

Capítulo 3

Métodos experimentales

“And you’ll be forced to take that awful quiz. And you’re bound to trip. And she’ll detect the fiction on your lips and dig a contradiction up. ”

— Alex Turner, 2009

3.1. Calibración de la pantalla

Como se mencionó en la Sección (probablemente en introducción), ^{las} ~~la~~ coordenadas **RGB** carecen de una justificación fisiológica ~~para su utilización~~. Es por eso que en este trabajo utilizamos las coordenadas **SML**, asociadas al pico de absorción de cada tipo de cono en la retina, para expresar los colores de los estímulos que utilizaremos.

En la retina existen tres tipos de conos, **L**, **M** y **S**. estos tipos de cono se diferencian en sus curvas de absorción. Estas curvas muestran la proporciones de fotones de cada longitud de onda absorbidos por cada tipo de cono como se puede ver en la Fig. (3.1), donde se muestran las curvas y sus aproximaciones analíticas normalizadas de manera tal que la absorción es 1 en sus picos. ^{, ambas} ~~que la absorción máxima vale siempre 1.~~

Las aproximaciones analíticas ~~están dadas por las expresiones que se muestran en la Ec. [3.1].~~ ^{son}

$$h_S(\lambda) = \exp[-(\lambda - 442,1 \text{ nm})/(32,96 \text{ nm})^2] \quad (3.1)$$

$$h_M(\lambda) = \exp[-(\lambda - 542,8 \text{ nm})/(52,80 \text{ nm})^2] \quad (3.2)$$

$$h_L(\lambda) = \exp[-(\lambda - 568,2 \text{ nm})/(64,76 \text{ nm})^2] \quad (3.3)$$

Debido a que las computadoras solamente aceptan coordenadas **RGB** a la hora de expresar colores fue necesario construir un algoritmo que nos permitiera pasar de un

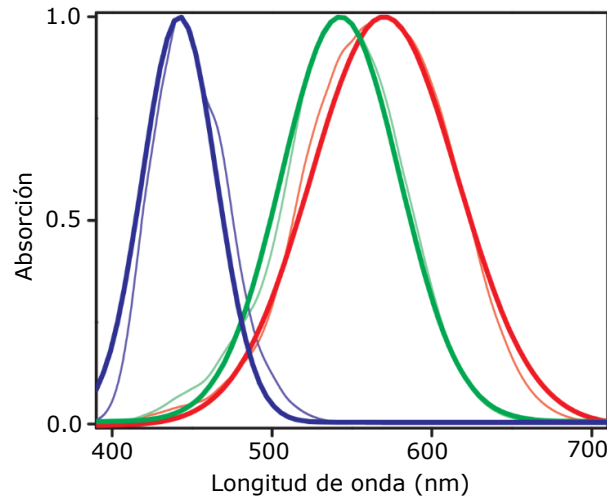


Figura 3.1: Curvas de absorción cuantificadas para los conos S (en azul), M (en verde) y L (en rojo) y sus aproximaciones analíticas. Curvas delgadas: datos obtenidos de Stockman y Brainard (2009). Curvas gruesas: ajuste no lineal $h_i(\lambda) = \exp[-(\lambda - \lambda_i)/\sigma_i^2]$ con $\lambda_S = 442,1$ nm, $\lambda_M = 542,8$ nm, $\lambda_L = 568,2$ nm, $\sigma_S = 32,96$ nm, $\sigma_M = 52,80$ nm y $\sigma_L = 64,76$ nm [citar paper María e Inés].

conjunto de coordenadas al otro. Para eso, primero definimos la manera de pasar de un conjunto al otro.

Dadas las curvas de absorción, las coordenadas c_S , c_M y c_L de un dado color c se definen según la Ec. [3.4],

$$c_i = \int_0^\infty E_{c_R, c_G, c_B}(\lambda) h_i(\lambda) d\lambda \quad \text{con } i \in \{S, M, L\} \quad (3.4)$$

donde c_R , c_G y c_B son las coordenadas **RGB** del mismo color y E_{c_R, c_G, c_B} es el espectro electromagnético emitido por la pantalla. del estímulo. Esto vale para cualquier estímulo, venga o no de la pantalla.

Para ser capaces de realizar esta conversión necesitamos medir el espectro de la pantalla, debido a que el espectro generado por una terna de valores RGB los espectros emitidos por la pantalla al mostrar colores cambian de pantalla a pantalla y de configuración a configuración.

Para esto utilizamos un espectrómetro (poner nombre y marca del espectrómetro). , que debió ser calibrado midiendo un espectro conocido, ya que la ganancia del instrumento dependía de la longitud de onda. Antes de ser capaces de medir espectros utilizando el espectroscopio fue necesaria su calibración, debido a que la ganancia del espectroscopio no es plana. Para encontrar la ganancia intrínseca del espectroscopio se utilizó un patrón de referencia. Es decir, se mide el espectro de algún objeto cuyo espectro esté determinado y documentado con anterioridad. En nuestro caso utilizamos el espectro del sol como patrón para realizar la calibración. Por lo tanto, es posible obtener la ganancia $G(\lambda)$ sabiendo que

$$E_{\text{medido}}(\lambda) = E_{\text{referencia}}(\lambda) G(\lambda)$$

En la Fig. (3.2) se observan el espectro de referencia utilizado [citar el paper de donde salió], el espectro medido a través del espectroscopio y la ganancia obtenida

filtrada con un filtro *SMA* (simply moving average).

