



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
MAESTRÍA EN CIENCIAS (NEUROBIOLOGÍA)
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA

LA PERCEPCIÓN DE IRREGULARIDAD TEMPORAL EN HUMANOS ¿DECIDIMOS POR
DETECCIÓN O ACUMULACIÓN DE EVIDENCIA?

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA

MARISOL ESPINOZA MONROY

TUTOR PRINCIPAL

DR. VICTOR HUGO DE LAFUENTE FLORES
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA, UNAM

COMITÉ TUTOR

DR. HUGO MERCHANT NANCY
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA, UNAM

DR. PAVEL ERNESTO RUEDA OROZCO
INSTITUTO DE NEUROBIOLOGÍA, UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Universidad Nacional Autónoma de México

Instituto de Neurobiología

Los miembros del Jurado certificamos que la tesis elaborada por: Espinoza Monroy Marisol, cuyo título es: “La percepción de irregularidad temporal en humanos ¿Decidimos por detección o acumulación de evidencia?” se presenta como uno de los requisitos para obtener el grado de Maestría en Ciencias (Neurobiología) y cumple con los criterios de originalidad y calidad requeridos por la División de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Presidente

Dr. José Fernando Peña Ortega

Secretario (Tutor)

Dr. Victor Hugo de Lafuente Flores

Vocal

Dr. Román Rossi Pool

Suplente

Dr. Hugo Merchant Nancy

Suplente

Dr. Oscar Zamora Arévalo

Aprobado por el Comité Académico

Dra. Maricela Luna Muñoz

RESUMEN

LA PERCEPCIÓN DE IRREGULARIDAD TEMPORAL EN HUMANOS ¿DECIDIMOS POR DETECCIÓN O ACUMULACIÓN DE EVIDENCIA?

Nuestra habilidad para distinguir entre eventos repetitivos con una estructura temporal regular o irregular determina el éxito que tendremos al calcular su ocurrencia en futuras ocasiones. Aunque anticiparnos a un ambiente dinámico resulta fundamental para tomar ventaja de éste, sabemos poco de los mecanismos que realizan decisiones perceptuales de este tipo, específicamente, en la escala de milisegundos. Nuestros objetivos fueron evaluar la sensibilidad de participantes humanos para percibir diferencias en los tiempos de repetición de pulsos auditivos, táctiles o visuales y revelar los posibles mecanismos utilizados para identificarlos como estímulos Regulares o Irregulares. Diseñamos y aplicamos a 15 participantes una tarea de detección de irregularidad con la que registramos sus respuestas y tiempos de respuesta en un total de 22140 ensayos. Las curvas psicométricas sugieren que el sistema auditivo es más sensible a la irregularidad y que la ejecución es escalable a la duración media de repetición de los pulsos en los estímulos. Las curvas cronométricas disminuyeron con la irregularidad y mostraron un efecto semejante a un *costo* por evidencia obtenida. Utilizando un modelo computacional, con parámetros intuitivamente representativos para resolver la tarea, reprodujimos la ejecución promedio y contrastamos las hipótesis de detección y acumulación de evidencia, encontrando mejores ajustes a los datos bajo la segunda versión. Sin embargo, dejando variar libremente al parámetro de memoria, encontramos que la mejor representación de la ejecución promedio es una versión intermedia en la que, simultáneamente, ocurren acumulación y olvido de evidencia mientras transcurre el estímulo.

ABSTRACT

TEMPORAL IRREGULARITY PERCEPTION BY HUMANS. DO WE DECIDE DETECTING OR ACCUMULATING EVIDENCE?

Our ability to distinguish between repetitive events with a regular or irregular temporal structure determines the success we will have calculating its occurrence in future occasions. Although anticipating a dynamical environment is essential to take advantage of it, we know little about the mechanisms that make perceptual decisions of this type, specifically, in the millisecond scale. Our aims were to evaluate the sensitivity of human participants to perceive differences in the repetition times of auditory, tactile, or visual pulses and to reveal the possible mechanisms used to identify them as Regular or Irregular stimuli. We designed and applied to 15 participants an irregularity detection task with which we recorded their responses and response times in a total of 22140 trials. The psychometric curves suggest that the auditory system is more sensitive to irregularity and the performance is scalable to the mean duration of repetition of the pulses in the stimuli. The chronometric curves decreased with irregularity and showed an effect like a *cost* due to obtained evidence. Using a computational model, with intuitively representative parameters to solve the task, we reproduce the mean performance and contrasted the detection and an evidence accumulation hypothesis, finding better fits to data under the later version. However, leaving the memory parameter to vary freely, we found that the best representation of mean performance is an intermediate version in which, simultaneously, accumulation and forgetting of evidence occurs while the stimulus is running.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por todo lo que ha contribuido a mi formación personal y profesional. A la Dirección General de Estudios de Posgrado de la UNAM.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para realizar mis estudios de maestría (CVU: 772680).

Al proyecto PAPIIT (IN207818) “Evaluación de la viabilidad de sustituir la estimulación cerebral profunda del núcleo subtalámico por estimulación de una región específica de la corteza motora primaria, para el tratamiento de los síntomas de la enfermedad de Parkinson”, por el apoyo complementario escribir este trabajo.

Al Instituto de Neurobiología de la UNAM y al programa de Maestría en Ciencias (Neurobiología), por la oportunidad que me han dado de aprender a lado de todos ustedes.

A la M. en C. Leonor Casanova Rico, a Guadalupe Amador Uribe y a la Dra. Nuri Aranda López de la Unidad de Enseñanza del Instituto de Neurobiología, por su enorme y amable disposición para apoyarnos siempre y a pesar de nuestros despistes.

A la Lic. Lourdes Lara Ayala de la Unidad de Videoconferencia del Instituto de Neurobiología, al personal de la Biblioteca del Campus UNAM Juriquilla, al Ing. Ramón Martínez Olvera, al M. en C. Alberto Lara Rubalcava y al Ing. Omar González Hernández de la Unidad de Cómputo del Instituto de Neurobiología, por facilitar enormemente nuestro trabajo cotidiano.

Al M. en C. Edgar Bolaños, Técnico Académico del Laboratorio de Sistemas Sensoriales y Planeación Motora, B-05, por su trabajo dedicado a mejorar el mío.

A los miembros del Comité Tutor y los miembros del Jurado para el examen de grado, por sus observaciones, comentarios y las discusiones que siempre me ayudaban a revivir el entusiasmo por entender más sobre mi tema de investigación. A Víctor, por todos los desafíos que me ha impulsado a enfrentar y superar.

En especial a la mamá Ofe, al papá Toño, a mis hermanos Selene y Héctor, a bbmink y a la Tía-bb, a mis amigos de siempre y a los que recién conozco, a Jaime, Eduardo, Raúl, Miriam y Santiago, a Gaby, Mayra, Rubén y a Fer. Todos ustedes son los verdaderos gigantes en mi vida, sobre cuyos hombros me siento a contemplar el horizonte.

Gracias a los participantes que contribuyeron con su tiempo y esfuerzo para realizar esta investigación.

ÍNDICE

Resumen	II
Abstract	III
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
2.1. Sistemas acoplados al tiempo y espacio	3
2.2. Secuencias de intervalos	7
2.3. Métodos de estudio y psicofísica de la percepción de tiempo	8
2.4. La función psicométrica	11
2.5. Efectos de modalidad sensorial	12
2.6. Efecto de la magnitud de la duración a evaluar	13
3. Justificación	15
4. Hipótesis	18
5. Objetivos	19
5.1. Objetivo general	19
5.2. Objetivos específicos	19
6. Método	20
6.1. Participantes	20
6.2. Programas y equipo	20
6.3. La tarea de percepción de irregularidad	21
6.3.1. Pulsos	23
6.3.2. “Puntos” de fijación sensorial e intervalos	24
6.3.3. Duración de los intervalos e irregularidad	26
6.3.4. Los ensayos	27
6.3.5. La retroalimentación	30
6.4. Diseño experimental	32
6.5. Procedimiento	34
7. El modelo de decisión	35
8. Resultados	43

8.1. Análisis psicométrico y cronométrico	43
8.1.1. Ejecución general	43
8.1.2. Ejecución por Modalidad Sensorial	46
8.1.3. Ejecución por Duración Media	49
8.1.4. Ejecución por combinación de factores	52
8.2. Ejecución del modelo	54
8.2.1. Ajuste con el modelo de acumulación	54
8.2.2. Ajuste con el modelo de detección	56
8.2.3. Ajuste con el modelo mixto	59
9. Conclusión	61
Referencias	63
Lista de figuras	68
Lista de tablas	70

1. INTRODUCCIÓN

Nuestra vida y sobrevivencia dependen de la capacidad de percibir el mundo que nos rodea y de ajustar nuestra conducta a los cambios y retos que el ambiente nos presenta. Normalmente, los organismos nos adaptamos a ambientes muy complejos. Esta complejidad deriva, en parte, de las formas en que se estructura la información en nuestro entorno y de los cambios que ocurren a lo largo del tiempo. Para adaptarnos al medio, estamos provistos de sistemas altamente especializados: cognitivos, fisiológicos, conductuales, etc., que se han ido conservando durante la evolución de las especies y durante la historia de los individuos (Chater & Brown, 1999). Gracias a ellos, obtenemos información del ambiente que nos rodea y generamos las respuestas y conductas más óptimas.

Para extraer información del ambiente, disponemos de sistemas de alta especialización para captar y medir información expresada en distintos tipos o formas de energía. A esto típicamente lo llamamos audición, tacto, vista, etc. Sin embargo, existe una dimensión, mucho más abstracta, que repercute en nuestra percepción de los eventos, independientemente de la modalidad sensorial en que se presenten: el tiempo. Aunque carecemos de sistemas específicos para *sentir* el tiempo (por lo menos en el sentido fisiológico dado al término *sensación*), no existe percepción del mundo sin parámetros temporales, es decir, que no tenga duración, que no ocurra antes o después de otras percepciones o que no se organice en estructuras basadas en la seriación, simultaneidad o repetición (Block, 1990; Block, 2003; Arstila & Lloyd, 2014). Por lo poco que sabemos sobre el tiempo subjetivo, éste debe ser una construcción derivada de la forma en que ocurren los eventos del mundo, de los sistemas disponibles para la percepción, memoria, etc. (Díaz, 2011; Arstila & Lloyd, 2014) y de la misma temporalidad con la que estos sistemas operan (Helfrich, 2003).

A pesar de la cantidad de esfuerzo que se ha invertido en desenmarañar este problema, aún no entendemos del todo la forma en que creamos representaciones temporales útiles, ya sea en contextos naturales o controlados (Allman, Teki, Griffiths, & Meck, 2013). Para ser más específicos, en este trabajo nos interesamos en entender cómo percibimos estructuras complejas de información temporal, compuestas por secuencias de duraciones en la escala de milisegundos

y segundos y cuya magnitud puede variar a lo largo del tiempo, modificando con ello nuestra capacidad de anticiparnos a su ocurrencia.

Un ejemplo simple ocurre cuando hacemos una cuenta regresiva para iniciar una competencia de velocidad (“tres, dos, uno... ¡ya!”). La idea general es que todos los competidores salgan al mismo tiempo, y para ello, cada corredor debe preparar una postura que le permita generar el mayor impulso y velocidad frente a la señal de salida. Dependiendo de la precisión del instrumento que se use para hacer el conteo, los corredores podrían decidir cómo distribuir en el tiempo el conjunto de movimientos necesarios para lograr la postura de salida. Si el instrumento en cuestión cuenta a intervalos regulares los movimientos podrían organizarse siguiendo también un ritmo regular, si el instrumento es variable o relativamente arbitrario, la preparación motora tendría que hacerse de forma casi independiente al conteo de tiempo y el sujeto debería mantenerse alerta en espera de la señal de salida. El aspecto fundamental de este ejemplo es que los corredores desconocen la forma en que opera el instrumento de conteo, por lo tanto, deben reconocer su funcionamiento y adaptar su conducta mientras está ocurriendo la cuenta regresiva. La comprensión del habla refleja otro contexto en el que, además de muchas otras claves como el tono, gestos, etc., la percepción de duración de intervalos organizados secuencialmente y su integración como una estructura de información temporal contribuyen a la comprensión del significado de un mensaje.

Organizamos el presente estudio para responder en qué medida los mecanismos dedicados a la medición de intervalos únicos permiten también el procesamiento de estructuras temporales más complejas como los ritmos. Particularmente, nos enfocamos en analizar si existen diferencias en el procesamiento de este tipo de estímulos en función del sistema sensorial utilizado para percibirlos, y si la sensibilidad para detectar diferencias de duración en los intervalos que los componen cambia con la magnitud de dicha duración. Bajo un punto de vista más detallado, queremos indagar sobre el tipo de reglas de operación que permitirían al observador identificar, en un determinado momento, la estructura temporal de los estímulos mientras éstos se están presentando. Al diseñar una tarea que presenta estímulos con estas características esperamos poder revelar aspectos importantes sobre la forma en que tomamos decisiones perceptuales sobre estructuras temporales que pueden cambiar en el tiempo.

2. ANTECEDENTES

Una de las mejores maneras de estudiar la forma en que los seres vivos se ajustan y adaptan a sus ambientes es a partir de las conductas de búsqueda y obtención de aquellos recursos que necesitan para sobrevivir, por ejemplo, el alimento (Call, 2000). Cuando los recursos son limitados o no están disponibles de forma inmediata en el tiempo y el espacio, los organismos utilizan estrategias pulidas por la evolución durante millones de años para tratar de optimizar su obtención. Estas estrategias dependen, entre otras cosas, del desarrollo de sistemas capaces de detectar y responder de manera, casi siempre, exacta y precisa a las marcas temporales y espaciales del entorno. Aquí, nos interesan particularmente el tipo de sistemas que permiten responder óptimamente a los marcadores temporales del ambiente. Dependiendo de la especie y del medio que enfrenta, los problemas y estrategias para resolverlos serían distintos, pero en general, éstas últimas tendrían como consecuencia común el mejorar las oportunidades de sobrevivencia de los individuos.

2.1. SISTEMAS ACOPLADOS AL TIEMPO Y ESPACIO

La naturaleza de estos sistemas, capaces de percibir y responder a las dimensiones temporal y espacial, es actualmente y desde hace ya varias décadas, tema de interesantes discusiones y líneas de investigación. Debido a que ambas dimensiones se ven implicadas, directa o indirectamente, en una diversa y amplia gama de fenómenos y funciones de la vida diaria de los seres vivos (Hughes, 1999; Gruart, Delgado, Escobar & Aguilar, 2002; Cassenti, 2011; Buhusi & Meck, 2005; Allman et al, 2013), ha resultado útil organizar su estudio en categorías que distinguen, por ejemplo, la escala de magnitud en la que ocurren o los mecanismos detrás de su implementación. Algunos estudios en cognición espacial en primates, por ejemplo, identifican tres tipos de representaciones espaciales (Call, 2000) dadas por las relaciones funcionales que se establecen entre los objetos del mundo:

- 1) Las representaciones estáticas incluyen información sobre la identidad y ubicación de los objetos dentro de un medio invariable.

- 2) Las representaciones dinámicas incluyen información sobre los cambios de los objetos en el espacio. Por lo tanto, esta categoría agrega información sobre la dimensión temporal.
- 3) Las representaciones relacionales incluyen información sobre la forma en que interactúan los objetos entre sí.

Por otro lado, la dimensión temporal suele separarse en tres o cuatro categorías principales de acuerdo al orden de magnitud de tiempo (Merchant & de Lafuente, 2014):

- 1) La escala de microsegundos es utilizada, por ejemplo, por delfines y murciélagos para realizar ecolocalización. El sistema auditivo utiliza intervalos de tiempo en esta escala para calcular la ubicación de una fuente sonora sobre el plano horizontal en relación a la posición de la cabeza y orejas.
- 2) La escala de milisegundos está implicada en diversas funciones de percepción y movimiento, específicamente, en actividades que requieren coordinación fina de gran rapidez y alta precisión. En esta escala ocurren la intercepción de objetos, la percepción y producción del habla y la música, entre otras.
- 3) La escala de los segundos, minutos y horas, igual que la categoría anterior, se relaciona con la percepción y producción de intervalos. Sin embargo, por su duración, las funciones de este grupo están más influenciadas por mecanismos de control consciente. En esta escala ocurren diferentes tipos de aprendizaje asociativo, las conductas de forrajeo y la ejecución de largas secuencias de movimientos.
- 4) La escala circadiana incluye las funciones que se organizan de acuerdo a la oscilación del día y la noche, con duración aproximada de 24 horas; por ejemplo, el sueño y la vigilia, la alimentación y la regulación metabólica, etc.

Otras propuestas pueden considerar solo las últimas tres escalas (Buhusi & Meck, 2005), agrupar la segunda y tercera dentro de una categoría conocida simplemente como *timing intervarlar* o incluir categorías con funciones operando a intervalos mucho mayores, como las estacionales. Los límites entre escalas no están estrictamente definidos. Al comparar la ejecución entre funciones de diferentes escalas de tiempo, la evidencia sugiere que la distinción por orden de magnitud corresponde también a una distinción por tipo de estrategias, sistemas o mecanismos

necesarios para llevarlas a cabo (Ivry, 1996; Rammsayer, 2003; Buhusi & Meck, 2005; Allman et al, 2013; Merchant & de Lafuente, 2014).

El procesamiento de información temporal y espacial no es del todo independiente (Cassenti, 2011). La separación teórica responde a la abstracción del estudio sesgado de individuos enfrentándose a un ambiente lleno de marcas que distinguen un objeto de otro, el antes y el después, lo lejano y lo cercano, etc. Resulta más apropiado pensar en estos sistemas de procesamiento de información y en las particularidades de sus mecanismos como producto de la interacción de los organismos con su ambiente y de la evolución.

