

Universidad de la Coruña

Master Interuniversitario de Neurociencias

¿Se cumple la equivalencia tiempo-intensidad en discriminación (TIED) en la percepción del movimiento?

Natalia Rosa Bohórquez Villanueva

2021-2022

Dr. Jose Luis Pardo Vásquez en carácter de director y Dr. Juan Casto Rivadulla Fernández en carácter de tutor académico autorizan el presente Trabajo de Fin de Master del Master de Neurociencias titulado “¿Se cumple la equivalencia tiempo-intensidad en discriminación (TIED) en la percepción del movimiento?” que presenta la estudiante Natalia Rosa Bohórquez Villanueva y que ha sido realizado bajo su respectiva dirección y tutorización en el curso académico 2021/2022, de tal forma que cumple los requisitos para ser juzgado por el tribunal correspondiente.

**PARDO
VAZQUEZ
JOSE LUIS -
33300340C**

Firmado digitalmente
por PARDO VAZQUEZ
JOSE LUIS -
33300340C
Fecha: 2022.07.18
20:13:12 +02'00'

Fdo. Jose Luis Pardo Vásquez

**RIVADULLA
FERNANDEZ
JUAN CASTO
- 52451861Q**

Firmado digitalmente
por RIVADULLA
FERNANDEZ JUAN
CASTO - 52451861Q
Fecha: 2022.07.18
20:54:23 +02'00'

Fdo. Juan Casto Rivadulla Fernández

Índice

I. Introducción:	4
II. Objetivos	8
III. Material y Métodos.....	9
IV. Resultados	15
V. Discusión	19
VI. Conclusión.....	22
VII. Referencias.....	23

I. Introducción

Ley de Weber

Comprender la compleja relación que existe entre las características físicas de un estímulo sensorial y la experiencia subjetiva que éste provoca es el objetivo principal de una de las principales ramas de la psicología, conocida como psicofísica. El médico Ernst Heinrich Weber en 1834 fue uno de los primeros en hablar, desde el punto de vista científico, acerca de la diferencia entre el mundo físico y el psíquico y consideró que se podrían aplicar leyes a la percepción de la misma forma que se aplican al mundo físico (Manning y Rosentock, 1968 citado por Fontes & Fontes, 1994). Partiendo de esto, Weber realizó una serie de experimentos psicofísicos, donde concluyó que dos estímulos de la misma clase pueden ser discriminados si la diferencia entre ellos es proporcional a su magnitud. Así para que un sujeto note un cambio de sensación, el estímulo físico tiene que aumentarse en una proporción constante de su magnitud real. A esto le llamó ley de Weber y se expresó de la siguiente forma: $k = \Delta E/E$. Donde E es la intensidad del estímulo, ΔE es el incremento del estímulo y k es una constante. Es decir, la ley de Weber establece que el cambio en un estímulo que será 'apenas perceptible' es una proporción constante del estímulo original y que la sensibilidad de los cambios en cualquier continuo físico es relativa y no absoluta. Como tal, la diferencia apenas perceptible (JND del inglés Just noticeable difference) para estímulos más débiles es menor y la resolución es mayor que los estímulos más intensos en el mismo continuo sensorial (Heath et al., 2011). Se habla de umbral absoluto cuando se hace referencia a la menor cantidad de un estímulo requerida para reportar su presencia en el 50% de las ocasiones y umbral diferencial a la menor variación o cambio requerido en la intensidad de un estímulo para producir una diferencia que sea detectada en el 50% de las ocasiones en que un sujeto es sometido a varios estímulos.

Muchos experimentos han demostrado que para una amplia gama de estímulos, la ley de Weber proporciona una buena aproximación (Shen, 2003). Sus observaciones han sido generalizadas a todas las modalidades sensoriales y a gran número de especies, convirtiéndose en la más antigua y firmemente establecida de las leyes psicofísicas (Pardo-Vazquez et al., 2019). En la búsqueda de un modelo matemático que explique la Ley de Weber (WL), los investigadores se han encontrado siempre con el mismo problema: esta ley

no es suficientemente restrictiva y hay diferentes maneras de modelar el comportamiento de modo que se ajuste a ella. Esta falta de restricciones se debe, fundamentalmente, a que sólo tiene en cuenta la precisión de los juicios psicofísicos, dejando a un lado los tiempos de reacción (RT). Una excepción es el trabajo de Link, que propuso una explicación de WL en términos de acumulación acotada de evidencia sensorial, un concepto clave en el estudio moderno de la percepción y la toma de decisiones perceptivas (Link 1992 citado por Pardo-Vazquez et al., 2019) Aunque el modelo de Link describe tanto la precisión como la RT, es solo recientemente que la conexión entre WL y RT ha comenzado a explorarse sistemáticamente.

Time Intensity equivalence in discrimination (TIED)

Recientemente, Pardo-Vazquez et al (2019) estudiaron la ley de Weber entrenando ratas para discriminar la intensidad relativa de los sonidos en los dos oídos en varios niveles absolutos. Observaron que al cambiar la intensidad promedio de los estímulos comparados no sólo cambiaba la precisión de las comparaciones, sino también el tiempo que los sujetos tardaban en resolver la tarea. A partir de estos resultados, formularon una explicación mecanicista de la Ley de Weber en la que un modelo muy simple de *drift diffusion* permite explicar un porcentaje cercano al 100% del comportamiento observado en dichos experimentos. En esta explicación mecanicista tiene una enorme importancia la velocidad de los juicios psicofísicos, ya que encontraron que el tiempo y la intensidad están relacionados: (1) un estímulo con menor intensidad tendrá tiempos de reacción más largos que un estímulo con mayor intensidad; y (2) más tiempo percibiendo un estímulo equivale a incrementar la intensidad de dicho estímulo. Esto les llevó a proponer una nueva regularidad psicofísica, que denominaron “equivalencia entre tiempo e intensidad en la discriminación” (TIED, del inglés time-intensity equivalence in discrimination).

La TIED no sólo ofrece una explicación de los fenómenos que abarcaba la ley de Weber, sino que va más allá y permite hacer nuevas predicciones acerca del efecto de la duración y la intensidad de los estímulos sobre la experiencia subjetiva que provocan. La TIED representa una oportunidad para eliminar la ambigüedad entre las diferentes explicaciones propuestas para la ley de Weber ya que supone que los cambios en la intensidad absoluta de dos estímulos que se discriminan bajo una relación de intensidad fija son

completamente equivalentes a un cambio en la unidad de tiempo efectiva con la que se mide la duración de la discriminación (Pardo-Vazquez et al., 2019).