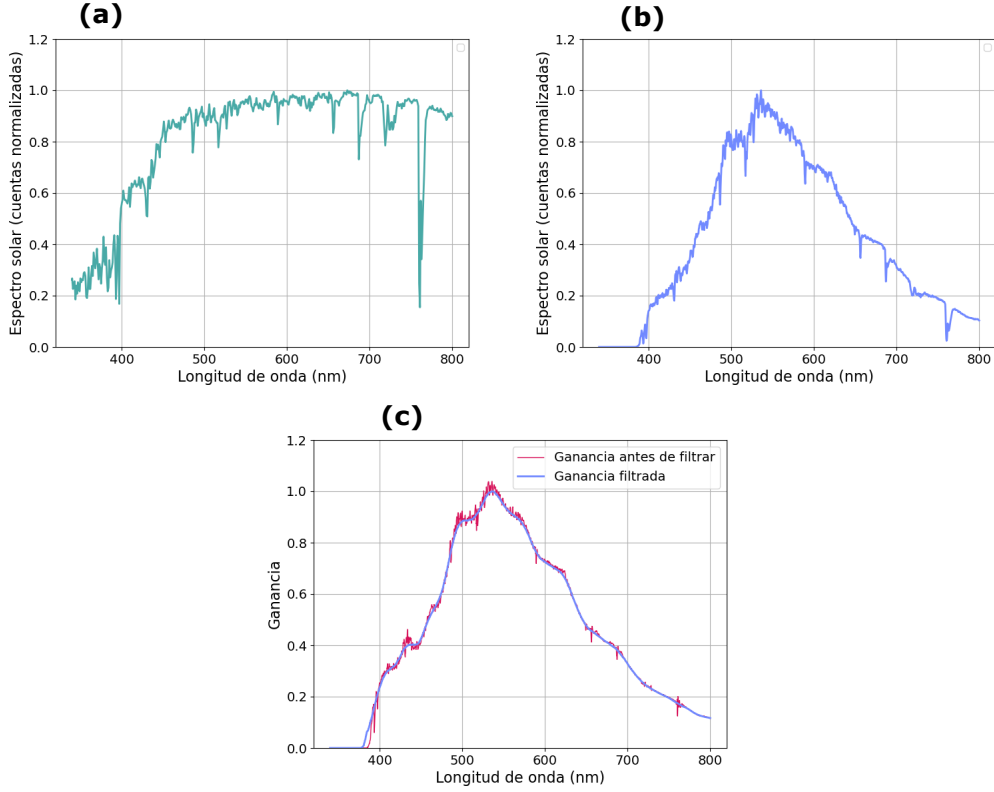


Figura 3.2: (a) Espectro solar de referencia con el número de cuentas normalizadas. (b) Espectro solar medido con el espectroscopio (marca y modelo). (c) En rojo, ganancia del espectroscopio obtenida a través del cociente entre el espectro medido y el espectro de referencia. En azul, una versión filtrada de la ganancia con un filtro SMA.

Una vez obtenida la ganancia del espectroscopio, ~~medimos~~ ~~somos capaces de medir~~ el espectro emitido por la pantalla al especificarle ~~que muestre un cierto color \mathbf{c} con~~ ~~coordenadas~~ ~~(c_R, c_G, c_B)~~. ~~Posteriormente, es posible obtener las~~ ~~coordenadas (c_S, c_M, c_L)~~ ~~utilizando~~ ~~las Ec. [3.4]~~. ~~En lugar de muestrear los 256^3 posibles valores para \mathbf{c} se muestrearon~~ ~~aproximadamente 100 valores \mathbf{c}^i con coordenadas (c_R^i, c_G^i, c_B^i) y a través de sus espectros~~ ~~se obtuvieron sus coordenadas (c_S^i, c_M^i, c_L^i)~~. ~~Utilizando estos valores obtenidos se realizó~~ ~~un ajuste no lineal de la forma dada por la Ec. [3.5],~~

Obtenidas las coordenadas de cada color \mathbf{c} en los sistemas RGB y LMS, ajustamos la transformación entre ellas por la función no lineal

$$\begin{pmatrix} c_S \\ c_M \\ c_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{SR} & \alpha_{SG} & \alpha_{SB} \\ \alpha_{MR} & \alpha_{MG} & \alpha_{MB} \\ \alpha_{LR} & \alpha_{LG} & \alpha_{LB} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_R^{\gamma_r} \\ c_G^{\gamma_g} \\ c_B^{\gamma_b} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_S \\ a_M \\ a_L \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

donde se estimaron las constantes α_{ij} , γ_k y a_l minimizando el error cuadrático.

Para poder medir correctamente el espectro de la pantalla se utilizó una fibra óptica (marca y modelo)

Finalmente se normalizó el ajuste de manera que el máximo valor posible que (c_S^i, c_M^i, c_L^i) fuera 1. Teniendo esto en cuenta, los valores obtenidos para las constantes se muestran en Tabla [3.1] y Tabla [3.2].

α_{SR}	α_{SG}	α_{SB}	α_{MR}	α_{MG}	α_{MB}	α_{LR}	α_{LG}	α_{LB}
3.62e-8	8.70e-8	1.02e-6	5.99e-7	5.10 e-6	2.80e-7	1.89e-6	5.05e-6	2.07e-7

Tabla 3.1: Elementos de matriz del ajuste no lineal dado por Ec. [3.5].