El éxito de cada individuo depende en gran medida de su capacidad heredada y aprendida para detectar y responder a las marcas temporales, espaciales, numéricas y estadísticas, del ambiente en el que se encuentran (Chater & Brown, 1999; Dehaene & Branon, 2010). Estas capacidades, a su vez, dependen del acople entre los mecanismos de operación de los sistemas de procesamiento de información y las diversas propiedades del ambiente que enfrenta, a razón de optimizar la relación entre los recursos invertidos y los obtenidos.

Entre los ejemplos más claros y estudiados de sistemas biológicos acoplados a las propiedades del medio se encuentran los ritmos circadianos. El sueño y vigilia, la actividad metabólica y hormonal, entre otras, se organizan en fase con la oscilación regular de las señales ambientales de luz y oscuridad, marcadas por el día y la noche (Gruart et al, 2002; Hastings, Maywood & Brancaccio, 2018). El principal mecanismo descrito para explicar la oscilación adquirida de los sistemas biológicos a los ciclos de luz y oscuridad del planeta opera en el núcleo supraquiasmático del hipotálamo. Este núcleo recibe información lumínica desde la retina, a través del tracto retinohipotalámico, y la envía hasta la epífisis, quien a su vez regula la producción de melatonina, y con ella, modula los tiempos de vigilia y sueño (Gruart et al, 2002; Hastings et al, 2018). Lo más relevante de este mecanismo, es que las células del núcleo supraquiasmático conservan su operación oscilante en ausencia de las señales lumínicas con las que, en principio, se sincronizan. Esta propiedad, lo hace acreedor al nombre de reloj endógeno y representa un claro ejemplo de un sistema biológico acoplado a las propiedades temporales del entorno.

En el extremo opuesto de las escalas de orden de magnitud, la capacidad de detectar diferencias de tiempo interaural tan pequeñas como los cientos de microsegundos y hasta varios cientos de milisegundos es otro ejemplo de sistemas biológicos acoplados a las propiedades del entorno. Estudiando el sistema auditivo de aves, anfibios y mamíferos se ha identificado que el mecanismo neuronal que subyace a esta función culmina en la oliva superior medial del tallo cerebral, cuyas neuronas actúan como detectoras de coincidencias (Buhusi & Meck, 2005; Purves, Augustine, Fitzpatrick, Hall, Lamantia & White, 2012; Keating & King, 2015; Buhusi, Oprisan, & Buhusi, 2016). Esto significa que responden con especificidad a la aferencia simultánea de la cóclea y el núcleo coclear anteroventral homo y contralateral. La activación por aferencias simultáneas ocurre con base en el tiempo interaural o de diferencia que una onda sonora tarda en llegar a uno y otro oído, dependiendo de la ubicación de la fuente sonora respecto a la posición de la cabeza y orejas. En conjunto, la respuesta específica de las neuronas de la oliva superior medial mapea la ubicación de fuentes sonoras dentro del plano horizontal del espacio sensorial (Buhusi & Meck, 2005; Purves et al, 2012; Vonderschen & Wagner, 2014; Keating & King, 2015).

Para el caso del timing intervalar, que agrupa una gran variedad de funciones y contextos de ocurrencia, la descripción de los mecanismos y sus modos de operación es mucho menos nítida (Allman et al, 2013). Se ha propuesto, por ejemplo, que parte del mecanismo podría recaer, también, en un detector de coincidencias, basado en la anatomía de neuronas con grandes árboles dendríticos (entre 10-30000 aferentes) y de su conexión y actividad dentro de amplias redes neuronales de procesamiento (Buhusi et al, 2016). La amplitud de la arborización dendrítica permitiría a estas neuronas el registro simultáneo de información procedente de diversas aferencias, requiriendo, además, un alto grado de selectividad a la temporalidad de las señales de entrada. Este mecanismo se ha encontrado en neuronas de estructuras como el núcleo estriado en los ganglios basales, la corteza, el hipocampo y el cerebelo; estructuras que a su vez se han vinculado ampliamente con funciones de timing intervalar (Buhusi et al, 2016).

2.2. SECUENCIAS DE INTERVALOS

En contextos naturales los organismos enfrentan problemas asociados a la duración de eventos discretos e irrepetibles, pero también, deben resolver situaciones que demandan la integración de estructuras de temporales más complejas, en las cuales las unidades de duración son sólo la base para abstraer el patrón de ocurrencia de los eventos. Rodeados de un ambiente en constante cambio, la posibilidad de identificar regularidades en la repetición de eventos es crucial para generar respuestas adaptativas (Estes, 1975; como aparece en López, 2012) basadas en la anticipación.

Las ventajas asociadas a identificar estructuras temporales predecibles basadas, por ejemplo, en la repetición regular de eventos, incluyen la reducción del consumo metabólico, automatización de conductas rítmicas como bailar, moverse, hablar o producir música, mejorar la detección y discriminación de estímulos y reducir los tiempos de respuesta (Di Luca & Rhodes, 2016; Rajendran & Teki, 2016)

De nuevo, el ejemplo más popularizado es el de los ciclos circadianos, sin embargo, en las escalas de intervalos cortos, como milisegundos y segundos, los ejemplos más interesantes para nuestra especie se encuentran actividades tan cotidianas como la marcha, el lenguaje, la percepción musical y la sincronización bajo contextos de interacción social (Kotz, Ravignani & Fitch, 2018).

Algunos, incluso, han sugerido una distinción aún más precisa dentro de este rango, entre los modelos de mecanismos que permiten la percepción de duraciones menores a un par de segundos y aquellos dedicados a la percepción de duraciones de más de dos segundos de duración (Ivry, 1996; Pang & McAuley, 2003). El argumento recae en que, por debajo de los dos segundos, las estructuras de información con eventos repetitivos a intervalos regulares podrían ser percibidos y ejecutados de manera menos explícita que aquellas con intervalos más largos, que mostrarían, por ejemplo, mayor dependencia en mecanismos de control cognitivo más explícito como la memoria (Pang & McAuley, 2003).

2.3. MÉTODOS DE ESTUDIO Y PSICOFÍSICA DE LA PERCEPCIÓN DE TIEMPO

Una distinción muy frecuente en diversos campos de estudio relacionados al tiempo apunta a que existen dos aspectos interesantes del mismo constructo: el tiempo objetivo y el tiempo subjetivo. La diferencia entre ellos radica en la forma o instrumento de medición que usamos para dar cuenta de los cambios que ocurren en el ambiente. El tiempo objetivo es una medición basada en mecanismos diseñados y convenidos socialmente para realizar los registros de tiempo usando como referencia la subdivisión de los eventos más regulares que encontramos en el ambiente, por ejemplo, los cambios que producen el día y la noche. En general, este tipo de instrumentos se conocen como relojes, cronómetros, etc. El tiempo subjetivo, en cambio, recae en la medición de eventos usando los complejos y limitados mecanismos que posee nuestro cuerpo, el sistema cognitivo, el cerebro, etc.

La observación fundamental en los estudios sobre percepción de intervalos es que la medición que realiza un reloj y un sujeto de interés como el humano sobre la duración del mismo evento tiende a variar en exactitud, pero sobre todo en precisión. La diferencia empírica entre el tiempo objetivo y el subjetivo, así como la maquinaria cognitiva y nerviosa encargada de producir la percepción de tiempo son el punto de partida dentro de estas líneas de investigación (Allan, 1979; García-Pérez, 2014).

A finales de la década de los setenta del siglo pasado, la tendencia de estudio del tiempo subjetivo se centró en la percepción de intervalos cortos y en la producción de modelos cuantitativos para explicarla (Allan, 1979). Los métodos se diversificaron gracias a la integración de esquemas conceptuales que consideraron las respuestas de los participantes como estimadores directos de la percepción de tiempo. Con el paso del tiempo, se incluyeron herramientas ampliamente utilizadas dentro de la psicología experimental, como la psicofísica, se analizó la generalidad de efectos comunes dentro del campo de sensación y percepción, como la Ley de Weber, y los diseños experimentales fueron incluyendo preguntas sobre el papel de otras variables cognitivas como atención, memoria, etc., con el fin de afinar los requerimientos presentados por las tareas que evaluaban la percepción de tiempo (Allan, 1979). Los programas de reforzamiento basados en el tiempo son una muestra de ello. Los programas clásicos de intervalo fijo o de pico permiten, por ejemplo, estudiar el proceso de aprendizaje de una

regularidad temporal y también, observar la adaptación de la conducta frente a dicha regularidad (López, 2012).

Desde el nacimiento de la psicología experimental y hasta la fecha, la psicofísica se ha mantenido como un pilar tanto teórico como metodológico para el avance de distintas disciplinas dedicadas a entender los procesos de sensación y percepción (Kingdom & Prins, 2010; Wolfe, Kluender, Levi, Bartoshuk, Herz, Lederman, & Merfeld, 2015). Por definición, esta teoría y método se aboca al estudio de la relación cuantitativa entre los eventos físicos y sus correlatos psicológicos, o bien la relación entre la sensación que es producto de la mente y la energía que da lugar a esa sensación. El término fue acuñado por Gustav Theodor Fechner, quien estableció los principios de esta subrama de la psicología y describió diversos procedimientos experimentales diseñados para mapear la relación entre la mente y la materia (Kingdom & Prins, 2010; Wolfe et al, 2015).

Una clasificación reciente de métodos y tareas para estudiar timing intervalar distingue los métodos subjetivos de los métodos semi-objetivos (García-Pérez, 2014). Los métodos subjetivos implican que los observadores o participantes reporten la duración percibida del estímulo de interés que se presenta en cada ensayo. En este grupo de tareas encontramos la estimación verbal de duraciones y las tareas de producción y reproducción de duraciones. Por otro lado, los métodos semi-objetivos requieren que el observador realice juicios categóricos o comparativos a partir de la o las duraciones de interés presentadas en cada ensayo.

De hecho, este último grupo de procedimientos puede subdividirse de acuerdo a las demandas específicas impuestas al observador, por ejemplo, dada la forma en que se presentan los estímulos de interés dentro del mismo ensayo. En las tareas que presentan un estímulo objetivo por ensayo, el procedimiento implica la presentación de éste seguido de la respuesta categórica que refleja la comparación de la muestra presentada con una representación aprendida previamente por el participante (García-Pérez, 2014). Ejemplos de este tipo de tareas son bisección temporal o generalización temporal.

En las tareas que presentan estímulos por pares, cada ensayo presenta dos estímulos, comúnmente uno seguido de otro, y se solicita al participante que dé una respuesta categórica comparando específicamente los dos intervalos mostrados. Las tareas de elección forzada con

dos alternativas (*2AFC*, por sus siglas en inglés), comparación (“Mayor que” o “Menor que”) e igualdad (“Iguales” o “Diferentes”), son ejemplos de este subgrupo (García-Pérez, 2014). Dependiendo de las preguntas de interés, los métodos de comparación pueden incluir tres o más estímulos por ensayo, aunque este tipo de manipulación es menos frecuente en la literatura.

Una acotación importante es que la meta final del uso de métodos subjetivos es obtener, a partir de ellos, la función psicofísica que expresa la relación funcional entre el tiempo objetivo y el subjetivo. Con los métodos semi-objetivos, en cambio, se busca estimar la función psicométrica que relaciona probabilidad de una determinada respuesta con el tiempo objetivo de los estímulos. Aunado a la estimación de la función psicométrica, es posible calcular descriptores clave de la forma en que operan los mecanismos subyacentes a la percepción de intervalos: el punto de bisección, el umbral diferencial y la razón de Weber (García-Pérez, 2014), etc. La información obtenida la función psicométrica implican aquella proporcionada por la función psicofísica (García-Pérez, 2014).

En la literatura es frecuente encontrar el uso del término “discriminación” para hacer referencia a procedimientos como los que más arriba nominamos semi-objetivos. El término suele definirse como la emisión de respuestas diferenciadas a señales que varían en su magnitud (Roberts, 1998; Kopec & Brody, 2010). Las primeras implementaciones de este procedimiento se hicieron con ratas entrenadas a elegir una de dos habitaciones, de acuerdo a un tiempo de espera presentado antes de su elección, con el objetivo de obtener en dicha habitación el reforzador.

Las versiones posteriores implicaban el uso de cámaras operantes en las que se presentaba, al inicio de cada ensayo, un estímulo de corta o larga duración (Kopec & Brody, 2010). La rata tenía que emitir la respuesta presionando alguna de las palancas retráctiles que se presentaban al final del estímulo. La asociación entre la presión sobre una u otra palanca y la duración del estímulo era previamente entrenada hasta alcanzar un criterio de adquisición o aprendizaje cercano al 90%. Después de alcanzar el criterio, se introducían ensayos, siguiendo algún método psicofísico, para medir las respuestas del sujeto frente a duraciones intermedias del estímulo. Tras muchas repeticiones de los ensayos, era posible obtener una buena estimación de la proporción de respuestas generadas en cada palanca dada cada una de las magnitudes de duración evaluadas (Roberts, 1998; Kopec & Brody, 2010). Los reportes suelen mostrar la

proporción de respuestas sobre la palanca asociada a la categoría “Largo” en función de cada duración presentada en el estímulo, esto es, la curva psicométrica (Kopeck & Brody, 2010; García-Pérez, 2014).

2.4. LA FUNCIÓN PSICOMÉTRICA

La ejecución en este tipo de tareas es función de la intensidad o magnitud de los estímulos evaluados. La forma de la función psicométrica es muy similar frente a diversos tipos de estímulos y variaciones en las demandas presentadas por la tarea y suele estar bien descrita por una función sigmoidea (Kingdom & Prins, 2010). La función psicométrica relaciona la conducta registrada bajo los estándares de algún método psicofísico, por ejemplo, la proporción de respuestas correctas o la proporción de ensayos categorizados como alguna de las dos opciones de respuesta, con la magnitud de alguna propiedad del estímulo que nos resulte de interés.

En términos de la tarea de discriminación descrita en la sección anterior, la forma de la función típicamente muestra que el sujeto elige la palanca asociada a la categoría “Corto” frente a los estímulos con duraciones más cortas y la tendencia de elección cambia rápidamente sobre las magnitudes de duración intermedias, hasta que se mantiene eligiendo la palanca asociada a la categoría “Largo” frente a los estímulos con duraciones más largas (Roberts, 1998). Esta tendencia nos permite visualizar, con algunas consideraciones adicionales, la operación de los sistemas y mecanismos que permiten hacer una discriminación simple del tipo “duración corta” y “duración larga”.

El objetivo común del registro conductual y de la construcción de la curva psicométrica es medir algunas de las propiedades que caracterizan la operación del mecanismo sensorial usado para resolver la tarea. Estos parámetros también resultan muy útiles para resumir la conducta y establecer comparaciones entre condiciones experimentales, pero su obtención requiere el ajuste de una función continua a los datos, por ejemplo, la función logística (aunque existen otras funciones usadas para hacer ajustes psicométricos; Kingdom & Prins, 2010). Por ejemplo, la letra α se utiliza para representar el umbral de discriminación (también llamado punto de igualdad subjetiva) que corresponde a la intensidad del estímulo que produce en el observador indiferencia en términos de sus respuestas. Para la función logística, este punto corresponde a la

magnitud del estímulo que se ubica a la mitad entre el valor mínimo y máximo de la función. Esto quiere decir que α corresponde a la intensidad del estímulo con la cual es igualmente probable que el observador categorice el estímulo con cualquiera de las dos opciones de respuesta y se establece como el umbral o criterio a partir del cual el sistema cambia de un tipo de respuesta a otro. En términos del mecanismo sensorial, representa la duración frente a la cual éste produce idénticas respuestas al comparar la duración del estímulo actual con las de aprendió al inicio de la tarea (Kopeck & Brody, 2010). El valor del parámetro β corresponde a la pendiente o gradiente de cambio de la función (Roberts, 1998; Kingdom & Prins, 2010).

Además de α y β que representan propiedades particulares del mecanismo sensorial, γ y λ representan la ejecución esperada por azar. Particularmente, γ (*guess rate* en inglés), se traduce como tasa de adivinación, aunque se refiere a la tasa de falsas alarmas, es decir, la proporción de veces que se elige la opción de respuestas “Largo” por encima de la opción “Corto” frente al estímulo que, de hecho, tenía la duración más corta en la tarea. El parámetro λ (*lapse rate* en inglés) representa la proporción de ensayos que el observador responde con independencia de la magnitud del estímulo, lo que se traduce en la elección de respuestas “Corto” por encima de la opción “Largo” aunque la duración del estímulo era, de hecho, la más larga presentada en la tarea. Así, el valor de este parámetro se asocia a las omisiones, ya que, por distracción o falta de motivación, el observador omite la presencia de la propiedad evaluada en el estímulo.

2.5. EFECTOS DE MODALIDAD SENSORIAL

La percepción de duraciones cortas, dentro de las escalas de magnitud del timing intervalar, parece depender aún más de las propiedades fisiológicas y de procesamiento propias de los sistemas sensoriales que captan el estímulo y de los primeros relevos a nivel de sistema nervioso central (Ivry, 1996; Merchant & de Lafuente, 2014; Rammsayer, Bortner & Troche, 2015), que la de duraciones mayores.