Teoría de detección de señales (TDS)

La teoría de la detección de señales (TDS) es ampliamente aceptada en el campo de la psicofísica; el Índice de Citación de Ciencias Sociales recoge más de 2.000 referencias a un influyente libro de Green y Swets publicado en 1966 que describe la TDS y su aplicación a la psicología (Stanislaw & Todorov, 1999). Pese a esto, son pocos los textos que definen y explican realmente qué es la TDS y qué procesos la componen. Un ejemplo típico es el libro de texto de percepción de Goldstein en 1966, que concluye una descripción de nueve páginas de la TDS diciendo que “las medidas prescritas para la TDS pueden calcularse mediante un procedimiento matemático que no discutiremos aquí” (Goldstein, 1966 citado por Stanislaw & Todorov, 1999).

En rasgos generales, la teoría de la detección es un enfoque psicofísico general para medir el rendimiento (Macmillan & Creelman, 2005). Representa una forma de detectar óptimamente una señal en términos puramente estadísticos y proporciona una visión del problema de cómo se detecta una señal determinada, replantea la tarea como un proceso de decisión, añadiendo una dimensión cognitiva (Wallisch et al., 2009). Su alcance incluye la experimentación diaria de muchos psicólogos, científicos sociales y médicos que estudian los procesos de decisión (Macmillan & Creelman, 2005).

La TDS es un medio para medir la capacidad de discriminar entre dos distribuciones gaussianas con la misma varianza que representan dos categorías de estímulos experimentales, que normalmente se denominan ruido y señal. El desempeño discriminatorio de un participante de estas dos categorías se caracteriza por la distancia entre las dos distribuciones dividida por su desviación estándar compartida. Esta cantidad se define como la sensibilidad de discriminación d' (Huang & Ferreira, 2020) la cual se puede ver en la *figura 1*. La distribución de la señal son los patrones portadores de información y la distribución del ruido son patrones aleatorios que distraen de la información principal como son estímulos de fondo y actividad aleatoria que no es objetivo de una medición. Esta situación de discriminación depende de dos procesos independientes entre sí, pero que al presentarse simultáneamente provocan un resultado final en forma de respuesta. El primero

hace referencia a la d' que se mencionó anteriormente, donde entran en juego tanto la intensidad de la señal emitida como la sensibilidad del sujeto para percibir la señal. El segundo es el proceso de decisión donde cada sujeto posee un propio criterio. El criterio de decisión o c' (figura 1) es el componente cognitivo de la persona que va a determinar qué elección tomar, es el punto de corte que separa las dos distribuciones y está influido por otros tipos de factores cognitivos como lo son la experiencia previa, personalidad, expectativas, etc.

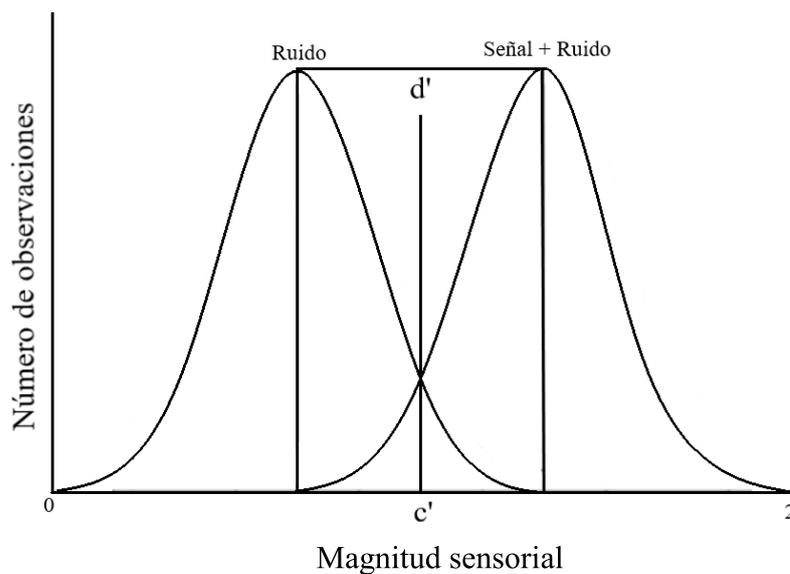


Figura 1. Ilustración visual de elementos de la TDS. Se representan visualmente los elementos de la TDS. En el eje X está la magnitud sensorial; en el eje Y el número de observaciones. La d' es la distancia entre las medias de las dos distribuciones. El c' está ubicado verticalmente y representa el proceso decisorio del sujeto.

Desde la perspectiva de la teoría de detección de señales, en un experimento de discriminación hay dos tipos de estímulos y dos decisiones posibles, lo cual crea cuatro combinaciones lógicas (Huang & Ferreira, 2020). En consecuencia, la localización del criterio respecto a las distribuciones de la señal y del ruido permite definir las cuatro combinaciones: aciertos (A) o hits, rechazos correctos (RC) o correct rejection, las omisiones o misses y las Falsas Alarmas (FA). Para el análisis solo se opera con los aciertos y las falsas alarmas, ya que los otros dos tipos de datos (errores y rechazos correctos) son sus correspondientes valores complementarios por tanto sería redundante esta información.

Por todo lo anterior, es relevante mencionar que la TDS permite medir de forma independiente los componentes sensorial y cognitivo asociados a la respuesta del participante. La medida de la capacidad de los participantes para distinguir entre los estímulos se define por la inversa de la función de distribución normal de A y FA (Green y Sweets, 1966 citado por Huang & Ferreira, 2020) Para calcular la d' numéricamente se utiliza la fórmula $d' = z(A) - z(FA)$; y para el criterio se utiliza la fórmula $c = \frac{-z(A) + z(FA)}{2}$.