γ_r	γ_g	γ_b	a_S	a_M	a_L
2.24	2.20	2.41	7.93e-4	1.11e-3	5.28e-3

Tabla 3.2: Exponentes y elementos constantes del ajuste no lineal dado por Ec. [3.5].

Una vez obtenido los parámetros del ajuste fue posible mostrar colores a través de sus coordenadas **SML**. Para mí esto ya está claro.

En la Fig. (3.3) se observa superficies de nivel del ajuste. En las Figs. (3.3a), (3.3b) y (3.3c) se observa el resultado del ajuste en los ejes R, G y B respectivamente, es decir, manteniendo las otras dos coordenadas fijadas en 0. En la Fig. (3.3c) se observa el resultado del ajuste sobre una curva de nivel diferente a los ejes. En este caso, se varía la coordenada B dejando R y G fijas en 102. Se observa que tanto en los ejes

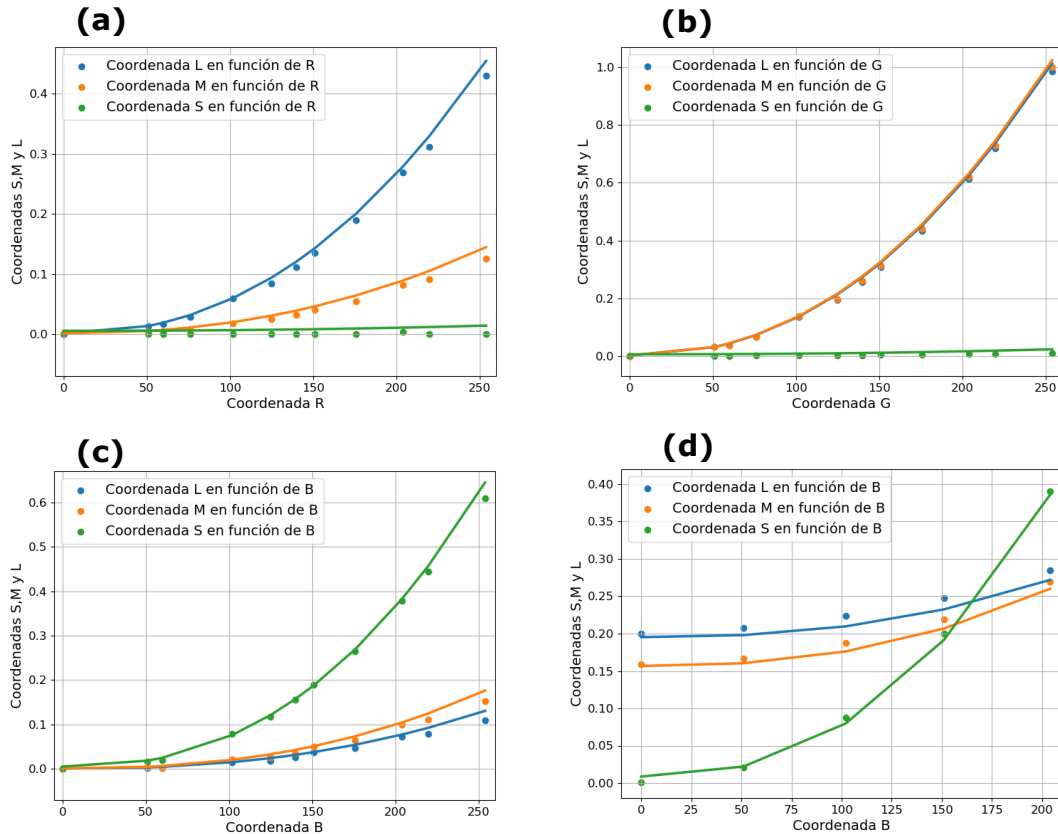


Figura 3.3: Resultados del ajuste dado por la Ec. [3.5] con los parámetros dados por las Tablas (3.1) y (3.2). (a) Valores del ajuste en función de la coordenada R con G = B = 0. (b) Valores del ajuste en función de la coordenada G con R = B = 0. (c) Valores del ajuste en función de la coordenada B con R = G = 0. (d) Valores del ajuste en función de la coordenada B con R = G = 120.

como en otras curvas, el ajuste predice bien el comportamiento de las coordenadas S,

M y L.

3.2. Experimentos de discriminación

En este trabajo se propone obtener el valor de k_{\max} a través de experimentos de discriminación. En estos experimentos se le presenta a un sujeto de prueba una imagen en pantalla con la estructura espacial cuya cromaticidad \mathbf{c} depende de las coordenadas espaciales (x, y) de la forma

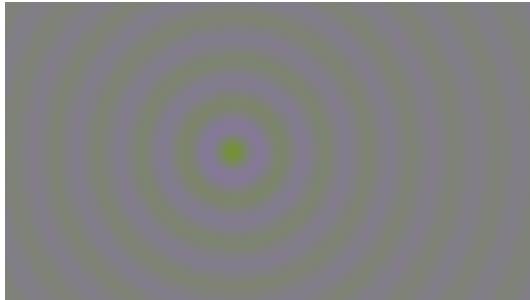
$$\mathbf{c}(x, y) = \mathbf{c}_f + \sqrt{k\epsilon} \hat{\mathbf{e}} J_0(k\sqrt{x^2 + y^2}), \quad (3.6)$$

con una modulación de amplitud ϵ en alguna dirección del espacio de colores $\hat{\mathbf{e}}$ y el origen de la modulación desplazado respecto al centro de la pantalla de computadora.