En las primeras décadas del estudio contemporáneo de la estimación y percepción de intervalos, el modelo basado en la metáfora del reloj interno dominó gran parte de las explicaciones discutidas en el campo e influyó también en el planteamiento de preguntas y los métodos usados para responderlas (Allan, 1998). Por ejemplo, se dedicó un gran esfuerzo a

identificar los factores que afectaban el componente de reloj y distinguirlos de aquellos que afectaban el componente de memoria o decisión. Entre estos factores se encontraban propiedades del estímulo como la modalidad sensorial en que se presentaban, si la estimulación se presentaba constante durante todo el intervalo o sólo marcaba el inicio y fin, etc. (Grondin, Meilleur-Wells, Ouellette & Macar, 1998; Wearden, Todd, & Jones, 2006; Merchant, Zarco & Prado, 2008). En términos de la modalidad sensorial, se ha identificado, bajo distintas manipulaciones (Ortega, Guzmán-Martínez, Grabowecky & Suzuki, 2014), que la ejecución en tareas de percepción de intervalos presenta diferencias importantes dada la modalidad sensorial en la que se presenten los estímulos, siendo los más probados, el sistema auditivo y visual (Allman, 2013; Merchant & Lafuente, 2014). Este efecto apunta, consistentemente, que realizamos mejores discriminaciones temporales frente a estímulos auditivos que frente estímulos visuales (Grondin et al, 1998; Rammsayer et al, 2015; Ortega et al, 2014).

2.6. EFECTOS DE MAGNITUD DE LA DURACIÓN A EVALUAR

En psicofísica, un hallazgo fundamental para describir la forma en que sentimos el mundo es el de la ley de Weber, que señala la existencia de una razón constante entre la magnitud de la diferencia entre dos estímulos de comparación y el cambio perceptual que produce. Esto fue formalizado por Fechner como la Ley de Weber y expresa que el tamaño de una diferencia detectable es una proporción constante de la magnitud del estímulo (Wolfe et al, 2015). La propiedad escalar descrita ampliamente en el campo de timing intervalar es una forma de la Ley de Weber (Gibbon, 1977; Gibbon, 1991; Allan, 1998; Allman et al, 2013).

En ese sentido, la propiedad escalar describe aumentos en la variabilidad de las mediciones de intervalos realizadas por el observador en proporción al aumento en la duración del intervalo en función del aumento en la magnitud del estímulo. Dependiendo de la tarea, esta observación puede tomar distintas formas.

Uno de los primeros ejemplos de observación de la propiedad escalar proviene de los estudios de reforzamiento en programas de intervalo fijo. El patrón de respuestas característico de estos programas es de incremento gradual en la tasa de respuestas a través del tiempo y a medida que se aproxima el intervalo fijo entrenado, hasta alcanzar el punto máximo en el

momento previo de la obtención de comida (Gibbon, 1991). En este tipo de procedimientos, la propiedad escalar se observa como el cambio en algún marcador de la tasa de respuestas, por ejemplo, el momento de transición de una tasa baja a una tasa alta, en proporción a la duración del intervalo fijo entrenado. La varianza del punto de transición en la tasa de respuestas, calculada tras la repetición de varios ensayos, también muestra un incremento en proporción a la duración del intervalo pico. Así, la relación entre la media y la desviación estándar del tiempo de transición en la respuesta tiende a permanecer constante (López, 2012).

Un enfoque más global, consiste en observar la forma que caracteriza a la tasa de respuestas a lo largo del tiempo y compararlo con la que se produce bajo un intervalo fijo de distinta duración. Si al escalar los ejes de tiempo y tasa de respuesta las formas se mantienen idénticas, se cumple la propiedad escalar, ya que la forma que caracteriza las respuestas del observador se mantiene de manera independiente al valor asignado al programa (Gibbon, 1991; Allan, 1998).

Este hallazgo ha tenido un impacto tal dentro del campo, que se ha tomado como un elemento imprescindible en la generación de cualquier tentativa de modelo o explicación de los mecanismos del timing intervalar (Allan, 1998; Allman et al, 2013). Debido a la gran variedad de contextos, rangos de duración, manipulaciones y tipos de tarea en los cuáles se ha encontrado la propiedad escalar, la literatura tiende a referirse a este factor como un descriptor general de los mecanismos dedicados a la percepción de intervalos. Sin embargo, aún se mantiene el debate sobre la fuente de esta regularidad empírica (Chater & Brown, 1999), incluyendo aquellos contextos que la incumplen (Wearden, 1991; Grondin, 2012).

3. JUSTIFICACIÓN

Para los seres vivos tiene gran importancia el poder captar y procesar información del medio dinámico en el que viven, reconocer en ella las estructuras temporales que definen relaciones entre los objetos y eventos, y eventualmente, usar esa información para ajustar su conducta y tomar ventaja de las condiciones que enfrentan. En el caso de los humanos, los eventos con dinámicas temporales ocurriendo en la escala de los milisegundos son de gran importancia para muchas funciones y actividades de la vida cotidiana, por ejemplo, la comprensión y producción del lenguaje o la coordinación de secuencias perceptuales y motoras a alta velocidad y gran precisión, como la intercepción de objetos (Merchant & de Lafuente, 2014). Sin embargo, y a pesar de la cantidad de estudios que hasta ahora han contribuido a entender nuestra capacidad de percibir y producir intervalos de tiempo, seguimos sin tener un panorama explicativo completo de estos fenómenos. En particular, con este trabajo pretendemos entender la forma en que los mecanismos subyacentes al *timing* intervalar permiten procesar estructuras de información temporal más complejas como los ritmos, que son secuencias de eventos repetitivos a intervalos cuyas duraciones guardan diferentes tipos de relaciones entre sí.

La propiedad de regularidad o irregularidad de un estímulo rítmico se expresa en la estructura temporal de la información que presenta de forma secuencial. Aunque es posible suponer que para distinguir estructuras temporales utilizamos los mecanismos de percepción y producción de intervalos únicos, los cuales se han investigado ampliamente en el campo del *timing* intervalar, resulta importante determinar hasta qué punto la dinámica aleatoria del estímulo y la incertidumbre asociada a ella afectarían la capacidad de procesar estas estructuras de información. Para ello, diseñamos y aplicamos una tarea de percepción de irregularidad, usando el método psicofísico de estímulos constantes y otras técnicas de medición psicofísica, que nos permitieran evaluar la ejecución de participantes humanos discriminando estímulos Regulares e Irregulares, además de observar el desempeño bajo condiciones de estimulación que se encuentran aún en discusión en el campo.

Por ejemplo, la literatura sobre percepción de intervalos únicos ha reportado consistentemente diferencias de sensibilidad entre los sistemas auditivo y visual (Grondin et al,

1998; Wearden et al, 2006), siendo en general, el auditivo más sensible que el sistema visual para medir duraciones. Sin embargo, otros sistemas de alta resolución temporal como el táctil han sido relegados de los estudios comparativos de modalidad sensorial. Por ello, incluimos como factor de interés, además del Porcentaje de Irregularidad, la Modalidad Sensorial en la que se presentaron los eventos repetitivos y perceptibles de los estímulos, es decir los pulsos, de manera que pudiéramos comparar la ejecución frente a estímulos Auditivos, Táctiles y Visuales.

Por otro lado, la propiedad escalar, expresada como un cambio en la sensibilidad de discriminación proporcional a la magnitud de la propiedad de interés del estímulo, en este caso la duración, ha sido uno de los principales descriptores de la ejecución en la literatura de *timing* intervalar (Gibbon, 1977; Gibbon, 1991; Allan, 1998; Allman et al, 2013). Sin embargo, desconocemos si dicha propiedad afectaría también la ejecución al evaluar estructuras de información temporal aleatorias como las de los estímulos en nuestra tarea. Para analizar esto, incluimos como tercer factor de interés la Duración Media de los intervalos de repetición de pulsos en los estímulos; de manera que pudiéramos contrastar la ejecución frente a estímulos con intervalos de 300 ms, 600 ms y 1200 ms, o bien rápidos, medianos y lentos, por su velocidad de repetición.

Hasta este punto las preguntas se centran en el efecto de los factores manipulados en el estudio (i.e. Porcentaje de Irregularidad, Modalidad Sensorial y Duración Media de intervalos) sobre los descriptores generales de ejecución. Sin embargo, el segundo componente tomado en cuenta para el diseño de la tarea implica un nivel de análisis más detallado. El interés de éste se centra en evaluar la relación entre la dinámica temporal del estímulo en cada ensayo particular y la decisión perceptual emitida por el observador (incluyendo la respuesta y el tiempo en que ésta ocurre).

Debido a que los estímulos de la tarea se caracterizan por presentar información temporal de manera secuencial y siguiendo una regla relativamente aleatoria, el observador debe buscar, durante la presentación del estímulo, la información que le permita identificarlo correctamente como Regular o Irregular, tan rápido como le sea posible. El punto clave del problema es que el participante debe escoger la respuesta y el momento óptimo para emitirla a pesar de la incertidumbre que tiene sobre la estructura temporal del estímulo que está observando.

Sabemos poco sobre la forma en que tomamos decisiones perceptuales a partir de estímulos con dinámicas temporales relativamente aleatorias (Hawkins, Frostmann, Wagenmakers, Ratcliff & Brown, 2015). En la literatura sobre el tema se discute de manera general dos tipos de estrategias con enfoques opuestos que aquí referimos como hipótesis de detección e hipótesis de acumulación. La hipótesis de detección supone que el observador se mantiene observando el estímulo en espera de una unidad de información que claramente sobrepase el umbral de percepción para entonces emitir su respuesta. La alternativa, la hipótesis de acumulación, supone que desde el inicio el observador registra cada unidad de información, aun cuando su magnitud se encuentre por debajo del umbral de percepción, y las suma o integra hasta que en conjunto alcanzan el umbral y permiten tomar una decisión.

Con la tarea de percepción de irregularidad pretendemos distinguir la forma en que resolvemos este tipo de problemas, evaluando al mismo tiempo los efectos que tienen la variación sistemática del Porcentaje de Irregularidad, la Modalidad Sensorial y la Duración Media de los intervalos en los estímulos.

4. HIPÓTESIS

Suponemos que los mecanismos abocados a la percepción de intervalos únicos sirven también para identificar la regularidad o irregularidad de una estructura de información temporal más compleja como la de los estímulos de nuestra tarea. De manera general, esperamos que la ejecución en la tarea de percepción de irregularidad exprese las propiedades o características ya reportadas en la literatura de timing intervalar.

Particularmente, esperamos que la ejecución refleje un mecanismo sensible a la estructura temporal de los estímulos. Esperamos incrementos monotónicos en la identificación de los estímulos (“Irregular”) a medida que incremente la magnitud de irregularidad, y que el patrón de ejecución sea adecuadamente descrito por una función sigmoide.

En relación a la Modalidad Sensorial de los estímulos, suponemos que se conservará las diferencias de sensibilidad reportadas en la literatura de timing intervalar, por lo que el sistema auditivo sería más sensible para identificar la regularidad o irregularidad de los estímulos, que el sistema visual (Grondin et al, 1998; Wearden et al, 2006). En cuanto a los estímulos presentados en la modalidad Táctil, suponemos que la sensibilidad de este sistema sería mejor que la del sistema visual, aunque, menor que la del sistema auditivo. Además, esperamos que la ejecución conserve la propiedad escalar (Gibbon, 1977; Gibbon, 1991; Allan, 1998; Allman et al, 2013), por lo que la sensibilidad sería proporcional a la Duración Media de los intervalos que componen los estímulos.

Esperamos que el tiempo de respuesta disminuya frente a los estímulos más fáciles de evaluar, particularmente, aquellos con mayor irregularidad, ya sea por la magnitud de las diferencias de duración entre los intervalos o por su alta frecuencia a lo largo del estímulo. En contraste, los tiempos de respuesta serían mayores frente a los estímulos más difíciles de discriminar, específicamente, aquellos cuya magnitud de irregularidad sea tan pequeña que no sea fácilmente detectable o que se presente con menor frecuencia a lo largo del estímulo.

5. OBJETIVOS

5.1. OBJETIVO GENERAL

Pretendemos evaluar la sensibilidad de participantes humanos para distinguir entre estímulos con estructuras temporales Regulares o Irregulares, así como los efectos que tienen la Modalidad Sensorial y Duración Media de los intervalos sobre esta capacidad. Esperamos también identificar las reglas de operación que podrían llevar, a un observador frente estos estímulos, a emitir una cierta respuesta en un determinado momento.

5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar una tarea que, a partir del método psicofísico de estímulos constantes, nos permita evaluar la sensibilidad y tiempos de respuesta asociados a la discriminación de estructuras de información temporal.

Determinar el efecto que tienen la Modalidad Sensorial de los pulsos o la Duración Media de los intervalos usados en los estímulos sobre la ejecución en la tarea. En particular, nos interesa saber si sobre este tipo de estímulos la modalidad Auditiva muestra mayor sensibilidad que la Visual, en qué nivel de sensibilidad se encuentra, comparativamente, la modalidad Táctil y si la sensibilidad de discriminación conserva la propiedad escalar, ampliamente reportada en la literatura de intervalos únicos.

Finalmente, esperamos determinar el tipo de relación que existe entre la información temporal presentada en los estímulos y la decisión perceptual tomada por el participante, la cual incluye tanto la respuesta como el tiempo de respuesta. Esto con el objetivo final de revelar las posibles reglas de operación que caracterizan a la ejecución de la tarea.

6. MÉTODO

6.1. PARTICIPANTES

Los datos recabados para este estudio se obtuvieron gracias a la participación de 15 estudiantes (6 mujeres) del Instituto de Neurobiología de la UNAM, cuyas edades se encuentran entre 22 y 32 años ($M = 26$; $D.E. = 3.4$). Cada participante leyó un formato impreso que describía el objetivo de la investigación, la tarea a realizar, los horarios y tiempos requeridos para completar su participación, su derecho a la confidencialidad y a retirarse del estudio en el momento que así lo deseara, sin amonestación alguna, además de los potenciales riesgos y beneficios derivados de su participación. Después de aclarar sus dudas, los participantes firmaron un consentimiento declarando entender las condiciones previamente descritas y aceptando formar parte del estudio. Como criterio de exclusión se consideró el reporte de algún padecimiento o enfermedad neurológica o psiquiátrica que pudiera afectar la ejecución de la tarea. Ninguno de los participantes tenía experiencia resolviendo la tarea antes de iniciar el estudio.

Cada participante se presentó 5 o 6 días al laboratorio y cada día completó 3 sesiones con una duración de entre 15 y 20 minutos. Las sesiones se agendaron para conservar un tiempo de separación entre sí de por lo menos una hora. Los participantes obtuvieron una remuneración económica (50 MXN) o en especie (golosinas) al final de cada día que asistieron al laboratorio.

El trato a los participantes y el manejo de la información obtenida de ellos, así como el resto de los procedimientos seguidos durante el estudio, fueron aprobados por el Comité de Bioética del Instituto de Neurobiología de la UNAM.

6.2. PROGRAMAS Y EQUIPO

La tarea de percepción de irregularidad y el procesamiento de datos se programaron con MATLAB (R2015a). El paquete de funciones Psychtoolbox-3 (versión 3.0.13) se utilizó para optimizar la velocidad de presentación de estímulos y el registro de las respuestas durante la

tarea. Además, se usaron las rutinas del paquete Palamedes (versión 1.8.2; Prins & Kingdom, 2018) para el análisis psicofísico de los datos.

El protocolo se implementó en una habitación aislada dentro del laboratorio con el objetivo de reducir los estímulos distractores. Las condiciones de ventilación, temperatura e iluminación se mantuvieron en niveles estándar, intentando mantener cómodos a los participantes durante la aplicación.

Diseñamos la tarea como una aplicación para observar y responder por computadora, utilizando un procesador Dell Precision Tower 5810 con Windows 10 Pro de 64 bits y tarjeta de video NVIDIA Quadro K420 con 1 GB de memoria para ejecutarla. Debido a que los estímulos relevantes para la tarea se presentaron en las modalidades sensoriales Auditiva, Táctil y Visual, los puertos de salida de la computadora se configuraron para emitir estas señales a través de audífonos, un estimulador táctil y un monitor, respectivamente.

6.3. LA TAREA DE PERCEPCIÓN DE IRREGULARIDAD

Al realizar la tarea, el objetivo principal del participante consistió en observar un estímulo y decidir tan pronto como pudieran, si los pulsos que contenía ocurrían de forma regular o irregular en el tiempo. En cada ensayo se presentó un estímulo y se registró la respuesta dada por el participante, además del tiempo en que ésta ocurrió.

Los estímulos fueron secuencias de pulsos (eventos discretos por su corta duración; Figura 1a), que podían presentarse en la modalidad Auditiva, Táctil o Visual (Figura 1b), y que fueron separados entre sí por intervalos (Figura 1a) de igual o variable duración a lo largo del mismo estímulo.

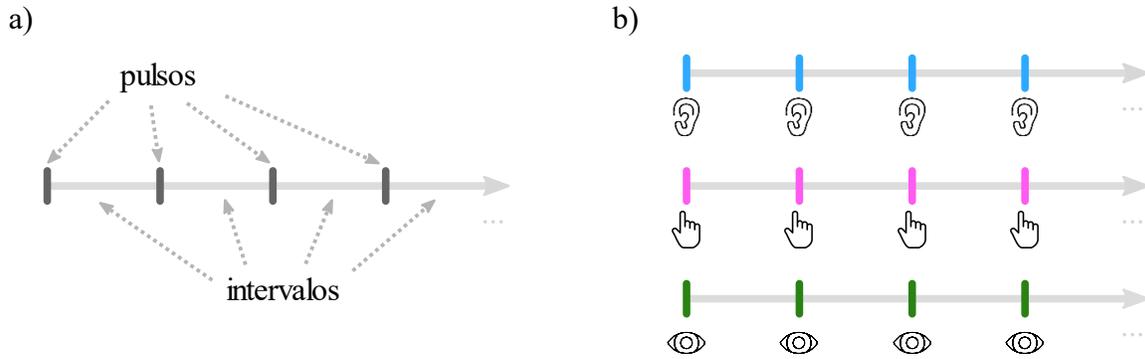


Figura 1. Descripción de los estímulos en la tarea de percepción de irregularidad. a) Sobre una línea de tiempo (flecha horizontal en gris claro) se muestra una secuencia de pulsos (gris oscuro) separados por intervalos. b) Los pulsos son eventos perceptibles que, dependiendo del tipo de ensayo, podían presentarse en la modalidad Auditiva, Táctil o Visual. El código de color (azul, rosa y verde) asociado a cada Modalidad Sensorial (Auditiva, Táctil y Visual, respectivamente) se conserva en las siguientes figuras.

