REFERENCIAS DE PRUEBAS UTILIZADAS

- Optotipo de Rivadeneyra, S.A. Madrid. Basado en el de Snellen (agudeza visual).
Timus-Stereo-Test y Deluxe Polaroid Viewing Glasses (estereoagudeza visual). Bauer Optical Mod. BA0001 (Ophthalmic Instruments).