Random dot motion

Uno de los experimentos más comunes para evaluar la precisión en la discriminación del movimiento en la modalidad visual son las tareas de movimiento de puntos aleatorios (RDM en inglés *random dot motion*). En su mayoría están elaboradas para detectar la dirección de una nube de puntos y la dificultad varía con el nivel de coherencia del movimiento de dichos puntos. Un ejemplo de ello es el estudio hecho por Rina et al (2022) en el cual debían hacer la discriminación del movimiento de los puntos usando su visión periférica para evaluar la dirección del movimiento del estímulo y en otros casos fijaban su mirada en el estímulo. Otros autores (Zanker & Braddick, 1999) han estudiado esta tarea para observar como el ruido afecta la calidad de la velocidad percibida del movimiento coherente; y en otros casos (Mateeff et al., 2000) para estudiar como la apertura circular afecta en la discriminación del movimiento.

En este experimento manipulamos la dificultad con las diferencias en la velocidad de los puntos de S1 y S2 en el momento de dar un juicio perceptivo.

II. Objetivos

General:

- Comprobar si se cumple la equivalencia de tiempo-intensidad en la percepción del movimiento.

Específicos:

- Observar si se cumple la ley de Weber en tareas de discriminación en la modalidad visual en juicios acerca de la velocidad del movimiento de dos patrones de puntos aleatorios presentados secuencialmente.

- Observar si la TIED se cumple en tareas de discriminación en la modalidad visual en juicios acerca de la velocidad del movimiento de dos patrones de puntos aleatorios presentados secuencialmente.
- Comparar los resultados obtenidos con las predicciones derivadas de la ley de Weber y en la TIED.

III. Material y Métodos

Participantes

Participaron diez voluntarios sanos, cuatro hombres y seis mujeres, con edades comprendidas entre los 24 y 40 años, con visión normal o corregida a normal. Los participantes dieron su consentimiento informado y no recibieron ninguna compensación monetaria.

Configuración de la tarea

Se presentaron dos estímulos (S1 y S2) secuencialmente, los cuales contenían 100 puntos en movimiento con un 80% de coherencia dentro de una apertura circular con un diámetro de 2° de ángulo visual (dva) posiciones del S1 y S2. Los puntos individuales tenían un tamaño de 0,1 dva. El movimiento de los puntos se estableció en tres rangos de velocidades posibles (Tabla 1) distribuidas de la siguiente forma:

- El S1 al mostrarse primero fue el estímulo de referencia, por lo tanto, correspondería con la primera velocidad, es decir V1, las cuales podían ser V1=9°/s, V1=11°/s, V1=13°/s.
- El S2 al mostrarse segundo era el estímulo de comparación, por lo tanto, correspondería con la segunda velocidad, es decir V2. Las velocidades de S2 tenían 8 posibles combinaciones con respecto a la V1, a estas las llamaremos “diferencias de velocidad (V2-V1)” [-8 -4 -2 -1 +1 +2 +4 +8].

Los tres rangos de velocidad contarían con 8 posibles variaciones de velocidades, dando un total de 24 condiciones. Por ejemplo, en el caso de que se presentara en el S1 la V1= 9°/s el S2 tendría como posibles velocidades V2 = [1 5 7 8 10 11 13 17].

Tabla 1. Rangos de velocidades para S1 y S2.

Velocidades base: [9 11 13]

Diferencias de velocidades (Condiciones) : [-8 -4 -2 -1 +1 +2 +4 +8]		
	S1	S2
Rango 1	V1=9	V2 = [1 5 7 8 10 11 13 17]
Rango 2	V1=11	V2 = [3 7 9 10 12 13 15 19]
Rango 3	V1=13	V2 = [5 9 11 12 14 15 17 21]
Total = 24 condiciones		

Configuración experimental

Para llevar a cabo los experimentos se utilizó un sistema de seguimiento ocular (Eyelink 1000) y una caja de herramientas MATLAB de control de comportamiento y adquisición de datos (MonkeyLogic2). Las tareas experimentales se implementaron utilizando bibliotecas de MonkeyLogic2, que permiten programar procedimientos experimentales personalizados. Durante los experimentos, la información del movimiento ocular de los participantes y los resultados de las pruebas se procesaron y almacenaron para su posterior análisis.

Se utilizó un monitor con una frecuencia de actualización alta (120 Hz) para mejorar el rendimiento del software y la precisión temporal al momento de mostrar los estímulos y capturar el comportamiento de los participantes. El montaje tenía dos ordenadores, uno con el EyeTracking y otro con MATLAB y MonkeyLogic2.

Procedimiento experimental:

Los participantes se sentaron en una silla mirando a un monitor que estaba a una distancia de un metro. A continuación, se les instruyó a los participantes para que colocaran la cabeza en una mentonera, ajustando la altura para cada participante. Esto se hizo para realizar la configuración del sistema de seguimiento ocular después de seleccionar el ojo para seguir, en este caso se utilizó el ojo izquierdo. Este proceso requería ajustar el nivel de reflexión de luz e infrarrojos para optimizar la detección de ojos, un paso fundamental para obtener un buen rendimiento del programa de adquisición de datos, ya que depende de la detección del reflejo pupilar y corneal a la luz para calcular los movimientos oculares. Uno de los problemas más comunes con este sistema venía de los usuarios con gafas, dado que, para la

detección del reflejo corneal, la cámara utiliza luz infrarroja y algunas gafas filtran ciertas frecuencias de luz dificultando la detección.

Antes de iniciar las tareas, se requería un procedimiento de calibración para ajustar el movimiento de los ojos a la resolución de la pantalla. Se instruyó al participante para que fijara su vista en unos cuadrados blancos que aparecían en diferentes posiciones en la pantalla hasta que el supervisor del experimento pudiera ver una clara correlación entre el movimiento de los ojos y los cuadrados mostrados.

Finalmente, se instruyó a los participantes para que realizaran la tarea experimental. Las mediciones y la configuración inicial duraron entre 10 y 20 minutos. El resto de la sesión (aproximadamente 45 minutos) se dedicó a la realización de la tarea experimental. Cada participante debía completar 8 bloques, cada bloque contenía 72 ensayos, es decir cada condición aparecía tres veces. Por lo tanto, cada sujeto completó un total de 576 ensayos. Con el fin de reducir la variabilidad inducida por la fatiga, las sesiones experimentales se dividieron en dos, realizándose en días alternos.

Ejecución de la tarea

Los estímulos (S1 y S2) se presentaron, uno a continuación del otro, por encima del punto de fijación. Junto con el S2 se presentaron lateralmente los dos botones de respuesta. La instrucción que se le dio al sujeto consistió en que debía indicar con la mirada en cuál de las dos nubes de puntos iban más rápido los puntos que contenían. Una vez escogida la respuesta, el sujeto recibió el feedback (Figura 2).