Cuando la repetición de pulsos en un estímulo ocurría a intervalos con la misma duración, el estímulo tenía una estructura temporal Regular (Figura 2a). En cambio, denominamos estímulos Irregulares a aquellos cuyos pulsos fueron programados a intervalos variables (Figura 2b).

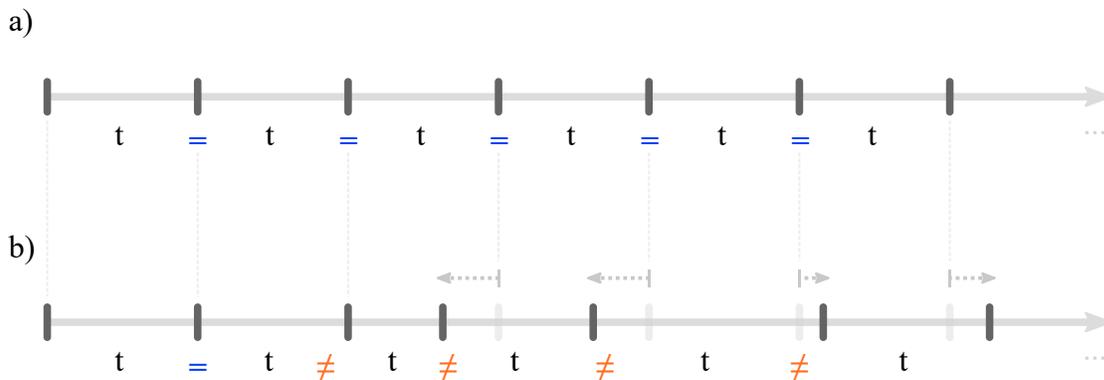


Figura 2. Diferencia entre los estímulos Regulares e Irregulares. a) En los ensayos Regulares, la duración de los intervalos (t_i) dentro del estímulo fue siempre la misma. b) En los ensayos Irregulares, la duración de los intervalos varía aleatoriamente, por ejemplo: $t_2 = t_1$, pero $t_3 \neq t_2$ y $t_3 \neq t_1$, y aunque $t_4 = t_2$ y $t_4 = t_1$, $t_4 \neq t_3$, etc. Como se observa al comparar ambos estímulos, los tiempos en que ocurrieron pulsos en el ensayo Irregular (pulsos en gris oscuro), cambiaron en algunos casos respecto a los tiempos en que hubieran ocurrido en el ensayo Regular (líneas

punteadas verticales, pulsos en gris claro; la dirección de las diferencias se señala con flechas horizontales punteadas).

Aunque la estimulación sensorial se produjo durante los pulsos, los cuales marcaron el inicio y final de los intervalos, éstos últimos se programaron sin estimulación sensorial. A pesar de ello, la duración de los intervalos fue las más importantes para realizar la tarea, pues definía la estructura temporal del estímulo y servirían al participante para decidir si el estímulo era Regular o Irregular. En contraste, la duración de los pulsos fue irrelevante para la emisión de la respuesta, pues tuvieron una duración fija de 50 ms a lo largo de todo el estímulo y para todas las condiciones de la tarea.

6.3.1. PULSOS

Los pulsos auditivos (*A) se presentaron a través de audífonos con forma de diadema y cubierta para el pabellón auricular (Figura 3a). A través de ambos canales de audio se reprodujeron dos señales auditivas: la primera consistió en los estímulos, como secuencias de pulsos programadas desde la computadora (CPU; Figura 3), la segunda, en una pista de audio con un ruido browniano (mayor potencia en frecuencias bajas), que se reprodujo de forma constante durante los intervalos y el resto de la sesión. Generamos los pulsos auditivos (Figura 3d) con una onda sinusoidal de 500 Hz y duración de 50 ms.

Los pulsos táctiles (*T) se presentaron a través de un estimulador elaborado a partir de los componentes de una bocina de audio (” x ”, Ω de impedancia y potencia máxima de 0 W; el dispositivo se diseñó en el Laboratorio de Sistemas Sensoriales y Planeación Motora por el Técnico Académico M. en C. Edgar Bolaños Aquino edgar@lafuentelab.org). Este sistema se adaptó al interior de una estructura que se dibujó e imprimió (LUZBOT Mini 3D Printer) para que la vibración incidiera sobre la yema del dedo índice derecho de los participantes, y para servir al mismo tiempo de soporte para la mano (Figura 3b). El estimulador táctil operó a través de un sistema que amplificaba y reproducía una señal de audio programada desde la computadora (CPU; Figura 3). Esta señal no fue escuchada por los participantes, debido a los audífonos y al ruido browniano, y solo fue detectada a través de la yema del dedo, que se

mantuvo sobre el estimulador durante toda la sesión. Usamos una onda sinusoidal de 1000 Hz para producir los pulsos táctiles (Figura 3f) de 50 ms.

Finalmente, los pulsos visuales (*V) se presentaron a través de un monitor (Dell SE2713H, pantalla Full HD 1920 x 1080 pixeles, 60 Hz, AMD FreeSync, Figura 3c) que recibió una señal programada en unidades de cuadro por segundo ($\text{cps} = 1/60 = 16.7 \text{ ms}$, la duración de cada cuadro) desde la computadora (CPU; Figura 3). Los pulsos visuales (Figura 3h) se mostraron como un círculo (300 x 300 pixeles) ubicado al centro de la pantalla frente a un fondo de color gris ($\text{RGB} = [0.5, 0.5, 0.5]$, en escala de 0 a 1). Dibujamos el círculo sin bordes y lo rellenamos con pequeños recuadrados (1 x 1 pixeles) coloreados aleatoriamente (probabilidad 0.5) de blanco o negro. El color de los recuadrados se actualizó en cada cps del pulso ($0 \text{ ms} \approx \text{cps por pulso}$). Al centro del círculo se colocó un pequeño punto sobre el cual el participante debía mantener la vista durante todo el estímulo, incluyendo los intervalos del estímulo. Con este diseño pretendimos evitar efectos post-imagen debidos al pulso visual.

... “ PUNTOS” DE FIJACIÓN SENSORIAL E INTERVALOS

Dimos a los participantes la instrucción de mantener simultáneamente tres “puntos” de fijación durante la sesión. Debido a que durante los intervalos no se presentaba una estimulación como la que caracterizó a los pulsos, la entrada sensorial en esos momentos correspondió a los tres puntos de fijación, adaptados cada uno a las modalidades sensoriales Auditiva, Táctil y Visual.

El punto de fijación auditivo se presentó como ruido browniano que se reprodujo a través de los audífonos y de forma constante durante toda la sesión. De igual manera, los intervalos de estímulos Auditivos se presentaron como ausencia del pulso auditivo y presencia del ruido browniano (Figura 3e). En la modalidad Táctil el punto de fijación consistió en una presión ligera sobre la yema del dedo, causada por el peso de éste al apoyarlo sobre el estimulador. Los intervalos de estímulos Táctiles consistieron en la ausencia del pulso táctil y la presencia de esta presión ligera (Figura 3g). Finalmente, el punto de fijación de la modalidad Visual se presentó como un punto pequeño (30 x 30 pixeles) al centro de la pantalla, sobre un fondo de color gris. Durante el estímulo Visual, los intervalos mantuvieron esta presentación (Figura 3i), excluyendo la presencia del pulso visual.

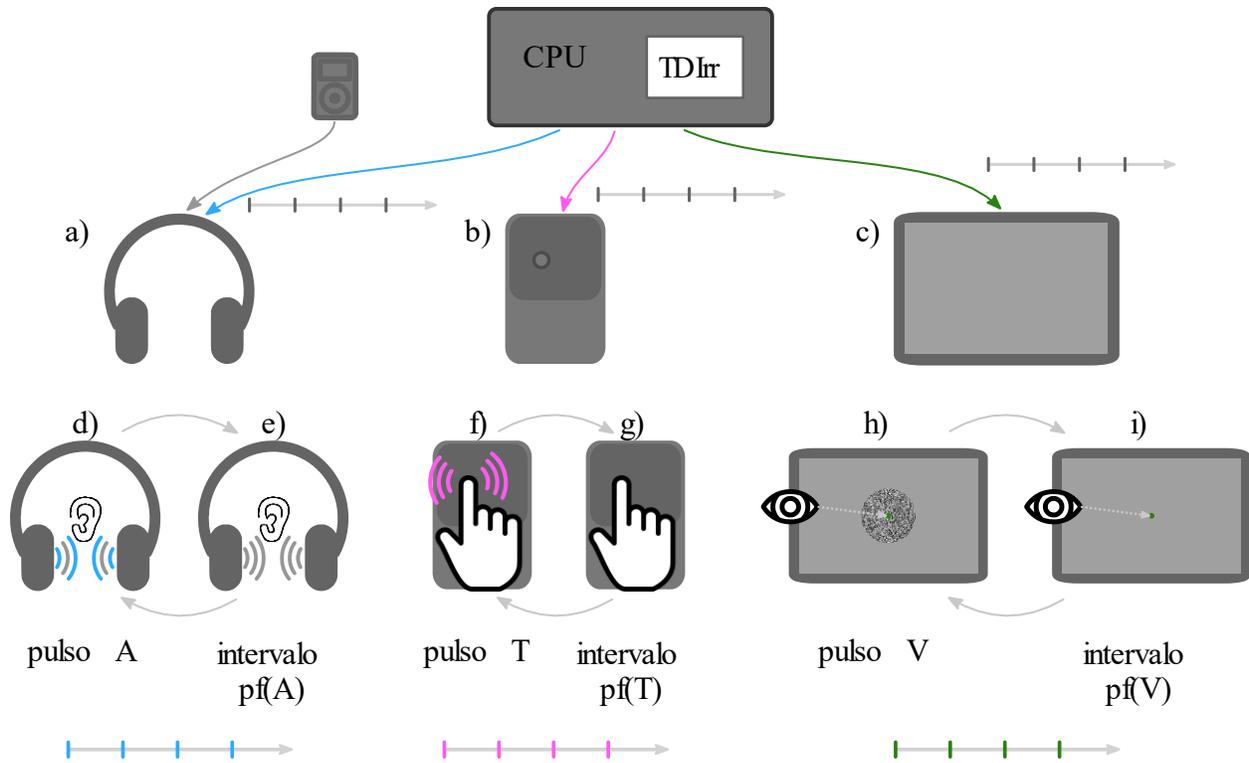


Figura 3. Presentación de ensayos en distintas modalidades sensoriales. La computadora (CPU, arriba al centro) envía, a través de distintos puertos de salida, las señales programadas en la tarea para producir la estimulación de los diferentes tipos de ensayo. Las señales auditivas, táctiles y visuales se presentaron a través de audífonos (a), un estimulador táctil (b) y un monitor (c), respectivamente. Los estímulos se presentaron como secuencias de pulsos auditivos (d), táctiles (f) o visuales (h), separados por intervalos (e, g, i, respectivamente). La estimulación durante los intervalos corresponde al mantenimiento simultáneo de los tres puntos de fijación sensorial (pf): Auditivo (e), Táctil (g) y Visual (i).

La tabla 1 resume las condiciones sensoriales que caracterizaron a los pulsos e intervalos de los estímulos de cada Modalidad Sensorial. Los intervalos (Tabla 1, filas sombreadas en gris) se presentaron de la misma manera, sin importar la Modalidad Sensorial del estímulo al que pertenecían: como los puntos de fijación auditivo (Figura 3e), táctil (Figura 3g) y visual (Figura 3i), simultáneamente. Lo que distinguió la Modalidad Sensorial de los estímulos fue la entrada sensorial generada por los pulsos de cada ensayo.

Tabla 1

Condiciones sensoriales de los eventos en los estímulos.

Modalidad Sensorial	Evento	Audífonos	Estimulador táctil	Monitor
Auditivo	Pulso	*A + pf(A)	pf(T)	pf(V)
	Intervalo	pf(A)	pf(T)	pf(V)
Táctil	Pulso	pf(A)	*T + pf(T)	pf(V)
	Intervalo	pf(A)	pf(T)	pf(V)
Visual	Pulso	pf(A)	pf(T)	*V + pf(V)
	Intervalo	pf(A)	pf(T)	pf(V)

Nota: Muestra la estimulación sensorial producida por los diferentes estimuladores (audífonos, estimulador táctil y monitor) durante cada evento (pulsos e intervalos) que compone a los estímulos en diferentes modalidades sensoriales (Auditivo, Táctil y Visual). *: pulso; pf: punto de fijación; A: Auditivo; T: Táctil; V: Visual.

6.3.3. DURACIÓN DE LOS INTERVALOS E IRREGULARIDAD

Programamos los estímulos de la tarea como una secuencia de 20 pulsos, con 20 intervalos intercalados entre sí. La duración de los pulsos fue siempre de 50 ms, pero la duración de cualquier intervalo dentro del mismo estímulo pudo variar, siguiendo una regla de aleatoriedad relativa, y determinar que el estímulo fuera Regular o Irregular. Para generar la regularidad o irregularidad de los estímulos utilizamos la curva de distribución normal que depende de dos parámetros μ y σ . El parámetro μ (media) especifica el valor sobre el que se centra la distribución y también el más frecuentemente obtenido de ella. El parámetro σ (desviación estándar) especifica la dispersión o diferencia de los valores de la distribución, respecto de la media.

Así, la duración de los intervalos de cada estímulo dependió de la Duración Media (μ o DM) y el Porcentaje de Irregularidad (σ o %Irr) asignados al ensayo en cuestión. La duración de

los intervalos de cada estímulo se tomó aleatoriamente de una distribución normal definida por los parámetros μ y σ , asignados a ese ensayo. Usamos distribuciones con μ de 00 ms, 00 ms o 00 ms, y σ igual al 0 %, .7 %, . %, .7 %, . % o .7 % (desviación estándar redondeada al primer decimal y en unidades porcentuales respecto al valor de la media). La figura 4 ilustra y la tabla 2 describe las distribuciones producidas por la combinación de los parámetros μ y σ incluidos en el diseño.

Así, los estímulos Regulares se construyeron con distribuciones de μ igual a 300 ms, 600 ms o 1200 ms, pero siempre usando un σ de 0 % (Figura , todas las columnas de la fila superior). En consecuencia, todas las duraciones de los intervalos incluidos en un estímulo Regular serían igual al valor μ que corresponde a ese ensayo ($\sigma = 0\%$). Los estímulos Irregulares también se construyeron a partir de distribuciones con μ de 300 ms, 600 ms o 1200 ms, pero a diferencia de los anteriores, se usaron σ de .7 %, . %, .7 %, . % o .7 % (Figura , todas las columnas de la segunda a la sexta fila). Por lo tanto, las duraciones de los intervalos incluidos en un estímulo Irregular variaron aleatoriamente: alrededor del valor μ y en proporción al σ ($> 0\%$) de ese ensayo.

6.3.4. LOS ENSAYOS

La secuencia de eventos importantes en cada ensayo se resume en la figura 5. Los ensayos empezaron con la pantalla presentando la instrucción ““SPACE” para iniciar’ (Figura a), que indicó al participante que debía presionar la barra espaciadora para iniciar el estímulo. La duración de este primer evento fue decidida por el participante. Después de presionar la barra espaciadora, apareció un punto de fijación visual (Figura 5b), cuyo color indicó la Modalidad Sensorial del estímulo que estaba por comenzar. Se asignó un color azul para la modalidad Auditiva, un color rosa para la modalidad Táctil y un color verde para la modalidad Visual (este código de color se mantiene para las figuras en el texto cuando hacen referencia a la Modalidad Sensorial de los estímulos). El punto de fijación visual tuvo una duración variable y definida por la computadora a partir de una distribución normal con $\mu = 00.$ ms y $\sigma = 7$ ms y duración mínima posible igual a 334 ms.