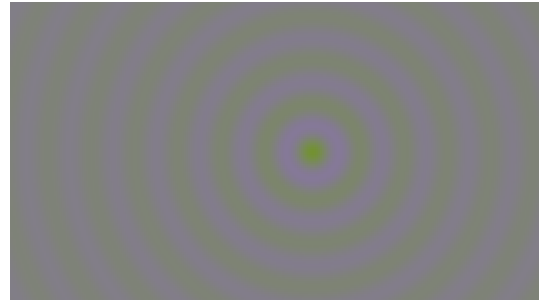
Antes de mostrar cada estímulo se le muestra al voluntario un punto negro en el centro de la pantalla durante 2 segundos para que fije su mirada. Posteriormente el punto negro desaparece y aparece el estímulo durante 1 segundo. Después de presentarle el estímulo por 1 segundo, este desaparece y se le pide al sujeto de prueba

las flechas

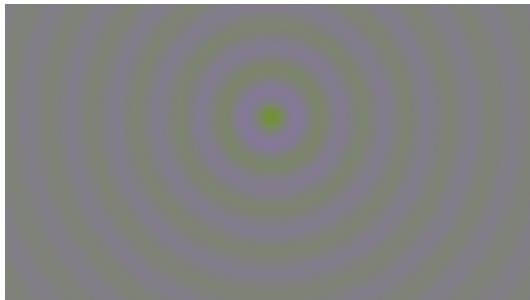
el teclado la dirección en la que está desplazado el centro de la modulación. Si el sujeto no logra percibir el estímulo debe responder aleatoriamente alguna de las 4 posiciones. En la Fig. (3.4) se muestra la forma y las diferentes posiciones que puede tomar el input en la pantalla.



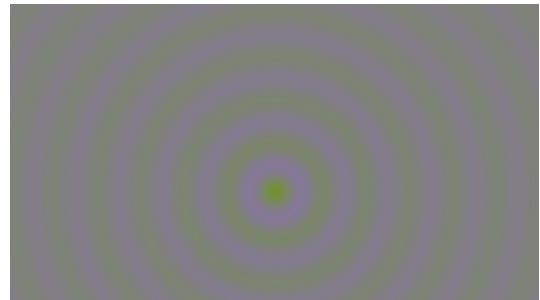
(a) Centro de la modulación a la izquierda del centro de la pantalla.



(b) Centro de la modulación a la derecha del centro de la pantalla.



(c) Centro de la modulación arriba del centro de la pantalla.



(d) Centro de la modulación abajo del centro de la pantalla.

Figura 3.4: Diferentes centrados del estímulo presentado.

En el experimento participaron 7 voluntarios (2 mujeres y 5 varones), donde se

realizaron aproximadamente 100 mediciones para 5 valores en promedio de frecuencia espacial k por cada dirección del espacio de colores. 3 voluntarios midieron en solo una dirección, 2 voluntarios midieron en dos direcciones y los otros dos restantes midieron en tres direcciones.

Debido a que en el percepto la amplitud de la modulación se encuentra multiplicada por $\mathcal{H}[C](k)$ es de esperarse que, para k_{\max} , el sujeto tenga mayor probabilidad de percibir el estímulo que para cualquier otra frecuencia espacial.

En la Fig. (3.5) se observa la cabina donde se realizaron los experimentos. La cabina está cubierta con cortinas negras de manera tal que la luz del ambiente no afecte la percepción de los estímulos que se muestran por la pantalla.