Escena 1: Fijación

Punto de fijación con una duración de 2000 ms de espera para que se produzca la fijación de la mirada. Luego 200 ms donde el sujeto debe mantener la mirada en el punto de fijación. Seguidamente un retraso de 250 ms.

Escena 2: S1

El estímulo se presentó superpuesto al punto de fijación por un periodo de 1500 ms, seguidamente un retraso de 250 ms.

Escena 3: S2

El estímulo se presentó por un periodo de 1500 ms. Lateralmente, se presentaron dos botones de respuesta simultáneamente con el S2. De esta forma, el participante podía indicar el estímulo elegido llevando la mirada al botón de respuesta de la izquierda (cuando el estímulo elegido era el primero) o a la derecha (cuando era el segundo).

Escena 4: Feedback

Seguido de la respuesta que escogió el participante apareció un feedback con duración de 500 ms. Este podía ser correcto, cuando la persona escogía con la mirada el estímulo que iba más rápido; incorrecto cuando la persona escogía con la mirada el estímulo que iba más lento o ¡Mas rápido! Cuando tardaba en dar una respuesta.

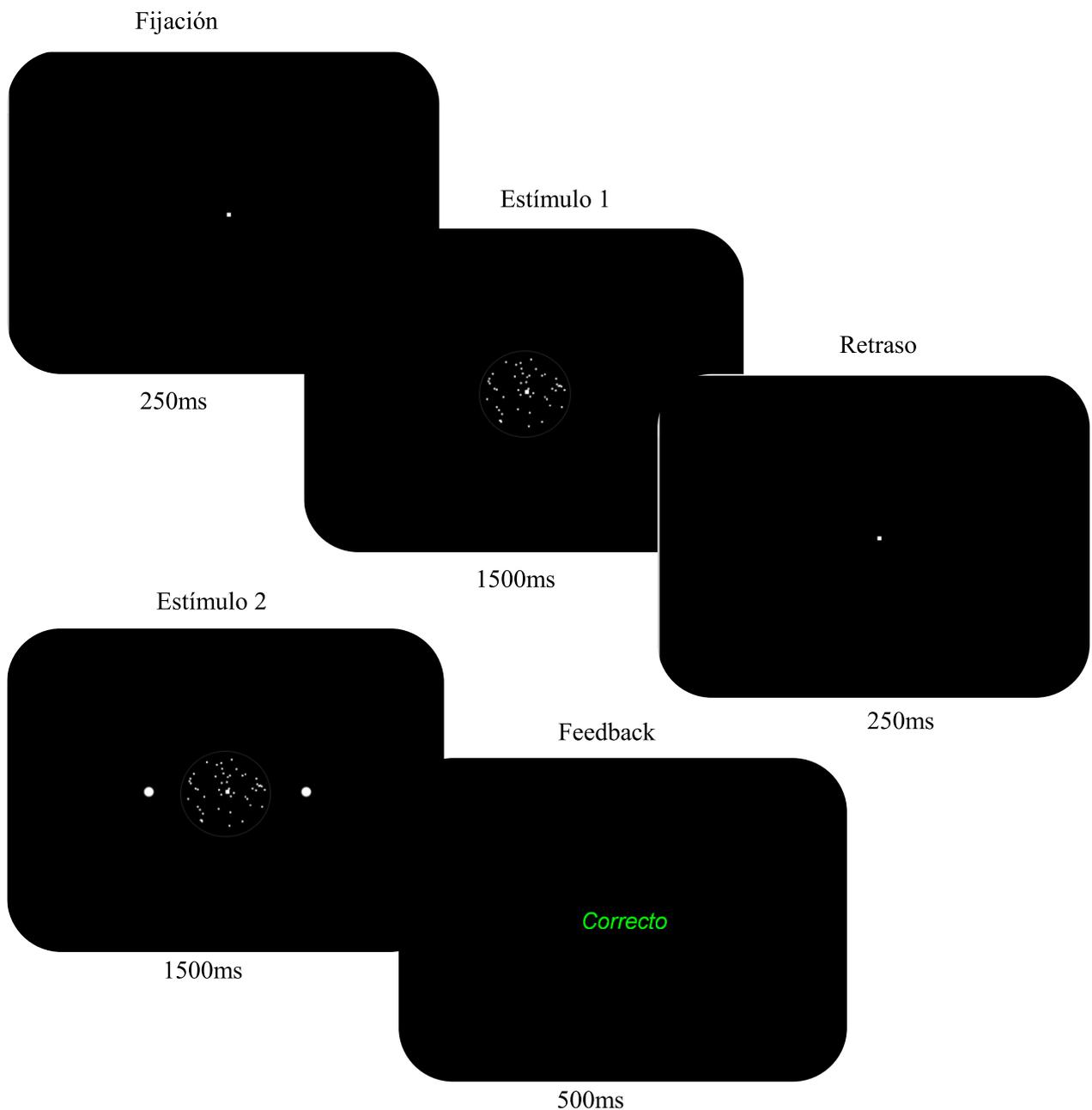


Figura 2. Escenas de la tarea experimental. La tarea de discriminación visual comenzaba con la presentación de un punto de fijación en el centro de la pantalla. El participante debía de mirar a ese punto para iniciar el ensayo y mantener la mirada en él hasta el momento en que emitía un juicio perceptivo.

Análisis de datos

Se realizó una completa caracterización conductual, utilizando herramientas derivadas de la teoría de detección de señales, como la sensibilidad (d') y el criterio (c) y también las curvas psicométricas.

Precisión de la respuesta

Partiendo del supuesto que la ley de Weber es menos restrictiva que la TIED ya que sólo arroja datos sobre la precisión, se utilizó la TDS para medir este aspecto y así observar la diferencia apenas perceptible entre los dos estímulos.

Desde la perspectiva de la TDS se hizo una matriz de 2x2 donde se presentaban los dos tipos de estímulos con las dos decisiones posibles (Mirar a la derecha o a la izquierda) lo cual posibilitó la creación de las cuatro combinaciones lógicas (Tabla 2).

Tabla 2. Combinaciones lógicas.