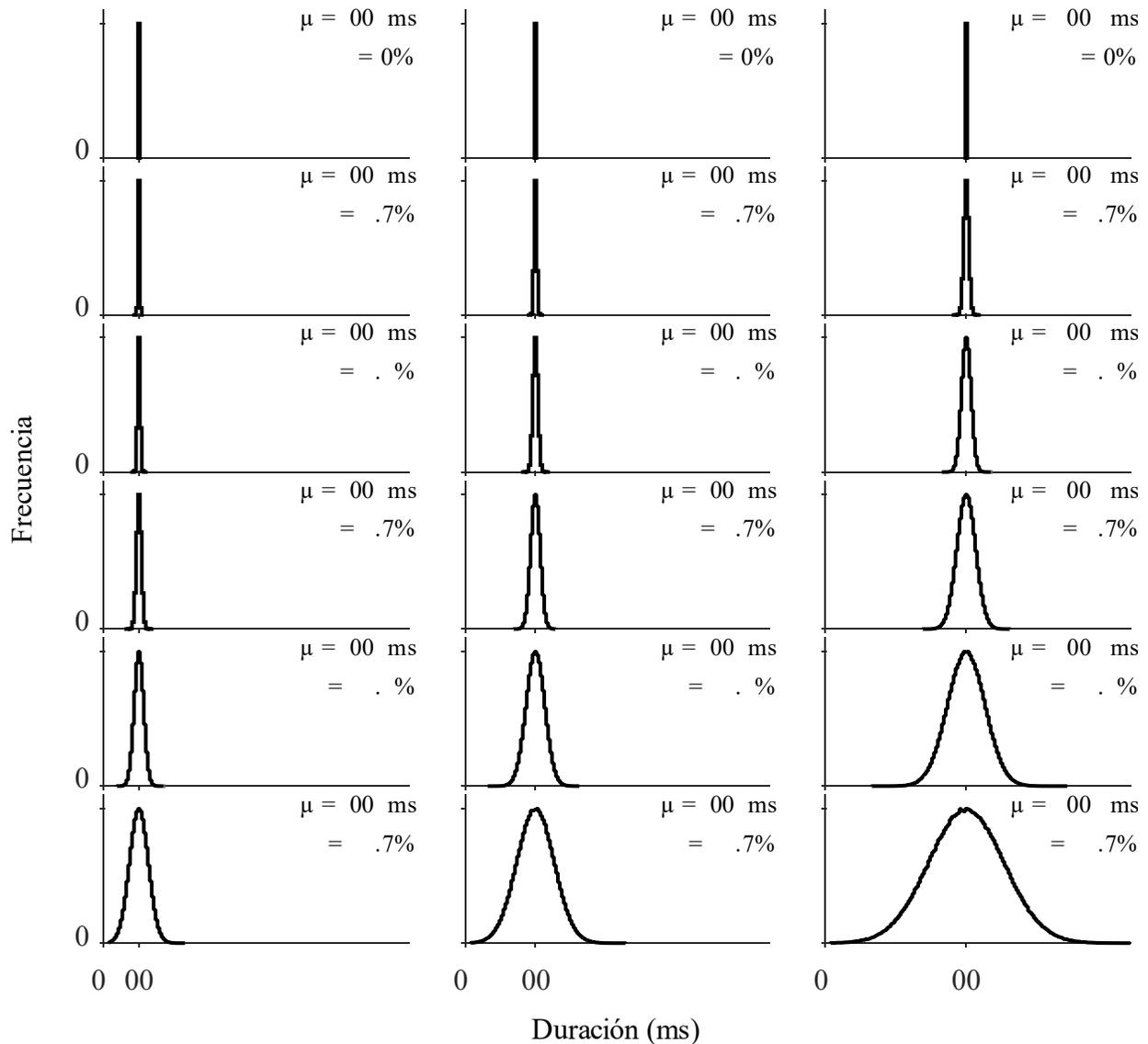


Figura 4. Curvas con distribución normal para cada combinación de los parámetros μ y σ . El eje de las abscisas presenta los posibles valores de duración de intervalos y señala la Duración Media en cada caso, el eje de las ordenadas muestra la frecuencia normalizada al valor máximo. La duración de los intervalos en cada estímulo la tomamos de la distribución que corresponde a la combinación de μ y σ asignados a ese ensayo. Las columnas, de izquierda a derecha, muestran curvas con μ igual 300 ms, 600 ms y 1200 ms, respectivamente. Las filas, de arriba abajo, muestran curvas con σ igual a 0 %, .7 %, . %, .7 %, . % y .7 %, respectivamente. Las curvas mostradas aquí se construyeron con 10^6 muestras obtenidas en unidades de cps (tamaño de bin \approx .7 m s). La única restricción del muestreo de duración de intervalos fue que los valores obtenidos fueran mayores o iguales a la duración de un pulso (cps \approx 0 ms).

Tabla 2

Descriptivos de las distribuciones de duración de los intervalos.

μ	σ	Media (ms)	D.E. (ms)	Min (ms)	Max (ms)	n	%Irr
300 ms	0 %	300.6	0	300.6	300.6	1	0 %
	1.7 %	300.6	5.1	267.2	317.3	4	1.7 %
	3.3 %	300.6	11.1	250.5	350.7	7	3.7 %
	6.7 %	300.6	20.6	200.4	400.8	13	6.9 %
	13.3 %	300.6	40.3	116.9	484.3	23	13.4 %
	26.7 %	300.7	79.9	50.1	684.7	39	26.6 %
600 ms	0 %	601.2	0	601.2	601.2	1	0 %
	1.7 %	601.2	11.1	551.1	651.3	7	1.8 %
	3.3 %	601.2	20.6	501.0	701.4	13	3.4 %
	6.7 %	601.1	40.3	400.8	801.6	25	6.7 %
	13.3 %	601.1	80.1	200.4	985.3	46	13.3 %
	26.7 %	601.4	159.7	50.1	1369.4	80	26.6 %
1200 ms	0 %	1202.4	0	1202.4	1202.4	1	0 %
	1.7 %	1202.4	20.6	1102.2	1302.6	13	1.7 %
	3.3 %	1202.4	40.3	1018.7	1386.1	23	3.4 %
	6.7 %	1202.3	80.2	835.0	619.9	48	6.7 %
	13.3 %	1202.2	160.1	417.5	1920.5	91	13.3 %
	26.7 %	1203.2	319.4	50.1	2655.3	156	26.5 %

Nota: Media, desviación estándar, duración mínima, duración máxima, número de valores de duración diferentes (muestras obtenidas en unidades de cps) y Porcentaje de Irregularidad (unidades porcentuales de desviación estándar sobre la media calculadas) de las distribuciones obtenidas con cada combinación de los parámetros μ y σ . Estos descriptivos corresponden a las distribuciones ilustradas en la figura 4.

El estímulo (Figura 5c) se presentó a través de los audífonos, el monitor o el estimulador táctil, y terminó cuando el participante lo interrumpió con su respuesta (Figura 5d). Consideramos como respuestas válidas aquellas que ocurrieron después de presentarse completos los primeros dos intervalos y antes de terminar la secuencia de 20 intervalos. Después del estímulo apareció una pantalla de retroalimentación (Figura 5d). El mensaje de retroalimentación marcó el final del ensayo (Figura 5e), dependió del estímulo presentado (Regular o Irregular) y de la respuesta del participante (“Regular” o “Irregular”), así como del tiempo en que la emitió (Figura 6).

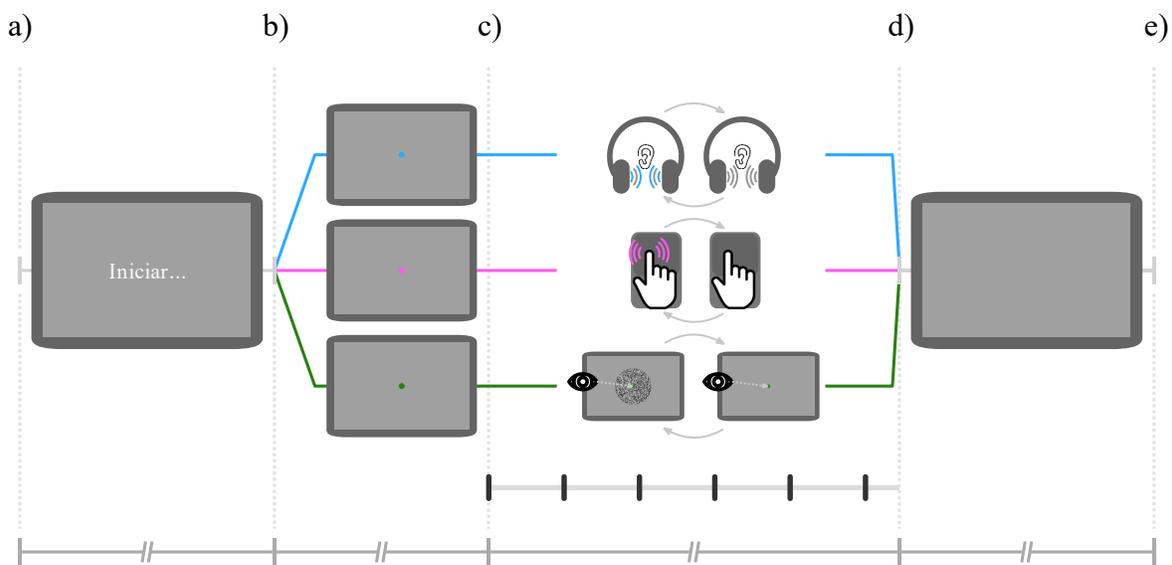


Figura 5. Secuencia de eventos que componen un ensayo. Inicio del ensayo, se presentan instrucciones (a) para que el participante inicie el estímulo presionando la barra espaciadora (b), seguida de la cual se presenta un punto de fijación visual, pf(V), con pista en color para indicar la Modalidad Sensorial del estímulo por iniciar (b). Secuencia de pulsos e intervalos que componen el estímulo (c). Interrupción del estímulo con la respuesta del participante (d) y aparición del mensaje de retroalimentación en el sitio de la pantalla marcado aquí con ‘ ’. Fin del ensayo (e).

6.3.5. LA RETROALIMENTACIÓN

Al inicio de las sesiones indicamos a los participantes que en cada ensayo debían responder correctamente y tan rápido como les fuera posible si el estímulo que estaban observando era

Regular o Irregular. La respuesta se emitió presionando una de las dos teclas que representaban las categorías “Regular” o “Irregular”.

Cuando la respuesta del participante interrumpió el estímulo entre el tercer pulso y el vigésimo intervalo (respuesta válida), el mensaje de retroalimentación mostró un ‘¡Correcto!’ (Figura 6a) o ‘Incorrecto’ (figura b), dependiendo de la regularidad o irregularidad programada de estímulo (σ) y de la respuesta (“Regular” o “Irregular”; ejemplos de respuesta ilustrados en la parte superior de la figura 6). El mensaje de retroalimentación incluyó el tiempo en segundos desde el inicio del estímulo (el primer pulso) hasta la emisión de la respuesta.

Cuando la respuesta ocurrió antes de terminar el segundo intervalo (antes del tercer pulso), se mostró el mensaje ‘¡Demasiado pronto!’ (figura c). Si no se emitió una respuesta antes de terminar el vigésimo intervalo, la retroalimentación mostró el mensaje ‘¡Se acabó el tiempo!’ (Figura d). Consideramos estos últimos casos como respuestas inválidas debido a que ocurrieron sin haberse mostrado las unidades de información mínimas y necesarias para tomar la decisión perceptual (dos intervalos a comparar) o por omitir la respuesta. En estos casos el ensayo en cuestión se repitió al final de la sesión sin notificarlo al participante. La duración de la pantalla de retroalimentación se definió igual que la del punto de fijación visual (Figura 5b).

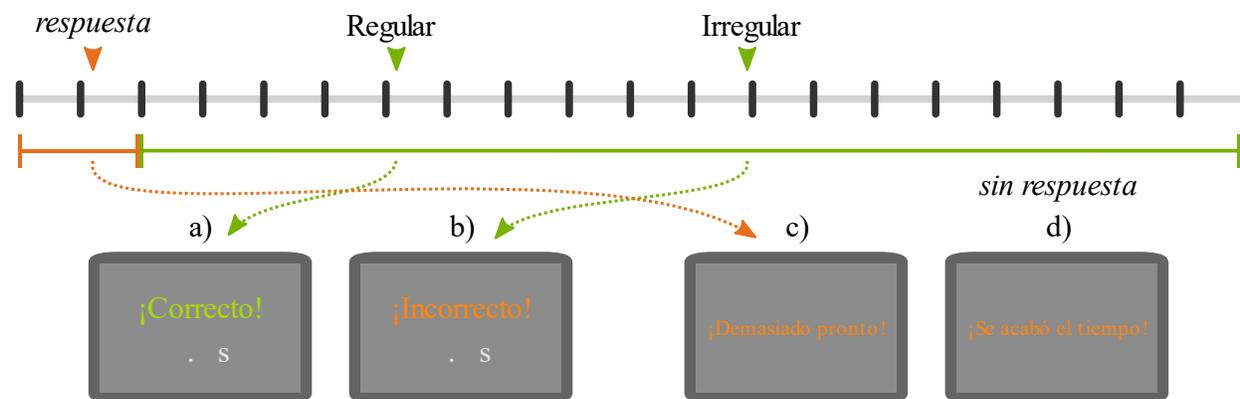


Figura 6. El mensaje de retroalimentación. La retroalimentación dependió del estímulo presentado (aquí se muestra uno Regular), de la respuesta y del tiempo en que ocurrió (ejemplos mostrados arriba del estímulo). Después de una respuesta válida (ocurrida en cualquier tiempo del segmento horizontal verde, mostrado abajo del estímulo) se mostró la exactitud del juicio (“Correcto” o “Incorrecto”) y el tiempo en segundos usado para emitir una respuesta (a y b). Después de una respuesta inválida, ya sea por ocurrir antes de tiempo (c; segmento horizontal

anaranjado, mostrado debajo del estímulo) o por omisión de la respuesta (d), se mostró el tipo de error cometido y el ensayo se repitió inadvertidamente para el participante al final de la sesión.

Los participantes registraron sus respuestas presionando en el teclado “F” para indicar “Regular”, y “S” para indicar “Irregular”. Indicamos a los participantes que ambas respuestas, junto con la presión de la barra espaciadora para iniciar el estímulo, debían realizarse sobre el teclado con la mano izquierda. Al iniciar cada sesión, el participante colocó la mano izquierda sobre el teclado, ubicando el dedo pulgar encima de la barra espaciadora, el índice sobre la tecla de respuesta “Regular” y el anular sobre la tecla de respuesta “Irregular”, para conservar esa posición durante toda la sesión.

6.4. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para responder las preguntas de investigación, la implementación de la tarea en el experimento siguió un diseño factorial completo de medidas repetidas con tres factores. Los factores de interés fueron el Porcentaje de Irregularidad (%Irr) con seis niveles de comparación, la Modalidad Sensorial de los pulsos en el estímulo (MS) con tres niveles de comparación, y la Duración Media de los intervalos entre pulsos (DM) con tres niveles de comparación (Tabla 3).

Programamos la tarea para presentar en una sesión los ensayos producidos de cada combinación posible entre los niveles de los tres factores incluidos en el diseño. Con el objetivo de evitar inducir un sesgo en la respuesta emitida por los participantes (cada ensayo incluye retroalimentación) programamos la tarea para que la mitad de los ensayos de cada sesión fueran Regulares ($\sigma = 0\%$; ensayos; Figura 7b) y que la otra mitad fueran Irregulares ($\sigma > 0\%$; %Irr $\times 3_{MS} \times 3_{DM} = 45$ ensayos; Figura 7b). Así, cada sesión se compuso de 90 ensayos (sin contar aquellos que se repetirían por cumplir los criterios de respuesta inválida). Como parte de los estímulos Irregulares, presentamos nueve ($3_{MS} \times 3_{DM}$) con cada valor de Porcentaje de Irregularidad $\sigma > 0\%$. Los niveles de los factores Modalidad Sensorial y Duración Media se distribuyeron equitativamente en los subconjuntos de cada Porcentaje de Irregularidad (Figura 7c, 7d). De esta manera, en una sesión de 90 ensayos presentamos 30 de cada Modalidad Sensorial y 30 de cada Duración Media de los intervalos entre pulsos.

Tabla 3

Factores y niveles incluidos en el diseño experimental.

Factor	Niveles de comparación					
%Irr	0 %	1.7 %	3.3 %	6.7 %	13.3 %	26.7 %
MS	Auditiva		Táctil		Visual	
DM	300 ms		600 ms		1200 ms	

Nota: Muestra los factores y niveles de comparación incluidos en el diseño factorial completo de medidas repetidas del experimento. Todos los participantes incluidos en el estudio resolvieron ensayos con cada combinación posible de los niveles de los tres factores.

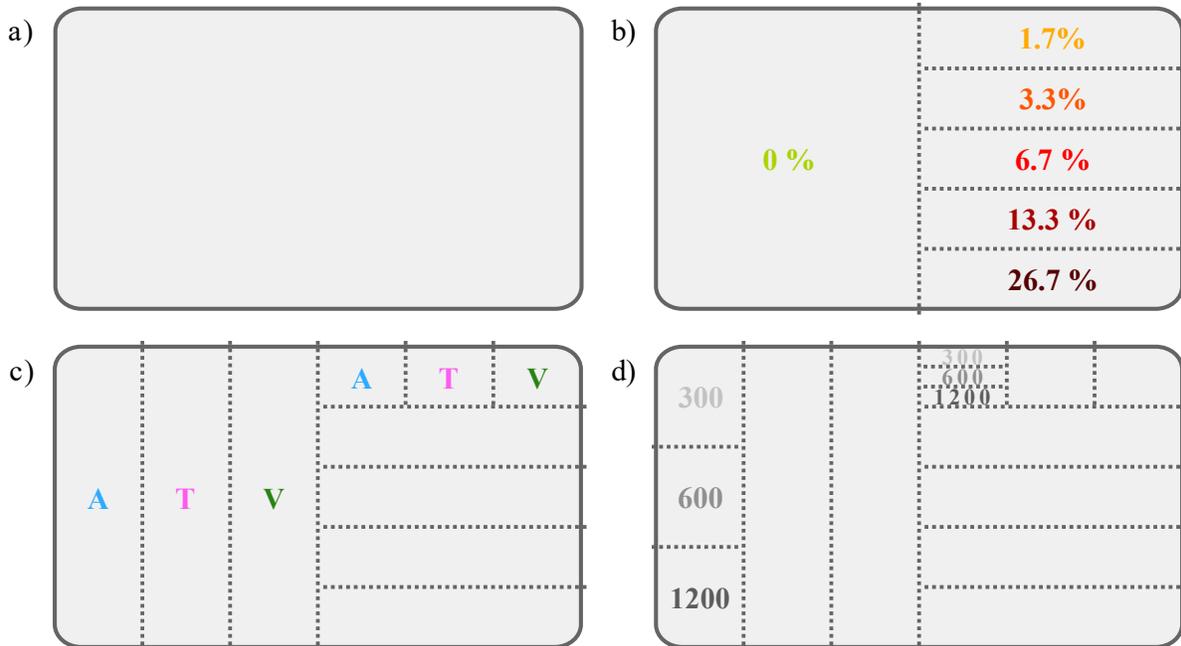


Figura 7. Distribución de los niveles de comparación de los factores incluidos en diseño de la tarea dentro del conjunto de ensayos de una sesión experimental. Conjunto de 90 ensayos de una sesión experimental completa (a). Separación a la mitad, entre ensayos Regulares e Irregulares y subdivisión por Porcentaje de Irregularidad de los últimos (b). Subdivisión anidada por niveles de Modalidad Sensorial (c). Subdivisión anidada por Duración Media (d).