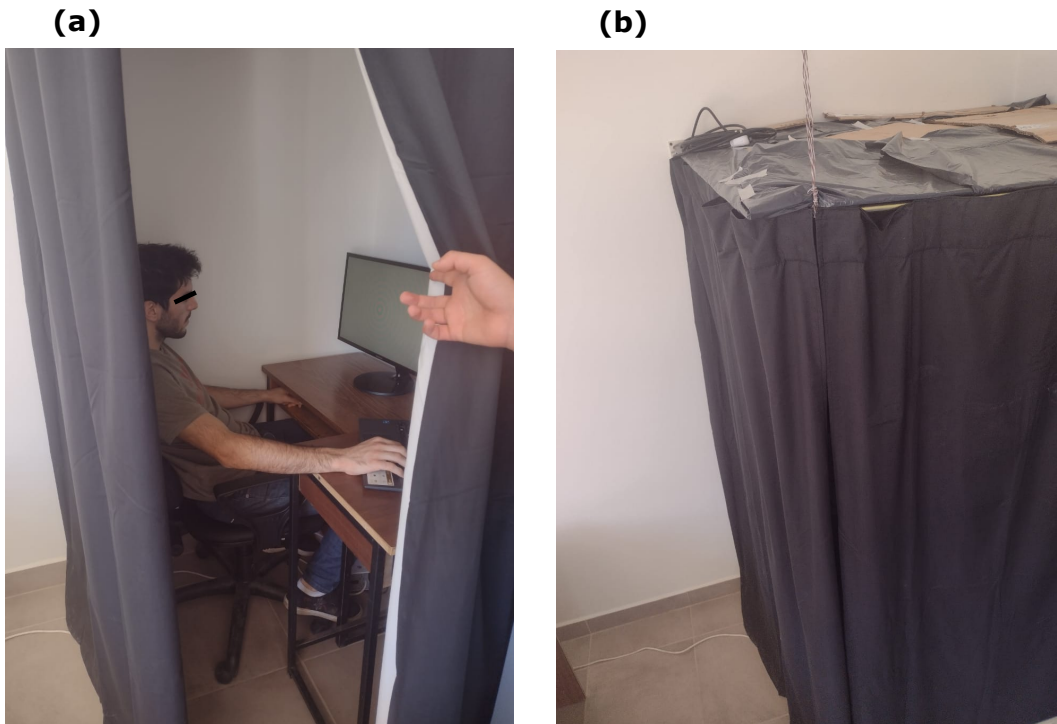


Figura 3.5: (a) Cabina donde se realizaban los experimentos perceptuales por dentro. (b) Cabina donde se realizaban los experimentos perceptuales por fuera.

3.3. Estimación del umbral de discriminación con *Maximum Likelihood*

Propondremos en este trabajo que la probabilidad $P(x|\epsilon, h)$ de que el sujeto de prueba falle ($x = 0$) o acierte ($x = 1$) en un intento del experimento dados la amplitud

de la desviación ϵ y el umbral de discriminación del sujeto h está dada por

$$P(x|\epsilon, h) = \begin{cases} \frac{3}{4} \exp [-(\epsilon/h(k))^2] & \text{si } x = 0 \\ 1 - \frac{3}{4} \exp [-(\epsilon/h(k))^2] & \text{si } x = 1. \end{cases} \quad (3.7)$$

En la Fig. (3.6) se observa esta probabilidad en función de ϵ para un valor fijo de $h(k)$.

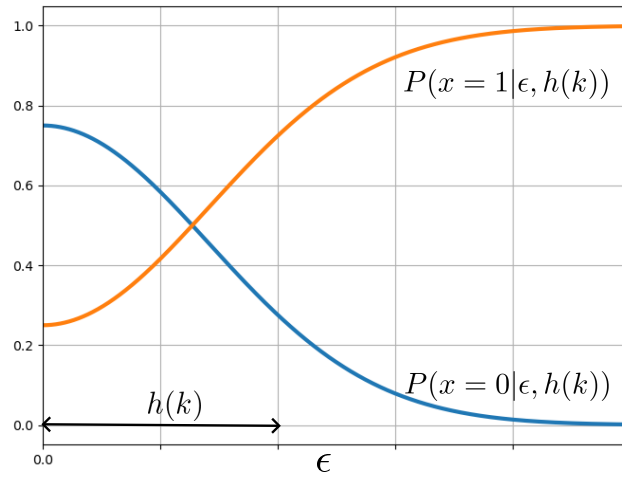


Figura 3.6: $P(x|\epsilon, h(k))$ en función de ϵ para un valor fijo de $h(k)$.

Como es de esperarse, si la amplitud de la modulación ϵ es muy grande, la probabilidad de fallar tiende a 0 y la de acertar tiende a 1. Mientras que si la amplitud es muy pequeña, la probabilidad de fallar tiende a $\frac{3}{4}$ y la de acertar a $\frac{1}{4}$ (correspondientes a elegir un desplazamiento al azar entre 4 opciones equiprobables). Viendo esta definición, se puede interpretar al umbral del sujeto h como aquella desviación necesaria para que la probabilidad de error sea aproximadamente 1/4, y que este valor será el mínimo posible para $k = k_{max}$.

Si suponemos que cada uno de los distintos intentos del experimento son independientes entre sí, obtenemos que la probabilidad conjunta de obtener una cierta tira de aciertos y errores está dada por

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n | \epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n, h(k)) = \prod_{j=1}^n P(x_j | \epsilon_j, h(k)). \quad (3.8)$$

Para estimar el valor del umbral utilizaremos el *estimador de maximum likelihood* sobre la probabilidad definida en la Ec. [3.8], es decir, el umbral h_{ML} es aquel que

(si queremos poner "Mientras", habría que seguir la oración anterior).

Hay que volver a poner "el umbral", porque "este valor" parece referirse al 1/4, que no es lo que queremos decir.

Si ponemos "cada uno" el verbo tiene que ser "es" (no "son").

distintos

1 En cambio,

El umbral se minimiza

cumple [12]

$$\left. \frac{d}{dh} \ln P(h|x_1, \dots, x_n; \epsilon_1, \dots, \epsilon_n) \right|_{h=h_{\text{ML}}} = 0,$$

donde

$$\begin{aligned} \ln P(h|x_1, \dots, x_n; \epsilon_1, \dots, \epsilon_n) &= \sum_{j/x_j=0} \ln \left[\frac{3}{4} \exp [-(\epsilon_j/h)^2] \right] + \sum_{j/x_j=1} \ln \left[1 - \frac{3}{4} \exp [-(\epsilon_j/h)^2] \right] \\ &= n_{\text{errores}} \ln \left(\frac{3}{4} \right) - \sum_{j/x_j=0} \left(\frac{\epsilon_j}{h} \right)^2 + \sum_{j/x_j=1} \ln \left[1 - \frac{3}{4} \exp [-(\epsilon_j/h)^2] \right], \end{aligned}$$

y

$$\frac{d}{dh} \ln P(h|x_1, \dots, x_n; \epsilon_1, \dots, \epsilon_n) = \frac{2}{h^3} \sum_{j/x_j=0} \epsilon_j^2 - \frac{6}{4h^3} \sum_{j/x_j=1} \frac{\epsilon_j^2 \exp [-(\epsilon_j/h)^2]}{1 - \frac{3}{4} \exp [-(\epsilon_j/h)^2]}.$$

De manera más explícita, el valor de h_{ML} es aquel que cumple

$$\sum_{j/x_j=0} \epsilon_j^2 - \frac{3}{4} \sum_{j/x_j=1} \frac{\epsilon_j^2 \exp [-(\epsilon_j/h_{\text{ML}})^2]}{1 - \frac{3}{4} \exp [-(\epsilon_j/h_{\text{ML}})^2]} = 0 \quad (3.9)$$

Para resolver la Ec. [3.9] se utilizó una función de la librería *statsmodel* de Python.