		Velocidad	
		Derecha (S2)	Izquierda (S1)
Respuesta del sujeto	Derecha	Aciertos	Falsas Alarmas
	Izquierda	Errores	Rechazos correctos

Si la velocidad de los puntos del S2 era mayor que la del S1, la respuesta correcta sería mirar la derecha. Por eso si la respuesta del sujeto fue mirar a la derecha cuando la respuesta correcta era derecha a esto se le llamó Acierto (A). Si la velocidad de los puntos del S1 era mayor que la del S2, la respuesta correcta sería mirar la izquierda. Por eso, si la respuesta del sujeto fue mirar a la derecha cuando la respuesta correcta era la izquierda se le llamó Falsa alarma (FA). Si la velocidad de los puntos del S1 era mayor que la del S2, la respuesta correcta sería mirar la izquierda. Por eso, si la respuesta del sujeto fue mirar a la izquierda cuando la respuesta correcta era la izquierda se tomó como Rechazo Correcto (RC). Si la

velocidad de los puntos de S2 es mayor que la del S1 la respuesta correcta sería mirar la derecha. Por eso, si la respuesta del sujeto fue mirar a la izquierda cuando la respuesta correcta es derecha se le llamó Error (E).

Para calcular la d' se utilizó su expresión matemática:

$$d' = z(pA) - z(pFA)$$

Para calcular el c' se utilizó su expresión matemática:

$$c = \frac{-z(pA) + z(pFA)}{2}$$

Las proporciones de Aciertos y Falsas alarmas (ver tabla 2) para cada uno de los rangos de velocidad (V9, V11, V13) de cada uno de los sujetos se obtuvieron de la siguiente forma:

Proporción de Aciertos

$$pA = A/(A+E)$$

Proporción de Falsas alarmas

$$pFA = FA/(FA + RC)$$

Curvas psicométricas

Debido a que la ley de Weber establece que la precisión de la discriminación solo debe depender de las relaciones de intensidad se hizo uso de las funciones psicométricas para observar el rendimiento de los sujetos para cada V1 en relación a la intensidad de la V2. En esta curva se analizó la proporción de que el sujeto responda derecha ($V2 > V1$) en función de la diferencia de velocidad entre los dos estímulos.

Tiempo de reacción

Se registró en cada ensayo el tiempo transcurrido entre la presentación del S2 y la respuesta del sujeto, es decir, el tiempo de reacción. Para cada sujeto calculamos el promedio del tiempo de reacción en cada condición experimental. Se hizo un ANOVA de dos vías para ver el efecto de la velocidad de S1 y de la diferencia de velocidad ($V2-V1$) sobre los TR para

cada sujeto y se utilizó un IC del 95% . Para corregir los grados de libertad de F se utilizó la corrección de Greenhouse-Geisser.

IV. Resultados

Analizando las probabilidades de que el sujeto determinara que $V2 > V1$ y por lo tanto mirara a la derecha, se observó la relación entre la intensidad del estímulo y la sensación que produce en el sujeto. En la $V1 = 9$ °/s para la condición -8 la probabilidad de decir que V2 va más rápido que V1 es prácticamente 0 en la mayoría de los sujetos (tabla 3). Esto quiere decir que los sujetos diferenciaron casi a la perfección V1 de V2 y supieron que V1 es más rápida en este caso. A medida que se asciende hasta la condición -1 la probabilidad de decir derecha aumenta porque la diferencia entre las velocidades es más difícil de percibir. Después de la condición 1 se ve que es más probable escoger derecha porque la diferencia de velocidades es más notoria según van aumentando, pero además en esas condiciones la respuesta correcta se ubica a la derecha. De nuevo en la tabla 3 se observa que en la $V1 = 9$ °/s para la condición +8 la probabilidad de decir que V2 va más rápido que V1 es prácticamente 1 en la mayoría de los sujetos (como es el caso de los sujetos 5,7,8,9).

Tabla 3. Proporción de respuestas derecha (o $V2 > V1$) para $V1 = 9$ °/s en función de la diferencia de velocidad entre el S2 y el S1

Sujetos	V2-V1							
	-8	-4	-2	-1	1	2	4	8
1	0,08	0,08	0,25	0,46	0,75	0,88	0,92	0,88
2	0,08	0,04	0,50	0,46	0,92	0,88	0,96	0,83
3	0,25	0,21	0,46	0,33	0,79	0,83	0,92	0,63
4	0,16	0,17	0,63	0,54	0,71	0,83	0,58	0,96
5	0,04	0,04	0,04	0,04	0,21	0,71	1,00	1,00
6	0,04	0,13	0,33	0,71	0,92	0,75	0,88	0,92
7	0,08	0,13	0,42	0,38	0,83	0,79	0,96	1,00
8	0,00	0,00	0,33	0,67	0,83	0,75	0,96	1,00
9	0,00	0,00	0,21	0,71	1,00	0,92	0,96	1,00
10	0,00	0,00	0,17	0,25	0,58	1,00	0,96	0,83

La relación matemática de dichas proporciones para cada velocidad se pudo observar por medio de una función psicométrica con una curva sigmoide. Estas curvas psicométricas nos permiten comprobar si la ley de Weber se está cumpliendo. Es decir, que se percibe el incremento de la intensidad en términos absolutos para cada $V1$ a medida que aumenta la intensidad. El caso de $V1=9^\circ/s$ es el rango de velocidad más fácil porque la probabilidad de discriminar las velocidades de ambos estímulos es mayor que en el caso de $V1=11^\circ/s$ que sería el siguiente rango con mayor complejidad y $V1=13^\circ/s$ que sería el rango más difícil. Además, esa probabilidad de discriminación también es diferente entre la $V1=11^\circ/s$ y $V1=13^\circ/s$. Por ejemplo, en el eje x para las condiciones +1 +2 +4 +8 la probabilidad de mirar a la derecha para $V1=13^\circ/s$ se encuentra por debajo de $V1=11^\circ/s$ y de $V1=9^\circ/s$ (Figura 3).