Para cada ensayo presentado se registró la respuesta dada por el participante (“Regular” o “Irregular”) y el tiempo (en unidades de segundo e intervalos) que tardó en emitir dicha respuesta (contando a partir del inicio del estímulo).

6.5.- PROCEDIMIENTO

Después de explicar a los participantes el objetivo general y la tarea que tendrían que resolver, obtuvimos su consentimiento informado y programamos los horarios de las sesiones a resolver. Al iniciar la primera sesión, explicamos a los participantes las instrucciones para resolver la tarea y presentamos seis ensayos de muestra, para mostrar ejemplos de estímulos Regulares ($\sigma = 0\%$) e Irregulares ($\sigma = 26.7\%$) en cada Modalidad Sensorial (Auditiva, Táctil, Visual) y con diferentes Duraciones Media de intervalos entre pulsos (300 ms, 600 ms, 1200 ms); además de explicar el tipo de mensajes de retroalimentación que podrían presentarse al final de cada ensayo.

En cada sesión presentamos aleatoriamente 90 ensayos incluyendo cada combinación posible de los niveles y factores considerados en el estudio. Al final de la sesión se repitieron automática e inadvertidamente los ensayos que durante la sesión registraron respuestas inválidas. Cada uno de los 15 participantes incluidos en la muestra resolvió entre 15 y 18 sesiones (3 sesiones al día), completando entre todos los participantes y todas las sesiones un total de 22140 ensayos.

Aproximadamente, la mitad de las sesiones se programaron para generar estímulos con duraciones de intervalos tomadas siempre de las distribuciones normales asignadas al ensayo en particular. La otra mitad generaba, también, estímulos con duraciones de intervalos tomadas siempre de las distribuciones normales correspondientes, a excepción del primer intervalo del estímulo (señalado como t_1 en la Figura 2) cuya primera duración era siempre igual al valor de Duración Media asignado a ese ensayo.

7. EL MODELO DE DECISIÓN

La segunda parte de los objetivos de este trabajo consiste en indagar cómo utilizamos la información presentada secuencialmente durante estímulos de la tarea de percepción de irregularidad para escoger una respuesta y el momento óptimo para responder. Debido a que los estímulos de la tarea se caracterizan por presentar información temporal de manera secuencial y siguiendo una regla relativamente aleatoria, el observador debe buscar, durante la presentación del estímulo, la información que le permita identificarlo correctamente como Regular o Irregular, tan rápido como le sea posible. El punto clave del problema que enfrenta el participante en esta tarea es escoger la respuesta y el momento óptimo para emitirla a pesar de la incertidumbre que tiene sobre la estructura temporal del estímulo que está observando.

¿Cómo utilizamos la información presentada secuencialmente durante los estímulos para escoger una determinada opción de respuesta, así como el momento óptimo para emitir esa decisión? Podemos suponer que los participantes hacen un registro secuencial de las duraciones de los intervalos mientras estos se van presentando dentro del estímulo. Con este registro sería posible calcular algún indicador de regularidad o irregularidad que aquí llamaremos *evidencia*. En la figura 8 se observa el cálculo de evidencia usando como ejemplo dos estímulos con la misma Duración Media pero diferentes Porcentajes de Irregularidad ($\sigma = 0\%$ y $\sigma = 26.7\%$), de manera que uno es Regular y el otro Irregular.

$$\frac{|t_i - t_{i-1}|}{t_{i-1}}$$

Fórmula 1. Regla de comparación para obtener la evidencia entre las duraciones de cada intervalo del estímulo, t_i , y el inmediatamente anterior, t_{i-1} . Con esta fórmula se obtiene el valor absoluto de la diferencia entre ambas duraciones en proporción al intervalo anterior.

Pueden usarse diferentes métodos para calcular la evidencia de regularidad o irregularidad en los estímulos. Aquí, suponemos que, al completarse la duración de cada intervalo, el sistema hace una comparación absoluta y relativa (Fórmula 1) entre el intervalo recién terminado (t_i) y el

intervalo inmediatamente anterior (t_{i-1}). Como observa en la figura 8a, el cálculo de evidencia empezaría al terminar el segundo intervalo (al presentarse el tercer pulso), t_2 , y utilizaría como duración de referencia o comparación el intervalo inmediatamente anterior, t_1 . Esta operación se repetiría secuencialmente a medida que se complete la presentación de nuevos intervalos en el estímulo, y hasta que termine o el participante decida interrumpirlo con la respuesta (Figura 8a).

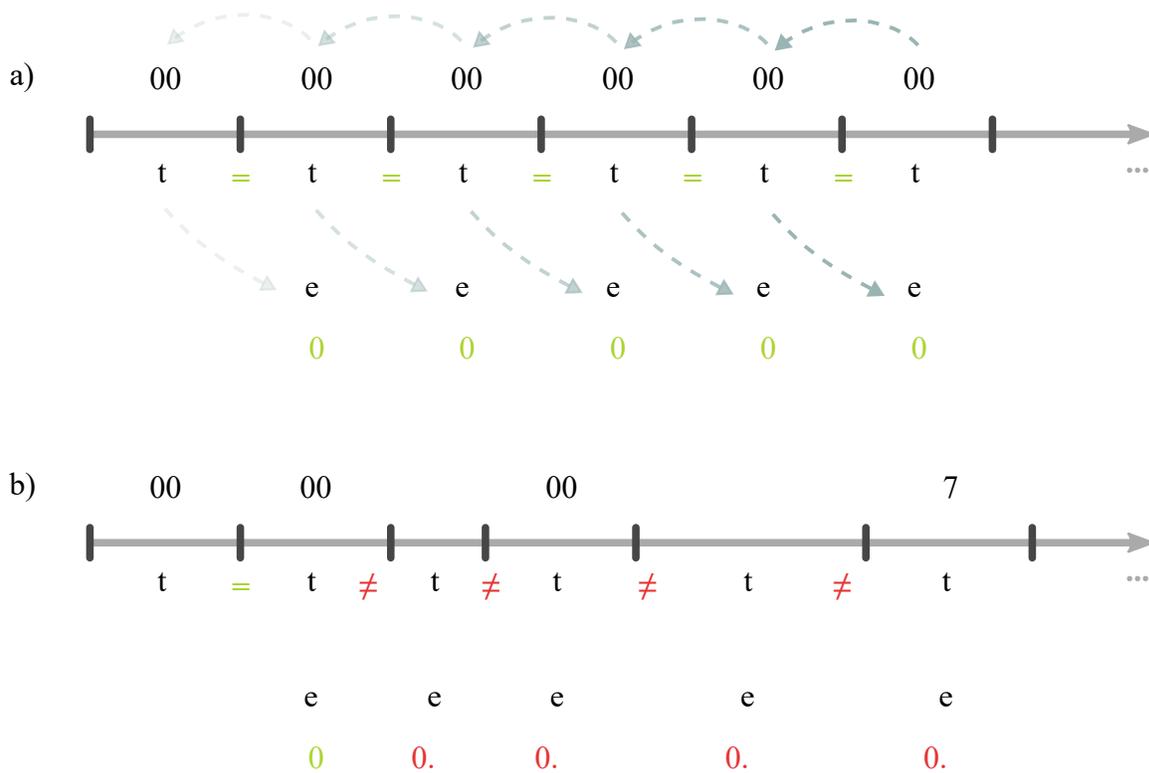


Figura 8. Evidencia calculada a partir de la duración de los intervalos en un estímulo. Cálculo secuencial de la evidencia (e_i) comparando en cada ocasión la duración de un intervalo (t_i) con el intervalo inmediatamente anterior (t_{i-1}). En un estímulo Regular todos los valores de evidencia son igual a cero, como se señala en color verde (a). Valores de evidencia en un estímulo Irregular; aquellos mayores a cero indican irregularidad y se señalan en rojo (b).

Cada comparación genera un puntaje de evidencia igual a cero si los intervalos comparados son idénticos (esta evidencia indica regularidad) y mayor que cero si los intervalos comparados son diferentes (esta evidencia indica irregularidad). Valores de evidencia mayores representan

diferencias mayores entre las duraciones de los intervalos comparados, y, por lo tanto, una irregularidad mucho más notable que aquellos valores que se aproximan a cero.

El cómputo secuencial de evidencia en el estímulo Regular (Figura 8a) es siempre igual a cero (se señala con color verde). Esto ocurre porque, por definición, los estímulos Regulares se componen de intervalos de duración idéntica. En cambio, el estímulo Irregular (Figura 8b) presenta la primera diferencia de duración entre el tercer, t_3 (184 ms), y el segundo intervalo, t_2 (300 ms). Esto se traduce en un valor de evidencia mayor a cero (se señala con color rojo), y en este ejemplo, lo mismo ocurre con los cálculos consecutivos de evidencia.

Para responder cómo podríamos usar la información de los estímulos para emitir una respuesta (“Regular” o “Irregular”) en un cierto momento usamos un modelo acumulativo de decisión que típicamente representa la integración de aquellas propiedades relevantes del estímulo mientras éste se está presentando. En el contexto de la tarea de percepción de irregularidad, la información más relevante para que el modelo produzca una respuesta y tiempo de respuesta, semejantes a los que producen en cada ensayo un participante, se basa en la estructura temporal del estímulo. Así, el modelo de decisión funciona con la evidencia, que calculamos al comparar la duración de los intervalos que componen el estímulo.

Para representar el funcionamiento del modelo usamos una gráfica simple. El eje de las abscisas (Figura 9a) representan unidades relativas de intervalos completos observados. El eje de las ordenadas (Figura 9b) representa unidades relativas de evidencia tal como las hemos calculado con la fórmula 1. Los valores positivos en el eje de evidencia marcan una tendencia a favor de la opción de respuesta “Irregular”, mientras que los valores negativos en el eje se traducen como una tendencia a favor de la opción de respuesta “Regular”. Para determinar la respuesta del modelo, incluimos dos variables de decisión con tendencias opuestas entre sí y compitiendo simultáneamente para determinar tanto la respuesta como el tiempo de respuesta frente a cualquier estímulo y su evidencia asociada. La variable de decisión con tendencia negativa (línea en color verde; Figura 9c) se asocia a la respuesta “Regular”, mientras que la variable de decisión con tendencia positiva (línea en color rojo) se asocia a la respuesta “Irregular”.

La línea horizontal alineada al valor de evidencia cero (Figura 9e) marca el punto de partida de ambas variables de decisión al iniciar el estímulo. Las variables de decisión se mantienen constantes sobre ese valor hasta que comienza el cálculo de evidencia (al completarse el segundo intervalo). A partir de ese punto las variables de decisión separan sus trayectorias considerando la evidencia que se computa con cada nuevo intervalo y otros parámetros adicionales. La variable de decisión que primero alcance su umbral de decisión determinará la respuesta del modelo (“Regular” o “Irregular”). El punto en el tiempo (intervalos) en que se alcanza el umbral determinará el tiempo de respuesta del modelo. El umbral inferior (Figura 9f) corresponde a la emisión de la respuesta “Regular”, mientras que el umbral superior (Figura 9g) corresponde a la emisión de la respuesta “Irregular”.

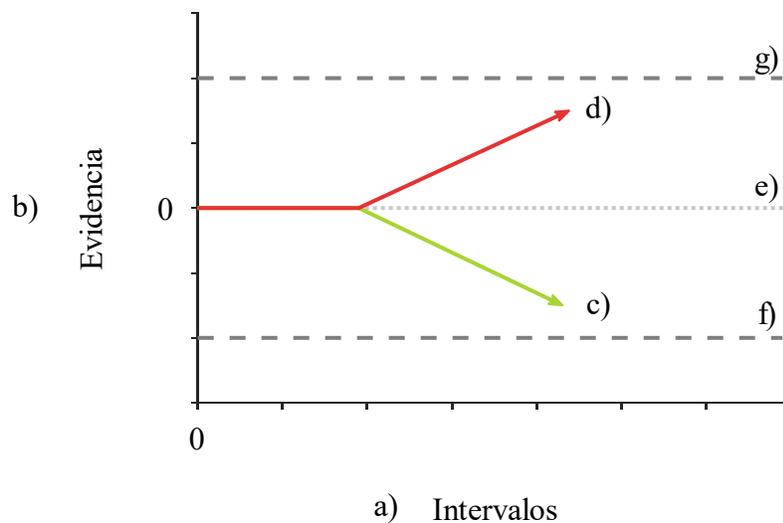


Figura 9. Elementos de la representación gráfica del modelo de decisión. Eje de tiempo en unidades de intervalo (a). Eje de evidencia (b). Variable de decisión con tendencia negativa para la respuesta “Regular” (c). Variable de decisión con tendencia positiva para la respuesta “Irregular” (d). Punto de origen de las variables de decisión al inicio del estímulo (e). Umbral de decisión inferior para producir la respuesta y tiempo de respuesta de la decisión perceptual “Regular” (f). Umbral de decisión superior para producir la respuesta y tiempo de respuesta de la decisión perceptual “Irregular” (g).

La figura anterior presenta sólo la tendencia general de las variables de decisión, sin embargo, con cada nuevo intervalo, ambas resultan afectadas de manera diferencial por la evidencia y por otros parámetros incluidos en el modelo. La figura 10 representa los efectos de esos elementos sobre ambas variables considerando como ejemplo la secuencia de evidencia (Figura 10a) calculada a partir del estímulo Irregular de la figura 8a. Agregamos marcadores circulares a las variables de decisión para señalar los puntos que corresponden en el tiempo al final de cada nuevo intervalo.

La figura 10b representa la operación del modelo hasta el final del tercer intervalo (t_3) y la integración de las primeras dos unidades de información. El recuadro gris a la derecha de la figura 10b muestra como barras verticales la magnitud de los cambios netos que sufrieron ordenadamente la variable de decisión Regular (en verde) y la variable de decisión Irregular (en rojo).

Las flechas asociadas a estas barras verticales (recuadro gris de la figura 10b) apuntan en la dirección del cambio que representan sobre las variables de decisión (hacia arriba son cambios positivos o menos negativos y hacia abajo son cambios negativos o menos positivos), vinculándose con los factores que producen dichos cambios.

Los cambios en las variables de decisión inician al completarse el segundo intervalo. En este punto, la variable de decisión Regular incrementa (primera barra verde, de izquierda a derecha) debido a la inclusión de un ruido sensorial. El valor de este ruido, RS_1 , corresponde al absoluto de una muestra aleatoria tomada de una distribución normal con media cero y desviación estándar igual al parámetro **RS**. Al mismo tiempo la variable de decisión Irregular incrementa (primera barra roja, de izquierda a derecha) debido a la suma del mismo ruido sensorial, RS_1 , y la primera evidencia calculada (e_1). Dado que el valor de $e_1 = 0$, el incremento en la variable Irregular es idéntico al incremento en la variable Regular.

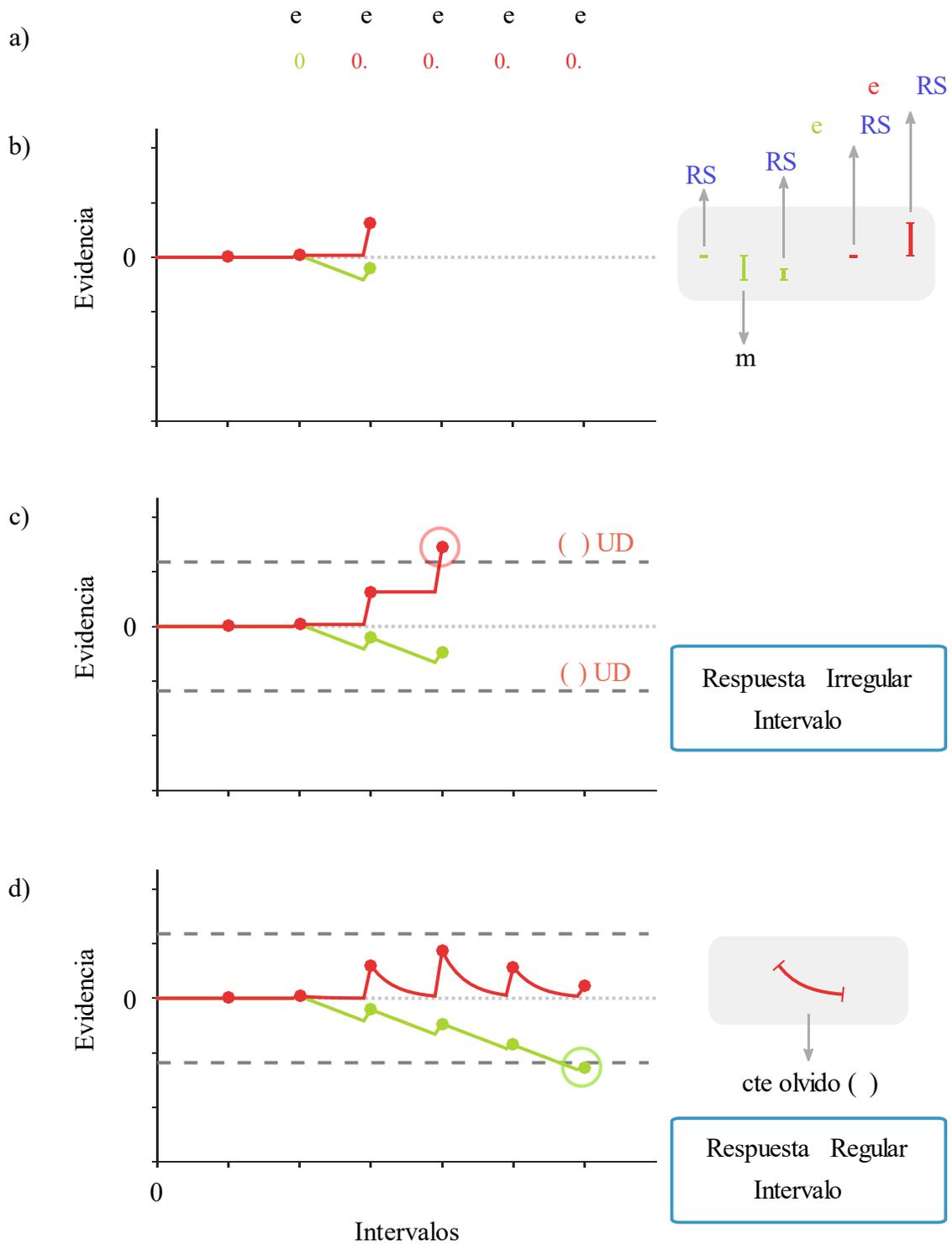


Figura 10. Operación del modelo de decisión y los efectos sobre las variables de decisión. Secuencia de evidencias de un estímulo Irregular de ejemplo (a). Operación del modelo hasta el tercer intervalo (b). El modelo responde “Irregular” en el intervalo (c). El modelo responde

“Regular” en el intervalo , frente al mismo estímulo, pero incluyendo un constante de olvido grande.