Para encontrar el error δ_h en la determinación del h_{ML} utilizaremos la propiedad dada por la Ec. [3.10]

$$\frac{1}{2\delta_h^2} = \left. \frac{d^2}{dh^2} \ln P(h|x_1, \dots, x_n; \epsilon_1, \dots, \epsilon_n) \right|_{h=h_{\text{ML}}}. \quad (3.10)$$

3.4. Muestreo óptimo

La capacidad de realizar una correcta estimación depende enormemente de la cantidad de datos disponibles. En nuestro modelo de voluntario, la probabilidad de contestar correcta o incorrectamente está dada por la Ec. (3.8). En esta función ~~de probabilidad~~ hay dos tipos de parámetros, h el umbral de discriminación y los ϵ_j . Estos últimos, a diferencia de h , están a control de experimentador. A partir de esta libertad surge la pregunta: ¿cuál es la mejor forma de elegir la amplitud ϵ de manera de minimizar el número de datos necesarios para la estimación?

Una forma naif de mostrar valores de ϵ sería hacerlo de manera uniforme. Es decir, si suponemos que el valor de umbral de discriminación se encuentra entre 0 y 1, podemos muestrear valores de $\epsilon \in \{1/5, 2/5, 3/5, 4/5, 1\}$ de manera aleatoria y uniforme. Sin embargo, esta forma de muestreo podría no ser óptima. Por ejemplo, si suponemos que el umbral de discriminación ~~de voluntario~~ está alrededor de 2/5 ~~veríamos que el~~

dos puntos

coma

voluntario casi siempre acertaría la ubicación del centro del estímulo para las amplitudes 4/5 y 1. ~~Por lo tanto, el valor de la estimación se vería verdaderamente afectado por los aciertos y errores en las amplitudes 1/5, 2/5 y 3/5. Es decir, después de un cierto número de iteraciones, mostrar amplitudes grandes deja de otorgarnos información acerca de valor de umbral de discriminación.~~ *y sería un desperdicio continuar muestreando estos valores. Mucho más eficiente sería concentrarse en amplitudes cercanas al umbral, que son más informativas.*

Una manera más inteligente de ~~muestrear~~ *elegir los* valores de ϵ para mostrar al voluntario sería utilizar las respuestas dadas en trials anteriores para obtener una estimación provisoria del umbral, y muestrear amplitudes en función de esta estimación provisoria. A través de esta conclusión nace una pregunta más específica: ~~¿~~ *¿* dada una estimación previa de h , *¿* cuál es el valor de ϵ que más información nos daría acerca del umbral?

Para contestar esta pregunta calculamos la información de Fisher $J(h|\epsilon)$, para después maximizar esta información respecto a ϵ y obtener el valor ϵ_{n+1} óptimo ~~a mostrar dado una estimación anterior h_n .~~

En nuestro caso, la información de Fisher \mathcal{J} dada por la Ec. ~~[[?]]~~ respecto a la función de probabilidad dada por la Ec. [3.7] y respecto al parámetro h está dada por la Ec. [3.11].

$$\mathcal{J}(h|\epsilon) = \frac{9}{2} \frac{\epsilon^2}{h^4} \exp \left[- \left(\frac{\epsilon}{h} \right)^2 \right] - \frac{3}{8} \frac{\epsilon^2}{h^6} \exp \left[-2 \left(\frac{\epsilon}{h} \right)^2 \right] \frac{\left((12h^2 - 8\epsilon^2) \exp \left[\left(\frac{\epsilon}{h} \right)^2 - 9h^2 \right] \right)}{1 - \frac{3}{4} \exp \left[- \left(\frac{\epsilon}{h} \right)^2 \right]} \quad (3.11)$$

Finalmente, ~~maximizamos el valor de $\mathbf{J}(h|\epsilon)$ respecto a ϵ , lo cual nos lleva a resolver la Ec. [3.12].~~ *maximizando obtenemos*

$$(2\epsilon^2 - 4h^2) \exp \left[\left(\frac{\epsilon}{h} \right)^2 \right] + 3h^2 = 0 \quad (3.12)$$

Suponiendo que $\epsilon = \alpha h$ se obtiene una ecuación trascendental para α como se muestra en la Ec. [3.13],

$$(2\alpha^2 - 4) \exp(\alpha^2) + 3 = 0 \quad (3.13)$$

cuya solución es $\alpha = 1,3174$. Por lo tanto, se concluye que dado una estimación previa h_n el valor óptimo de amplitud a mostrar es $\epsilon_{n+1} = 1,3174 h_n$.