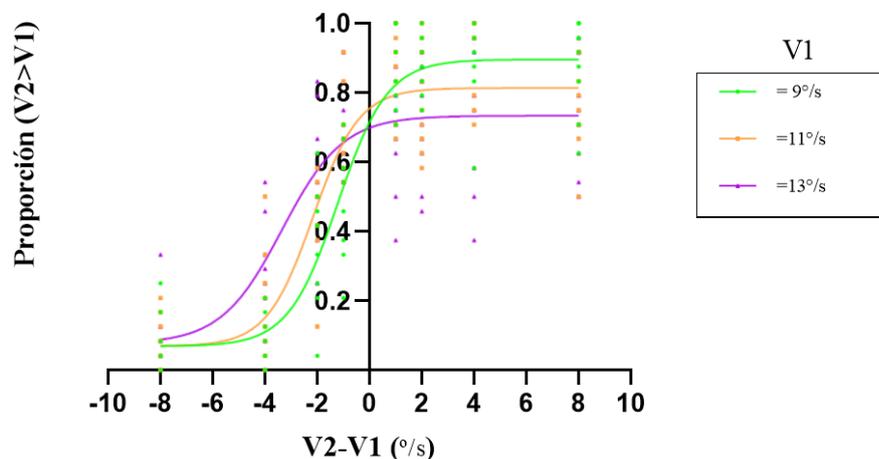


Figura 3. Proporción de respuesta derecha (o $V2 > V1$) para las tres velocidades de $S1$ en función de $V2 - V1$. Cada punto representa los datos de un participante y las curvas se ajustaron al promedio de la muestra.

Los resultados que se obtuvieron para d' permiten observar de nuevo que la ley de Weber y la TIED se cumplen en relación a la precisión. Se ve que para la $V1=9^\circ/s$ los valores de d' son más altos que para $V1=11^\circ/s$ y $V1=13^\circ/s$, es decir que la distancia entre las distribuciones de ruido y señal es mayor, por lo tanto, es más sencillo para los sujetos diferenciar las velocidades de los estímulos (ver figura 4) así mismo para el caso de $V1=11^\circ/s$ se observa que tiene valores de d' más altos que $V1=13^\circ/s$. Es decir, los valores d' son $V1=9^\circ/s > V1=11^\circ/s > V1=13^\circ/s$.

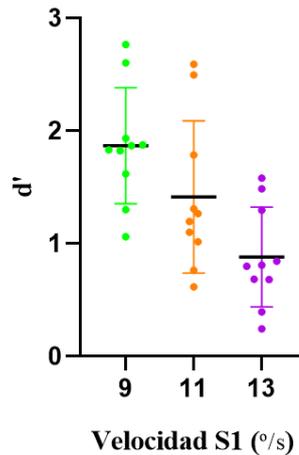


Figura 4. La precisión de las respuestas disminuye al aumentar la velocidad del S1. Cada punto representa la d' obtenida por un participante, las barras horizontales señalan la media y las barras de error la desviación típica.

Para saber la significación estadística de las d' en las diferencias entre las velocidades se realizó un test de permutaciones. Para el caso de $V1=9^\circ/s$ con $V1=11^\circ/s$ no se encontró significación estadística con un valor $p=0,10$. Sin embargo las diferencias entre $V1=9^\circ/s$ y $V1=13^\circ/s$ obtuvo un valor de $p < 0,0001$ siendo evidente que la capacidad para discriminar entre las distribuciones de $V=9$ en cada una de las condiciones es mayor que la capacidad de discriminación con $V1=13$. En el caso de las diferencias entre $V1=11^\circ/s$ y $V=13^\circ/s$ se obtuvo un valor de $p=0,05$.

La respuesta de los sujetos es muy variable, de manera que la sensibilidad puede ser igual en varios sujetos, pero pueden diferir sólo en el criterio.

El criterio no cambia significativamente entre velocidades del $V1$, manteniéndose constante en valores próximos a -0.3 , lo que indica que los sujetos tienen a responder que $V2 < V1$ sobreestimando la velocidad del S1. Además, se observa un claro incremento de la variabilidad entre sujetos a medida que aumenta la velocidad del S1. Esto se puede deber a que aumenta la ambigüedad de la evidencia sensorial y las respuestas del sujeto son más independientes de ésta

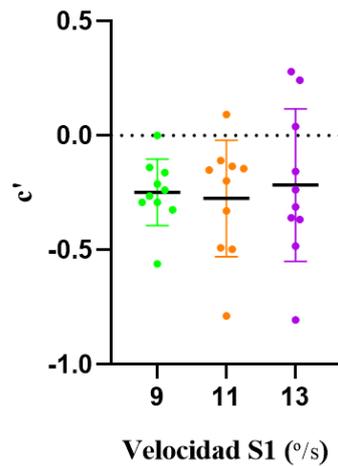


Figura 5. Criterio de decisión para cada velocidad del S1. Cada punto representa a un participante, la barra horizontal indica la media y las barras de error la desviación típica.

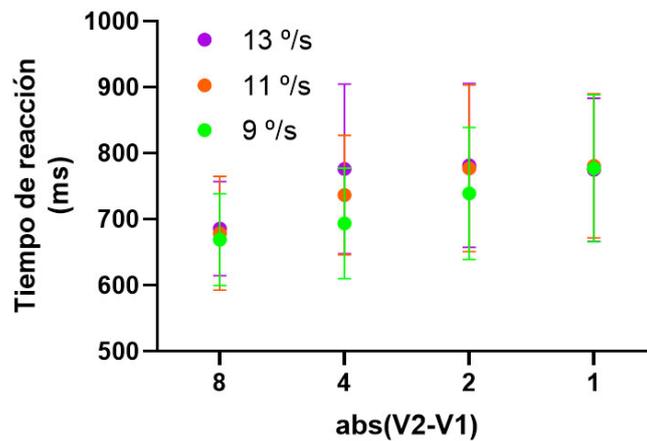


Figura 6. La velocidad de las decisiones aumenta con la dificultad de la discriminación y con la velocidad del S1. Tiempo de reacción promedio y desviación típica para ensayos correctos en función de la velocidad del S1 y del valor absoluto de V2-V1.