Después de esto, la variable Regular presenta una disminución constante hasta poco antes de terminar el tercer intervalo. Este cambio (segunda barra verde, de izquierda a derecha) es producido por el valor negativo del parámetro m que determina la pendiente de la caída lineal de la variable de decisión. En cambio, la variable de decisión Irregular permanece constante sobre el valor de evidencia acumulada que alcanzó al final del segundo intervalo.

Finalmente, al terminar el tercer intervalo, la variable de decisión Regular sufre un segundo incremento (tercera barra verde, de izquierda a derecha) por la inclusión de un segundo ruido sensorial, RS_2 , muestreado bajo las mismas condiciones que el primero. La variable de decisión Irregular también resulta afectada por RS_2 , sin embargo, dado que la segunda evidencia calculada es mayor que cero ($e_2 = 0.39$), el incremento que sufre la variable Irregular (segunda barra roja, de izquierda a derecha) es mayor que el de la variable Regular.

Si dejamos al modelo seguir operando bajo este mecanismo, la variable de decisión Irregular encontraría su umbral de decisión al terminar el cuarto intervalo (Figura 10c). Como parte del diseño del modelo, suponemos que la ubicación de los umbrales es simétrica alrededor de cero y está determinada por el valor de UD (con signo positivo para el umbral Regular y signo negativo para el umbral Irregular).

Consideramos un parámetro adicional para la variable de decisión Irregular, relacionado a la constante de caída (exponencial) u olvido de la evidencia de irregularidad, λ (Figura 10d). En la figura 10d suponemos un valor de λ suficientemente grande como para que, tras cada incremento al final de un intervalo (si no se alcanzó el umbral Irregular), la variable de decisión regrese a cero. Definimos esta versión del modelo como “Detección” (Figura 0d) porque representa una estrategia en la que no se acumula o almacena evidencia de irregularidad a lo largo del estímulo, pero se puede generar la respuesta “Irregular” esperando una unidad de información que claramente sobrepase el umbral de decisión.

El parámetro λ se encuentra incluido también en la versión del modelo, presentada en la figura 10c. En ésta el valor del parámetro es igual a cero ($\lambda = 0$), por lo tanto, la variable de

decisión se mantiene constante sobre el valor de evidencia que acumuló en el intervalo anterior y en espera de otro incremento con el intervalo actual que está por terminar. A esta versión del modelo la definimos como “Acumulación” ya que, a diferencia de la versión anterior, guarda e integra cada una de las entradas a favor de la respuesta “Irregular”.

8. RESULTADOS

Los estímulos en la tarea consistieron en una secuencia de pulsos perceptibles separados por intervalos cuyas duraciones en conjunto determinaron la estructura temporal a evaluar. Le dimos al participante la instrucción de poner atención al estímulo y decidir correctamente, y tan rápido como pudiera, si su estructura temporal era Regular o Irregular. Para cada ensayo registramos la respuesta y el tiempo en que ésta ocurrió, contando desde el inicio del estímulo hasta que el participante emitió su decisión presionando un botón.

La primera sección de resultados se aboca al análisis de las funciones psicométricas y cronométricas. Éstas resumen la ejecución en términos de la proporción de respuestas “Irregular” y del tiempo de respuesta promedio, considerando las agrupaciones dadas por los factores de interés incluidos en el diseño. Por ello, ordenamos la presentación de datos analizando por separado la ejecución general, por Modalidad Sensorial y por Duración Media de los intervalos entre pulsos; además de incluir todas las posibles combinaciones dadas por los niveles de cada factor.

En la segunda sección presentamos el análisis de las posibles reglas de operación que relacionan la estructura temporal que caracteriza a cada estímulo con la decisión perceptual y el momento en que ésta se toma. Para ello diseñamos un modelo computacional que utiliza esta información para emular la forma en que los participantes resuelven la tarea en ensayos individuales.

8.1. ANÁLISIS PSICOMÉTRICO Y CRONOMÉTRICO

8.1.1. EJECUCIÓN GENERAL

La regularidad o irregularidad de un estímulo rítmico se define por la estructura temporal de la información que presenta de forma secuencial. Aunque podemos suponer que la discriminación de estas estructuras de información se basa en los mecanismos de percepción y producción de intervalos únicos, resulta importante determinar hasta qué punto la dinámica aleatoria del

estímulo y la incertidumbre que genera en el observador mientras se presenta afectarían la capacidad de procesar dichos estímulos.

La proporción de respuestas “Irregular” incrementa en función del Porcentaje de Irregularidad de los estímulos (Figura 11). Esta relación ordenada implica que, a mayor variabilidad en la duración de los intervalos dentro del estímulo, mayor probabilidad de identificar el estímulo como “Irregular”.

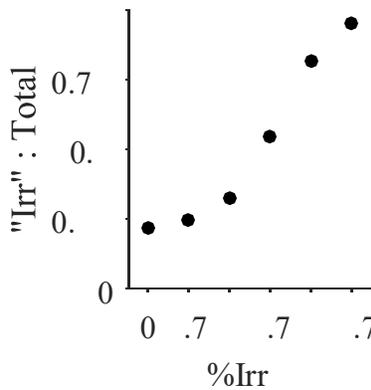


Figura 11. Proporción de respuestas “Irregular” en función del Porcentaje de Irregularidad de los estímulos. El eje de las abscisas muestra sólo algunos valores de Porcentaje de Irregularidad y se usó una escala logarítmica (este formato se conserva para las siguientes figuras). Número de ensayos por punto: $n_{\sigma=0} = 11070$; $n_{\sigma_i>0} = 2214$.

Para probar el tipo de relación entre el Porcentaje de Irregularidad de los estímulos y la proporción de respuestas “Irregular” obtenida de ellos, ajustamos el modelo de la función logística a los datos. Utilizando el algoritmo Nelder-Mead Simplex de Palamedes (versión 1.8.2; Prins & Kingdom, 2018) buscamos el valor óptimo de los parámetros α , β y γ , asumiendo que la tasa de omisiones del sistema sería despreciable (fijamos el valor de λ en 0 y en adelante haremos referencia a este parámetro como “Lambda”).

Encontramos un ajuste logístico para la función psicométrica de la ejecución general con valores óptimos de $\alpha = 7.5$, $\beta = 0.5$ y $\gamma = 0.5$, suponiendo que Lambda = 0 (Figura 12). El valor α de la ejecución general se encuentra por encima de la magnitud intermedia de

irregularidad ($\sigma = .7$). Esto se observa gráficamente como un desplazamiento de la curva hacia la derecha dentro rango de magnitudes probadas del estímulo y a grandes rasgos se puede interpretar como un criterio estricto, ya que la proporción de respuestas “Irregular” aumenta. Por otro lado, la proporción de respuestas “Irregular” frente a estímulos que carecían de irregularidad (Regulares, $\sigma = 0$), o bien la tasa de falsas alarmas, es relativamente alta (0.) . En contraste, la proporción de respuestas “Regular” frente a los estímulos más Irregulares ($\sigma = .7$) , o bien la tasa de omisiones, es muy baja (0.05). Esto último sustenta la estrategia de fijar el valor de Lambda en 0 como parte del método de ajuste.

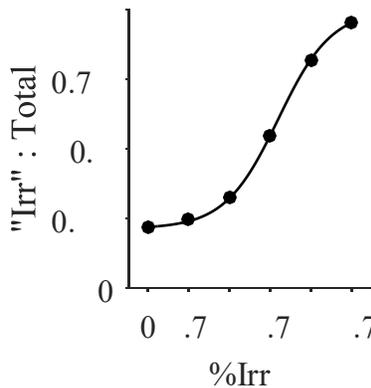


Figura 12. Función psicométrica de la ejecución general. Ajuste logístico a la proporción de respuestas “Irregular” en función del Porcentaje de Irregularidad de los estímulos.

El promedio de tiempo de respuesta (Figura) en los estímulos Regulares ($\sigma = 0$) es de . segundos o 8.21 intervalos. La medición de tiempo de respuesta se basa en las unidades de información presentadas antes de la emisión de la respuesta, por lo tanto, son independientes de la duración particular de los intervalos en los estímulos. El promedio de tiempo de respuesta se mantiene similar para cada escala (segundos o intervalos) frente a estímulos con menor %Irr ($\sigma_i < 6.7$). Sin embargo, el tiempo de respuesta comienza a disminuir al aumentar el Porcentaje de Irregularidad ($\sigma_i \geq .7$), hasta alcanzar .0 segundos o . intervalos en los ensayos más irregulares ($\sigma = .7$).

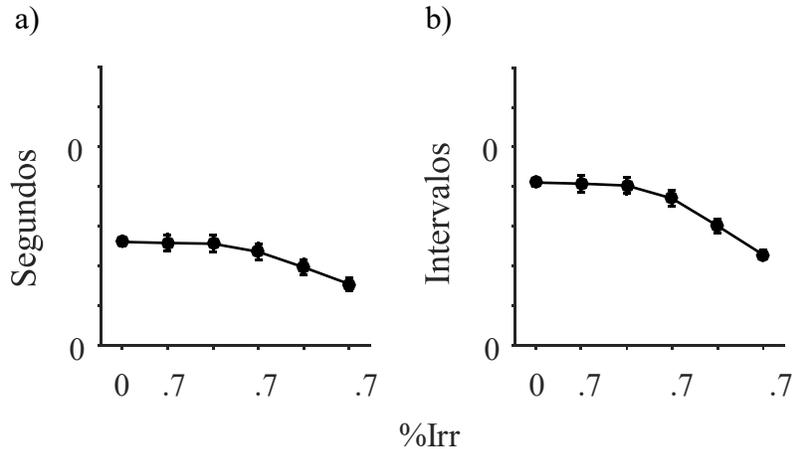


Figura 13. Función cronométrica de la ejecución general. Promedio del tiempo de respuesta en unidades de segundo (a) e intervalo (b) en función del Porcentaje de Irregularidad de los estímulos. Número de ensayos por punto: $n_{\sigma=0} = 11070$; $n_{\sigma_i>0} = 2214$. Las barras de error estándar se multiplicaron por diez (a) y por cinco (b).

En suma, las funciones psicométrica y cronométrica de la ejecución general muestran un aumento en la proporción de respuestas “Irregular” y una disminución del tiempo promedio de respuesta a medida que aumenta el Porcentaje de Irregularidad de los estímulos. Sin embargo, las tendencias de ambas funciones son relativamente asimétricas entre los valores de irregularidad. Específicamente, los estímulos Regulares junto a los dos menos Irregulares ($\sigma_i < 6.7$) produjeron pocos cambios en la proporción de respuestas “Irregular” (cuyos valores parecen afectados por una tasa alta de falsas alarmas) y en el tiempo promedio necesario para emitir la respuesta, siendo estos tiempos los más altos encontrados en la ejecución. En contraste, los estímulos más Irregulares ($\sigma_i \geq .7$) generaron cambios más notables en la ejecución, aumentando más rápidamente la probabilidad de identificar correctamente los estímulos como “Irregular” y requiriendo para ello en promedio una menor cantidad de tiempo.

8.1.2. EJECUCIÓN POR MODALIDAD SENSORIAL

La literatura sobre percepción de intervalos ha reportado consistentemente diferencias de sensibilidad entre los sistemas auditivo y visual, siendo en general, el sistema auditivo más sensible que el visual para medir intervalos. Sin embargo, para tener un panorama más completo

es necesario conocer la sensibilidad de otros sistemas de entrada de información con alta resolución temporal, por este motivo, incluimos la posibilidad de comparar la ejecución frente a estímulos Auditivos, Táctiles y Visuales.

Separamos los datos de acuerdo a la Modalidad Sensorial en que se presentaron los ensayos y seguimos el enfoque de análisis descrito antes para la ejecución general. La figura 14 muestra la ejecución promedio de los participantes, incluyendo la proporción de respuestas “Irregular” (Figura a) y el promedio de tiempo de respuesta: en unidades de segundo (Figura 14b) e intervalo (Figura 14c); en función del Porcentaje de Irregularidad, y separando las funciones de acuerdo a la Modalidad Sensorial de los ensayos.

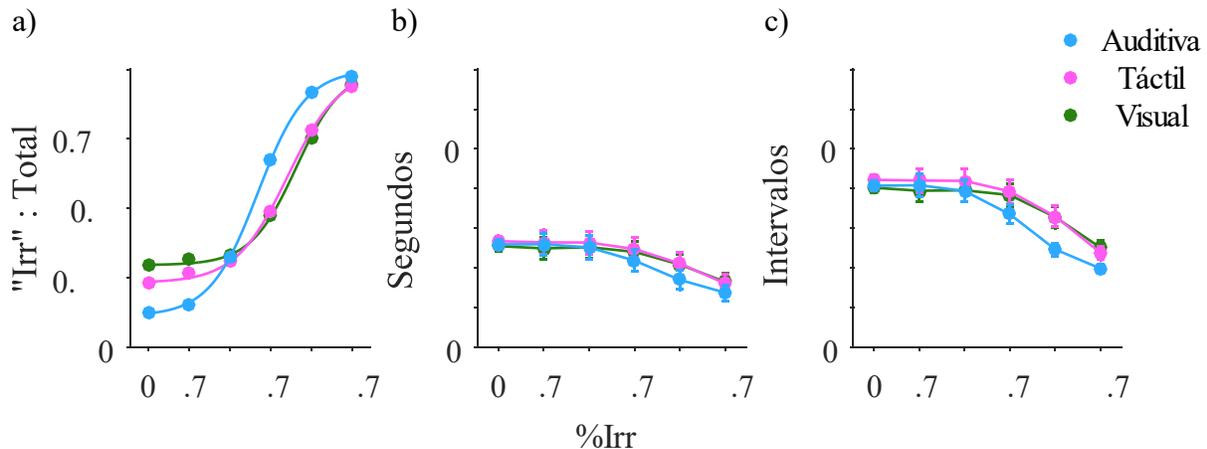


Figura 14. Funciones psicométricas y cronométricas de la ejecución por Modalidad Sensorial. Ajuste logístico a la proporción de respuestas “Irregular” en función del Porcentaje de Irregularidad para cada Modalidad Sensorial de los estímulos (a). Promedio del tiempo de respuesta en unidades de segundo (b) e intervalo (c) en función del %Irr para cada Modalidad Sensorial de los estímulos. Número de ensayos por punto: $n_{\sigma=0} = 3690$; $n_{\sigma>0} = 738$. Las barras de error estándar se multiplicaron por ocho (b) y por cuatro (c).

Igual que la tendencia descrita para la ejecución general, las tres modalidades sensoriales muestran un incremento en la proporción de respuestas “Irregular” en función del Porcentaje de Irregularidad (Figura 14a); lo que implica que, a mayor variabilidad en la duración de los intervalos dentro del estímulo, mayor probabilidad de identificarlo como “Irregular”, en cualquiera de las modalidades sensoriales.

Sin embargo, existen diferencias interesantes en las tendencias particulares de cada modalidad. Las funciones psicométricas parecen reiterar que existen diferencias entre la modalidad Auditiva y la Visual, mientras que la modalidad Táctil mostró mayor semejanza con el sistema visual que con el auditivo.

Los valores óptimos de los parámetros obtenidos con el ajuste logístico a las funciones psicométricas respaldan esta observación. La función psicométrica Auditiva está centrada ligeramente por debajo ($\alpha_A = 5.36$) de la magnitud intermedia de irregularidad ($\sigma = .7$) y difiere de las funciones Táctil y Visual, que están centradas en puntos muy similares entre sí ($\alpha_T = 8.94$, $\alpha_V = 0$) pero por encima de la magnitud intermedia de irregularidad ($\sigma = .7$).

Las tres modalidades sensoriales presentaron tasas de falsas alarmas altas y relativamente diferentes entre sí (Figura 14). Los ajustes indicaron que la modalidad Auditiva tiene la menor probabilidad ($\gamma_A = 0$) de emitir, erróneamente, respuestas “Irregular” frente a estímulos que carecen de irregularidad (Regulares, $\sigma = 0$). Este tipo de error incrementó cuando el estímulo se presentó en la modalidad Táctil ($\gamma_T = 0$) y fue aún mayor en la modalidad Visual ($\gamma_V = 0.3$). Los errores por omisión de la señal de irregularidad frente a los estímulos más irregulares en la tarea ($\sigma = .7$) fueron menos frecuentes y más similares entre sí. Podemos destacar que la modalidad Auditiva presentó, de nuevo, la tasa más baja de este tipo de error (0.02), seguida de la Visual (0.05) y la Táctil (0.06).