Para comprobar la convergencia de la estimación se realizaron simulaciones. ~~En estas simulaciones. Se determinaba una umbral de discriminación h para el sujeto virtual. A partir de este umbral verdadero es posible obtener datos a partir de una distribución dada por la Ec. [3.7], dando también un valor de ϵ . A partir de valores ϵ_i elegidos por el experimentador se obtienen valores x_i con $x_i \in 0, 1$, que equivalen a que el sujeto virtual haya contestado correcta o incorrectamente. Finalmente, utilizando estos datos~~ *virtual, cuyas respuestas estaban dadas por la Ec. 3.7 con un valor de h predefinido.* *, en las que definía un sujeto*

Mover el signo ¿ adonde realmente empieza la pregunta.

artificiales es posible utilizar el estimador de Maximum Likelihood para estimar el valor de h . Debido a que este valor es conocido ya que está dado es posible comparar la velocidad de convergencia de la estimación con diferentes métodos de muestreo de amplitudes.

En la Fig. (3.7a) se muestra una comparación en la convergencia del muestreo aleatorio uniforme y el muestreo adaptativo dado por la maximización de la información de Fisher. Las primeras 15 amplitudes son muestreadas uniformemente en ambos casos, de manera tal de obtener una primera estimación de h a partir de la cual obtener las siguientes amplitudes a mostrar. Posteriormente se muestrean otras 35 amplitudes. Se puede observar que el método adaptativo converge más rápidamente al verdadero valor del umbral ($h = 0,5$) que el método de muestreo uniforme.

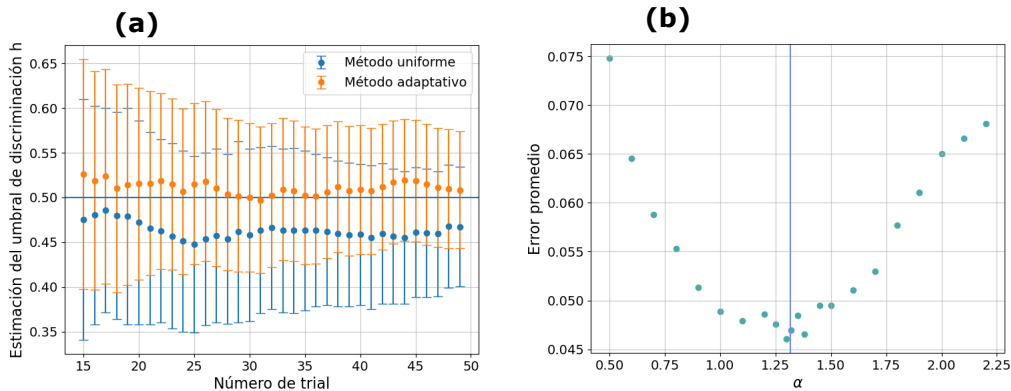


Figura 3.7: (a) Evolución de la estimación del umbral de discriminación con dos métodos distintos de muestreo de amplitudes ϵ . En azul se observa el muestreo uniforme, donde se eligen aleatoriamente valores de amplitud en $\{0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1\}$. En naranja se observa el muestreo adaptativo dado por la solución de la Ec. 3.13. En ambos casos los primeros 15 pasos de estimación se realizaron con amplitudes aleatorias, de manera de obtener una primera estimación de h para el método adaptativo. El valor verdadero del umbral de discriminación se observa en línea gruesa vertical con $h = 0,5$. (b) Error promedio entre 1600 realizaciones del valor de la estimación de h en el trial número 50. En línea celeste gruesa se observa la solución a la Ec. 3.13.

En la Fig. (3.7b) se observa el error promedio en la estimación de h en el paso 50 del método adaptativo para 1600 realizaciones y diferentes valores de α tal que $\epsilon = \alpha h$. Se observa que alrededor del valor de α óptimo deducido a partir de la maximización de la información de Fisher $\mathcal{J}(h|\epsilon)$ el error promedio alcanza su mínimo.

3.5. Determinación del tamaño del estímulo

Cuando decidimos mostrar colores a través de la pantalla según la Ec. [3.6] es importante notar que las variables, (x, y) y k están medidas en unidades de píxel e inversa de píxel respectivamente. Es por esto que es necesario encontrar otra unidad adecuada a la hora de expresar el tamaño del estímulo y su frecuencia espacial. Punto seguido.