Se realizó un ANOVA de dos vías para comparar el efecto de las diferentes velocidades de S1 y el efecto de los estímulos de comparación (V2-V1) en los tiempos de reacción. Para hacer el ANOVA con los tiempos de reacción se agruparon los ensayos en función de cada valor absoluto de V2-V1: -8 +8, -4 +4, -2 +2, -1 +1. Se observó que las medias en los TR para cada velocidad S1 varían significativamente ($F=5.566$; $p<0.05$) de forma que para estímulos menos intensos el tiempo de reacción es más corto que para los estímulos más intensos. Es decir, los sujetos resuelven más rápido un ensayo cuando S1 tiene una $V1=9^\circ/s$

que cuando tienen $V1=11^\circ/s$ y $V1=13^\circ/s$. La dificultad de los estímulos de comparación ($V2-V1$) también afecta las medias en los TR significativamente ($F=17,93$; $p < 0,05$). De forma que, cuanto menos intensa es $V2$ el tiempo de reacción es más lento. La interacción entre $S1$ y $V2-V1$ afectan significativamente los TR ($F=3,235$; $p < 0,05$). Siendo así, las velocidades menos intensas de $S1$ con las velocidades más intensas en $S2$ son las que tienen mejor resolución y por lo tanto un TR menor. A medida que aumenta la intensidad en $S1$ y disminuye en $S2$ el TR es mayor.

V. Discusión

La TIED hace dos predicciones sobre los resultados. Por un lado, la sensibilidad, y por tanto la precisión de las respuestas, será menor cuanto más intensos sean los estímulos. En nuestro caso, cuanto mayor sea su velocidad. Por otro lado, los tiempos de reacción de un estímulo menos intenso serán más largos en relación a los estímulos más intensos. El primer aspecto se comparte con la Ley de Weber que afirma que las diferencias apenas perceptibles de un estímulo son constantes, pero para que el sujeto note un cambio en esa sensación el estímulo físico tiene que aumentarse en una proporción constante de su magnitud real (Fontes & Fontes, 1994). Nuestros resultados son consistentes con esto, porque se percibían con mayor precisión las comparaciones de $V1=9$ que las de $V=13$. Esto significa que un incremento de velocidad, en ambas velocidades no se percibe de la misma forma. Por eso la d' y, por lo tanto la precisión de la respuesta, fue mayor cuando los estímulos $S1$ eran menos intensos. Estos resultados se contradicen aparentemente con los de Liang et al (2016), quienes aplicaron la teoría de detección de señales a la discriminación de movimiento usando puntos aleatorio de 100% de coherencia. La dificultad estaba mediada por la diferencia angular de 4° , 8° y 12° . En este trabajo se encontró que la sensibilidad fue mayor en 8° y 12° que 4° . Esto mismo ocurrió en el estudio hecho por Stürzel & Spillmann (2004) donde concluyeron que la ley de Weber se cumple en una tarea de puntos en movimiento donde el número de respuestas correctas para un grupo de puntos en movimiento coherente aumentó proporcionalmente con el aumento del número de puntos. Este efecto también se pudo ver a nivel individual de cada $V1$, no por la cantidad de puntos como el estudio de Stürzel & Spillmann (2004) o por la diferencia angular como en el caso de Liang et al (2016), sino por la diferencia de velocidades porque a medida que aumentaba la intensidad de $V2$ la tasa de acierto era mayor. En el caso de Mateeff et al (2000), compararon la capacidad de

discriminación en velocidades contiguas y separadas por un periodo de 1000 ms. Obtuvieron resultados similares, pero en la modalidad contigua, ya que concluyeron que la discriminación de velocidades contiguas mejora gradualmente al aumentar la velocidad de 2 a 16 °/s.

Como mencionamos anteriormente, la capacidad de discriminación fue mejor con la menor intensidad de V1, de forma que al aumentar de intensidad de S1 la d' y por lo tanto la capacidad de discriminar entre V1 y V2 empeoró. Caso similar es el de Snowden y Braddick (1991) citado por Mateeff et al (2000) quienes encontraron que para una frecuencia de modulación fija, la detección de velocidad se deteriora en lugar de mejorar con velocidades medias de movimiento más altas.

A nivel teórico la Ley de Weber funciona para cualquier continuo sensorial (Fontes & Fontes, 1994) y se puede extrapolar a modelos animales, como es el caso de Pardo-Vazquez et al (2019) uno de los autores de la TIED. Ellos estudiaron la Ley de Weber para entenderla y comprobar que condiciones eran necesarias para que se cumpliera. Para ello, entrenaron ratas para discriminar la intensidad relativa de los sonidos en los dos oídos en varios niveles absolutos. Se hizo de esta forma porque los roedores utilizan las diferencias de nivel interaurales (ILD) que involucra un circuito para la comparación de intensidades en los sonidos entre las orejas. Cuando hicieron el análisis conductual, lo que vieron fue que a pesar de utilizar decibelios (unidad logarítmica), las funciones psicométricas de las ratas se solapaban para tres niveles de intensidad, indicando un peor rendimiento para intensidades altas.

En relación a la segunda predicción de la TIED para este experimento, no se cumplió porque hubo diferencias en los tiempos de reacción, pero en la dirección opuesta a lo que predice la TIED; los TR son mayores para intensidades altas. Estos resultados se contraponen a lo que obtuvieron Pardo-Vazquez et al (2019) porque ellos al analizar los tiempos de reacción se dieron cuenta que tuvo variaciones y que era un parámetro importante porque influyó en la capacidad de discriminación. Las ratas respondían más rápido cuando la diferencia entre las intensidades es mayor, y más lento si la diferencia era menor. De hecho, cuando reducían el tiempo de presentación del estímulo en un momento arbitrario, se observó que la ley de Weber no se cumplía. En nuestro caso, uno de los factores que pudo haber influido en que estos tiempos de reacción no variaran en la dirección esperada pudo haber

sido el tiempo de presentación de ambos estímulos. Cuando se compara este experimento con el modelo animal, una de las diferencias es que en ratas se presentaba el estímulo hasta que emitía un juicio y en nuestro caso ese tiempo se limitó, lo que puede llevar a suponer que el sujeto no acumuló la suficiente evidencia porque no se presentó el estímulo suficiente tiempo.

En la misma línea, Stürzel & Spillmann (2004) mencionan que una disminución en el rendimiento puede atribuirse al tiempo de vida más corto pero no a las variaciones en la velocidad del punto. Es decir, que la sensibilidad se puede ver afectada por el tiempo que dura el estímulo, no por las variaciones en la velocidad del punto en sí.

Otra posibilidad para no haber notado diferencias en los tiempos de reacción pudo haber sido por las velocidades con las que se compararon los estímulos. Algunos estudios encontraron que no hay diferencias en la sensibilidad con una velocidad de $6,5^\circ/s$ (Grossman & Blake, 1999 ; Scase et al., 1996 ; Watamaniuk, Sekuler & Williams, 1989 citado por Stürzel & Spillmann, 2004). En nuestro caso, algunas condiciones estaban por debajo de esta velocidad. En la misma línea, Mateeff et al (2000) utilizaron un patrón de puntos aleatorios que se movía dentro de una abertura invisible para presentar dos movimientos separados en el tiempo. Los movimientos diferían en velocidad (2, 4, 8 y 16°) y en duración (125, 250, 500 y 1000 ms). Concluyeron que la disminución de la velocidad media y de la duración perjudicaron gradualmente la discriminación de velocidades, de forma que la capacidad para discriminar fue casi la misma para velocidades medias superiores a $8^\circ/s$ y duraciones superiores a 500 ms que las inferiores a $6^\circ/s$ y duraciones inferiores a 500 ms. A diferencia de Mateeff et al (2000), nuestros estímulos con las diferentes condiciones tuvieron una duración de 1500 ms y tuvo un promedio de tiempos de reacción en todas las intensidades (V1-V2) entre 700 ms y 850 ms. Es decir, el tiempo de presentación del estímulo no varió entre ensayos, lo que pudo haber difuminado el efecto de la duración en relación a la intensidad del estímulo.

En otro estudio de un modelo animal, Reinagel (2013) entrenó ratas para discriminar la dirección del movimiento visual en una pantalla coherente de movimiento de puntos aleatorios, y encontró que los ensayos correctos tienen tiempos de reacción más largos que los errores y la precisión aumenta con el tiempo de reacción y que el tiempo de reacción

aumenta con la ambigüedad del estímulo. El tiempo de decisión en este estudio tampoco tuvo límite como en Pardo-Vazquez et al (2019).

VI. Conclusión

La TIED plantea dos predicciones. Por un lado, la sensibilidad, y por tanto la precisión de las respuestas, será menor cuanto más intensos sean los estímulos. Por otro lado, los tiempos de reacción de un estímulo menos intenso serán más largos en relación a los estímulos más intensos. En relación a la primera predicción, se observa que si se cumple la ley de Weber y por tanto la TIED en tareas de discriminación en la modalidad visual en juicios acerca de la velocidad del movimiento de dos patrones de puntos aleatorios presentados secuencialmente en relación a la precisión. De forma que, la discriminación depende de la comparación entre la intensidad para cada V1 en relación a la intensidad de la V2, viéndose que la precisión de la respuesta es mejor en cuanto menor es su intensidad. Sin embargo, en la segunda predicción de la TIED no se cumple. En el caso de S1 para estímulos menos intensos el tiempo de reacción es más corto que para los estímulos más intensos y en el caso de S2 el TR es mayor entre menos intensos sean los estímulos.

Se comprobó que la equivalencia de tiempo-intensidad en la percepción del movimiento no se cumple. Las razones que pudieron influir en estos resultados pudieron ser las velocidades de los estímulos de comparación y la duración del tiempo de decisión.

VII. Referencias

- Fontes, S., & Fontes, A. (1994). *Consideraciones teóricas sobre las leyes psicofísicas*. *47*(4), 391-395.
- Heath, M., Mulla, A., Holmes, S. A., & Smuskowitz, L. R. (2011). The visual coding of grip aperture shows an early but not late adherence to Weber's law. *Neuroscience Letters*, *490*(3), 200-204. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2010.12.051>
- Huang, Y., & Ferreira, F. (2020). The Application of Signal Detection Theory to Acceptability Judgments. *Frontiers in Psychology*, *11*, 73. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00073>
- Liang, J., Zhou, Y., & Liu, Z. (2016). Examining the standard model of signal detection theory in motion discrimination. *Journal of Vision*, *16*(7), 9. <https://doi.org/10.1167/16.7.9>
- Macmillan, N. A., & Creelman, D. (2005). *Detection Theory: A User's Guide* (Vol. 2). Lawrence Erlbaum Associates.
- Mateeff, S., Dimitrov, G., Genova, B., Likova, L., Stefanova, M., & Hohnsbein, J. (2000a). The discrimination of abrupt changes in speed and direction of visual motion. *Vision Research*, *40*(4), 409-415. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00185-6](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00185-6)
- Mateeff, S., Dimitrov, G., Genova, B., Likova, L., Stefanova, M., & Hohnsbein, J. (2000b). The discrimination of abrupt changes in speed and direction of visual motion. *Vision Research*, *40*(4), 409-415. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00185-6](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00185-6)
- Pardo-Vazquez, J. L., Castiñeiras-de Saa, J. R., Valente, M., Damião, I., Costa, T., Vicente, M. I., Mendonça, A. G., Mainen, Z. F., & Renart, A. (2019). The mechanistic

foundation of Weber's law. *Nature Neuroscience*, 22(9), 1493-1502.

<https://doi.org/10.1038/s41593-019-0439-7>

Reinagel, P. (2013). Speed and accuracy of visual image discrimination by rats. *Frontiers in Neural Circuits*, 7. <https://doi.org/10.3389/fncir.2013.00200>

Rina, A., Papanikolaou, A., Zong, X., Papageorgiou, D. T., Keliris, G. A., & Smirnakis, S. M. (2022). Visual Motion Coherence Responses in Human Visual Cortex. *Frontiers in Neuroscience*, 16, 719250. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.719250>

Shen, J. (2003). On the foundations of vision modeling. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 175(3-4), 241-251. [https://doi.org/10.1016/S0167-2789\(02\)00734-0](https://doi.org/10.1016/S0167-2789(02)00734-0)

Stanislaw, H., & Todorov, N. (1999). Calculation of signal detection theory measures. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 31(1), 137-149.

<https://doi.org/10.3758/BF03207704>

Stürzel, F., & Spillmann, L. (2004). Perceptual limits of common fate. *Vision Research*, 44(13), 1565-1573. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2003.12.019>

Wallisch, P., Lusignan, M., Benayoun, M., Baker, T., & Dickey, A. (2009). Teoría de detección de señales. En *Matlab for Neuroscientists* (pp. 97-113).

Zanker, J. M., & Braddick, O. J. (1999). How does noise influence the estimation of speed? *Vision Research*, 39(14), 2411-2420. [https://doi.org/10.1016/S0042-](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00036-X)

[6989\(99\)00036-X](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00036-X)