Debido a que el tamaño percibido de los estímulos cambia dependiendo de la

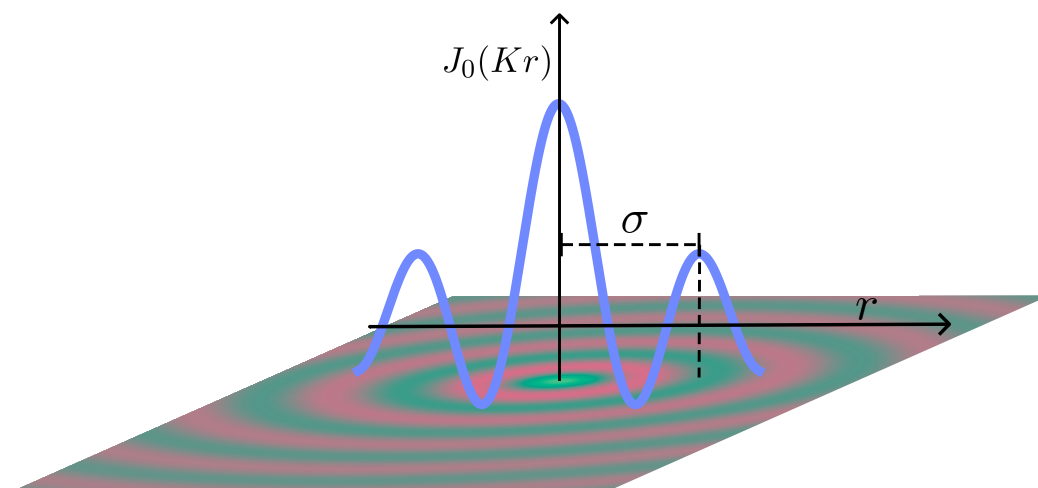


Figura 3.8: Esquema de la modulación del estímulo como una función J_0 de Bessel. El tamaño característico σ del estímulo está definido como la distancia entre los primeros dos máximos de la función de Bessel.

a la pantalla distancia, se decidió medir el tamaño en unidades de grados sexagesimales o, lo cual da una idea del espacio que ocupan en el campo visual. El tamaño característico σ del estímulo se define según se muestra en la Fig. (3.8). Se define a σ como la distancia que hay entre el primer y segundo máximo de la función de Bessel, y se redefine a la frecuencia espacial de estímulo como la inversa de ese tamaño $k = \frac{1}{\sigma}$ (esto se debe a que, por las características de la función de Bessel J_0 , $k\sigma \approx 7,016$, aquí redefinimos k de manera tal que $k\sigma = 1$).

Dada la imagen, es posible obtener el valor de σ en número de píxeles analizando la imagen en algún software externo. Sabiendo el tamaño de la pantalla y resolución de la pantalla es posible pasar de una medición en número de píxeles a una medición en centímetros. Una vez obtenido el valor de σ en centímetros se puede obtener el ángulo subtendido por el estímulo según se muestra en la Ec. [3.14] y es

$$\theta_\sigma = \frac{180^\circ}{\pi} \arctan\left(\frac{\sigma}{d}\right), \quad (3.14)$$

donde d es la distancia de la vista del sujeto a la pantalla.

3.6. Relación entre el umbral de discriminación y tamaño característico del campo receptivo

En la sección anterior se tomó que la probabilidad de fallar o acertar dependía de la amplitud de la desviación ϵ , sin embargo, esta probabilidad no debería depender tanto del valor de ϵ externo, sino de su análogo dado por la representación neuronal emergente: $\epsilon\mathcal{H}[\mathbf{G}](k)$, tal como se muestra en la Ec. (2.13). Debido a que el efecto

del campo receptivo afecta ϵ mediante una constante multiplicativa que depende de la frecuencia espacial del estímulo k , es posible transferir esta dependencia de k al umbral h . Si además el estímulo se encuentra normalizado de manera que I_c es constante, se deduce que $h(k)$ debe ser inversamente proporcional a $\mathcal{H}[\mathbf{G}](k)$. Por lo tanto, la existencia de una frecuencia k que minimice el umbral de discriminación h implicaría la existencia de un máximo en el módulo de $\mathcal{H}[\mathbf{G}](k)$, y permitiría encontrar una distancia característica en el campo receptivo encargado del procesamiento cromático.

3.7. Protocolo experimental

La modulación ϵ del estímulo se realiza en tres ~~posibles~~ direcciones del espacio de colores \mathbf{S} , $\mathbf{L} - \mathbf{M}$ y $\mathbf{L} + \mathbf{M}$, donde cada instancia del experimento ocurre únicamente en una de las direcciones.

Para cada sujeto y cada dirección del espacio de colores se determina un valor máximo de amplitud ϵ_{\max} a partir de cual se presentan estímulos cuya amplitud ϵ está dada por fracciones de este valor máximo. El valor de ϵ_{\max} se elige manualmente de manera tal que el sujeto ~~de prueba~~ apenas sea capaz de percibir la presencia del estímulo. Es decir, dado ϵ_{\max} , se presentan al voluntario, durante 2 minutos, los estímulos con $\epsilon = \{\pm \frac{j \epsilon_{\max}}{5}\}$ con $j \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$. Estos dos minutos sirven para que la vista del voluntario se acostumbren ^a la cromaticidad ~~de fondo~~ ^{promedio} \mathbf{c} y para obtener una primera estimación del umbral de discriminación h . Una vez obtenida una primera estimación del umbral, se muestran otros 60 trials, donde la amplitud de cada trial evoluciona según el método de muestro adaptativo discutido en la Sección (3.4).

La sesión del experimento se repite con diferentes valores de frecuencia espacial k . Los valores de k mostrados a los sujetos de prueba ~~rondaban en el orden~~ $k = 0,5 \frac{\pm}{\text{grados}}$. Una vez obtenidos, para cada k , los valores de acierto y error para cada ϵ presentados, se calcula el $h_{\text{ML}} = h(k)$ utilizando la Ec. [3.9] y su error utilizando la Ec. [3.10].

¿No deberíamos poner esto en "Trabajo previo"? Queda un poco otro tema acá. ¿No te parece que esto debería ser la descripción del modelo, y del significado del experimento? Acá estamos hablando de métodos...

Esto me suena raro. Epsilon_max no debería ser apenas detectable, debería ser claramente detectable. Si no, Epsilon_max/5 es invisible...

Se muestrearon valores de k en el intervalo [0.2 / grado, 2/grado] (o el intervalo que sea)