En relación al tiempo usado por los participantes para emitir una respuesta (Figuras 14b, 14c), las tres modalidades sensoriales mostraron una tendencia similar a la descrita para la ejecución general. Para todas ellas, el tiempo de respuesta promedio es relativamente alto y muy similar entre sí, frente a los estímulos con menor Porcentaje de Irregularidad ($\sigma_i < 6.7$), pero disminuye a medida que incrementa el Porcentaje de Irregularidad de los estímulos más irregulares ($\sigma_i \geq .7$). Este último efecto es particularmente pronunciado en la modalidad Auditiva, donde el tiempo de respuesta promedio alcanza los valores más bajos (2.76 segundos o .7 intervalos frente a $\sigma = .7$).

La ejecución muestra que para las tres modalidades ocurre un aumento en la proporción de respuestas “Irregular” y una disminución del promedio de tiempo de respuesta a medida que aumenta el Porcentaje de Irregularidad de los estímulos. Como se esperaba, la ejecución bajo la

modalidad Auditiva mostró, en comparación con los otros dos sistemas, mayor sensibilidad para identificar la irregularidad de los estímulos, usando una menor cantidad de tiempo cuando éstos fueron más irregulares. Aunque esperábamos que la ejecución bajo la modalidad Táctil fuera relativamente intermedia a la Auditiva y Visual, los datos mostraron importantes similitudes de ésta con la modalidad Visual.

8.1.3. EJECUCIÓN POR DURACIÓN MEDIA

Dada la estructura temporal aleatoria de los estímulos en la tarea nos preguntamos si la ejecución de los participantes conservaría la expresión de la propiedad escalar (Buhusi & Meck 2005) ampliamente reportada en la literatura con intervalos únicos. Separamos los datos de acuerdo a la Duración Media usada para generar los intervalos en los ensayos (300 ms, 600 ms y 1200 ms) y seguimos el enfoque de análisis descrito antes para la ejecución general y Modalidad Sensorial. La figura 12 muestra la ejecución promedio de los participantes. Esto incluye la proporción de respuestas “Irregular” (Figura a) y el promedio de tiempo de respuesta en unidades de segundo (Figura 15b) e intervalo (Figura 15c), en función del Porcentaje de Irregularidad y separando las funciones de acuerdo a la Duración Media de los ensayos.

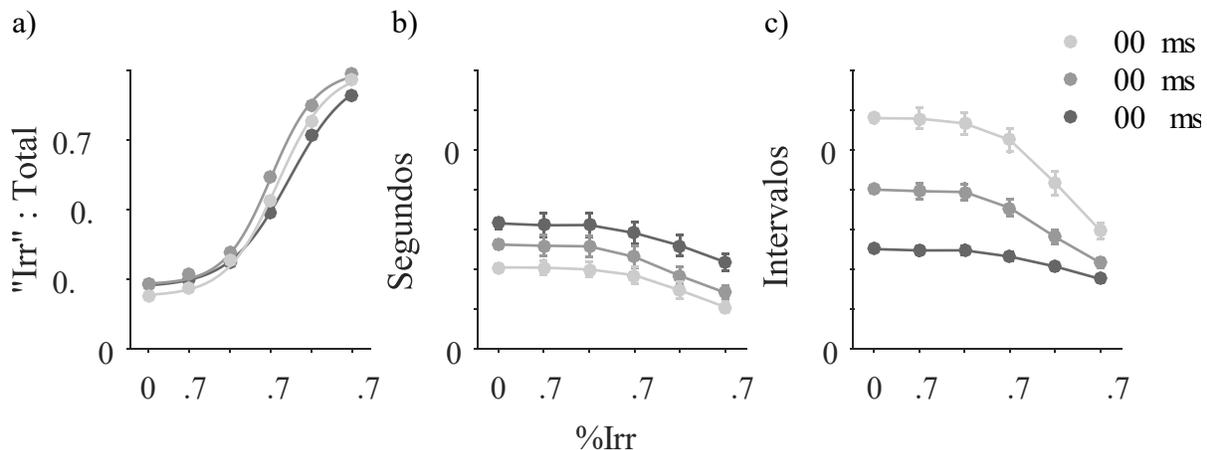


Figura 15. Funciones psicométricas y cronométricas de la ejecución por Duración Media. Ajuste logístico a la proporción de respuestas “Irregular” en función del Porcentaje de Irregularidad para cada Duración Media de los estímulos (a). Promedio del tiempo de respuesta en unidades de segundo (b) e intervalo (c) en función del Porcentaje de Irregularidad y para cada Duración

Media de los estímulos. Número de ensayos por punto: $n_{\sigma=0} = 3690$; $n_{\sigma>0} = 738$. Las barras de error estándar se multiplicaron por ocho (b) y por cuatro (c).

La proporción de respuestas “Irregular” incrementa en función del Porcentaje de Irregularidad (Figura 15a) para las tres duraciones media evaluadas en la tarea. En comparación con la Modalidad Sensorial, la separación por Duración Media de los estímulos muestra menos y más sutiles diferencias entre funciones psicométricas. Los valores óptimos de los parámetros encontrados con el ajuste logístico indican que las tres funciones se centran por encima de la magnitud intermedia de irregularidad ($\sigma = .7$) y que sus valores varían poco entre sí, apareciendo (de izquierda a derecha) primero la función con Duración Media 00 ms ($\alpha_{600} = .7$), seguida de la de 00 ms ($\alpha_{300} = 7.$) y la de 00 ms ($\alpha_{1200} = 9.17$).

Los ensayos de las tres duraciones media evaluadas presentaron tasas de falsas alarmas altas pero semejantes entre sí. Los ajustes logísticos indicaron que los ensayos con Duración Media de 00 ms tienen la menor probabilidad ($\gamma_{300} = 0.19$) de generar falsas alarmas, seguidos de aquellos con Duración Media 00 ms ($\gamma_{1200} = 0.$) y 00 ms ($\gamma_{600} = 0.23$). Las tasas de errores por omisión frente a los estímulos más irregulares en la tarea ($\sigma = .7$) fueron menores que las tasas de falsas alarmas. Frente a estímulos con Duración Media 600 ms la tasa de errores por omisión fue la más baja (0.01), seguida de aquellos con Duración Media 300 ms (0.03) y 1200 ms (0.09).

Para los ensayos de las tres duraciones media, el tiempo que los participantes usaron para emitir su respuesta (Figuras 15b, 15c) conserva la tendencia general descrita antes para la ejecución general y para las diferentes modalidades sensoriales. Específicamente, el tiempo promedio de respuesta para cada Duración Media es relativamente alto y muy similar frente a los estímulos con menor Porcentaje de Irregularidad ($\sigma_i < 6.7$), pero disminuye a medida que incrementa el Porcentaje de Irregularidad de los estímulos más irregulares ($\sigma_i \geq .7$).

Para analizar las particularidades del efecto de la Duración Media sobre el tiempo de respuesta, resultó especialmente útil observar tanto las unidades de segundo como su transformación en unidades de intervalo. Las tendencias de tiempo de respuesta en unidades de segundo (Figura 15b) conservan formas similares entre sí, pero aumentan proporcionalmente en

función de la Duración Media de los intervalos en los estímulos. En unidades de intervalo (Figura 15c), el efecto es opuesto: los participantes usaron menos intervalos para responder a los estímulos mientras la Duración Media de sus intervalos era mayor. A esto último se debe agregar que las tendencias en unidades de intervalo presentaron mayores diferencias entre sí: reduciendo de manera más abrupta el promedio de los tiempos de respuesta frente a los estímulos más irregulares ($\sigma_i \geq .7$) a medida que la Duración Media de intervalos fue menor.

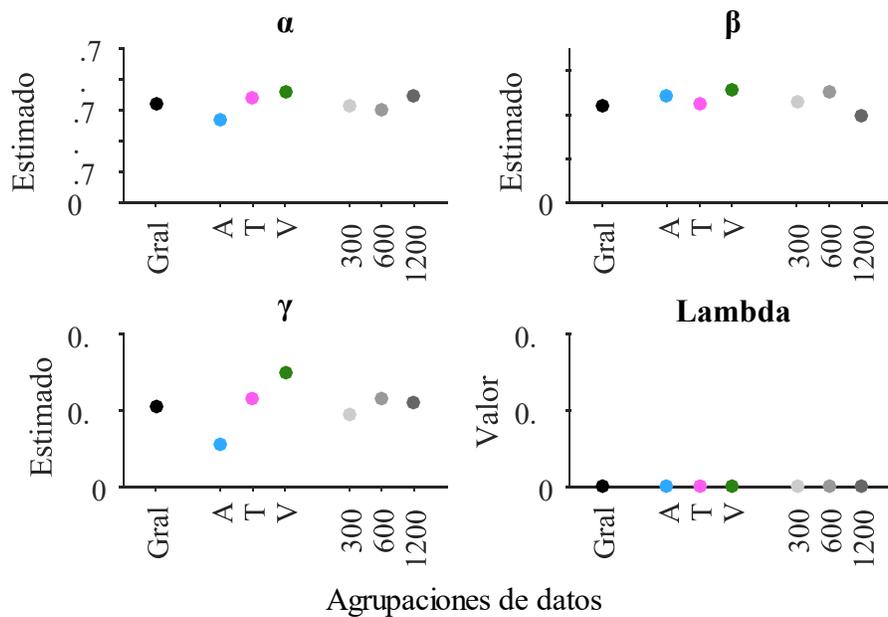


Figura 16. Parámetros para las agrupaciones por factores. Valores óptimos estimados de α , β , y γ , suponiendo que Lambda igual a 0, para las agrupaciones por niveles de cada factor evaluado con la tarea de detección de irregularidad. Gral: Ejecución general.

La figura 16 resume los valores óptimos de los parámetros α , β y γ (suponiendo que Lambda = 0) encontrados con el ajuste de la función logística para cada agrupación de datos. Estas agrupaciones distinguen la ejecución general y los respectivos niveles de los factores Modalidad Sensorial (de los pulsos) y Duración Media (de los intervalos).

8.1.4. EJECUCIÓN POR COMBINACIÓN DE FACTORES

Los principales efectos hasta ahorita descritos se reproducen de forma anidada sobre las agrupaciones que representan cada combinación posible entre los niveles de los factores Modalidad Sensorial y Duración Media. La figura 17 muestra las funciones psicométricas y cronométricas, además de los valores óptimos de los parámetros de las primeras, para cada agrupación.

En cada grupo se replica la observación general de incremento en la proporción de respuestas “Irregular” (Figura 7a) y disminución del tiempo promedio de respuesta (Figura 17b y 17c) a medida que aumenta el Porcentaje de Irregularidad de los estímulos.

La Modalidad Sensorial generó las diferencias más importantes entre las curvas psicométricas (Figura 17a). Los estímulos con pulsos presentados en la modalidad Auditiva, considerando cualquiera de las tres duraciones media, generaron curvas con parámetros α y γ menores que aquellas correspondientes de las modalidades Táctil y Visual. Esto quiere decir que la modalidad Auditiva mostró un umbral y una tasa de falsas alarmas menores que los producidos con las modalidades Táctil y Visual en cualquiera de las duraciones media de los estímulos.

La ausencia de diferencias notables por Duración Media, en cualquiera de las Modalidades Sensoriales, revela otro aspecto importante de la ejecución: la sensibilidad para detectar irregularidad en los estímulos es proporcional a la Duración Media de los mismos, o bien, el tamaño de las diferencias de duración entre intervalos debe ser mayor en los estímulos con Duración Media mayor, para que sean detectadas como irregularidad. Esto se observa claramente comparando la columna de desviación estándar (D.E.) en milisegundos de las distribuciones de diferente Duración Media en cada nivel de Porcentaje de Irregularidad (Tabla 2).

En las curvas cronométricas, la Duración Media produjo las diferencias más importantes: los tiempos de respuesta promedio aumentaron, en unidades de segundo (Figura 17b), pero disminuyeron, en unidades de intervalo (Figura 17c), a medida que aumentaba la Duración Media de los intervalos y casi sin importar la Modalidad Sensorial de los estímulos. El efecto de modalidad sensorial consistió en que los tiempos de respuesta, frente a estímulos Auditivos de

cualquier Duración Media, disminuyeran respecto a las otras dos modalidades cuando los estímulos eran más irregulares.

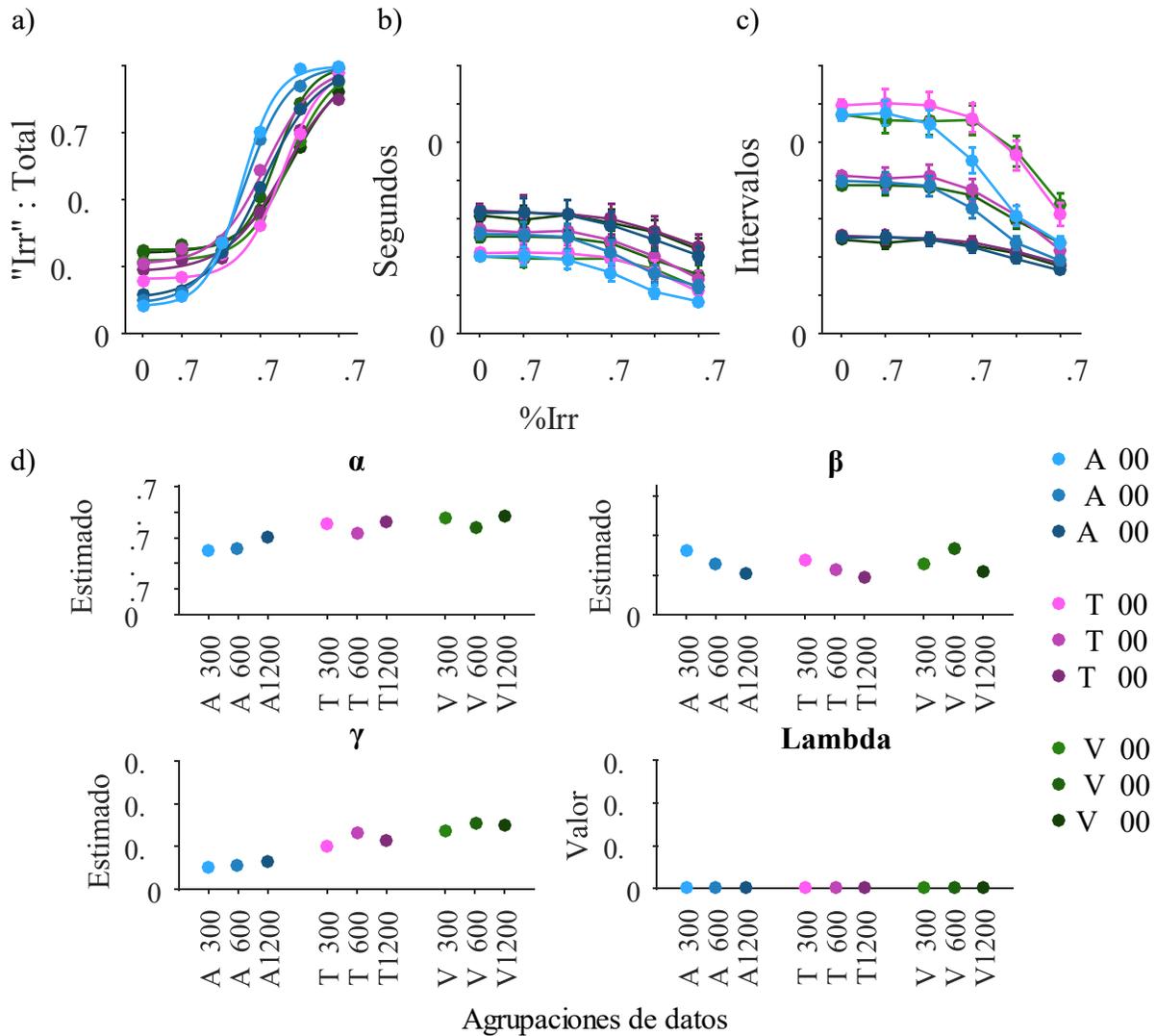


Figura 17. Funciones psicométricas, cronométricas y parámetros para las agrupaciones por combinación de factores. Ajuste logístico a la proporción de respuestas “Irregular” (a) y promedio del tiempo de respuesta en unidades de segundo (b) e intervalo (c) en función del Porcentaje de Irregularidad y para cada combinación posible entre los niveles de Modalidad Sensorial y Duración Media de los estímulos. Número de ensayos por punto: $n_{\sigma=0} = 1230$; $n_{\sigma>0} = 246$. Las barras de error estándar se multiplicaron por cuatro (b) y por dos (c). Valores óptimos estimados de α , β , y γ , suponiendo que Lambda igual a 0, para las agrupaciones por combinación entre niveles de cada factor evaluado con la tarea de detección de irregularidad (d).

8.2. EJECUCIÓN DEL MODELO

La segunda parte de los objetivos de este trabajo consiste en identificar reglas de operación que podrían determinar la elección de una respuesta (“Regular” o “Irregular”), en un tiempo de respuesta dado y partiendo de la información contenida en la estructura temporal del estímulo durante su presentación. Para ello diseñamos un modelo computacional que combina una medición de la estructura temporal de los estímulos, llamada aquí “evidencia” (ver sección “7. Construcción del modelo de decisión”), con parámetros adicionales para emular, ensayo a ensayo, la decisión perceptual de los participantes frente a la tarea.

Construimos el modelo para contrastar con el mismo diseño dos posibles estrategias de solución (la hipótesis de acumulación y la hipótesis de detección) manipulando únicamente el valor del parámetro λ . El diseño final (descrito en la sección 7) y los ajustes descritos a continuación se lograron combinando el mapeo sistemático del error producido por conjuntos de valores de parámetros y un método de optimización multivariable no lineal (“fmincon” en MATLAB). Lo que buscamos con estos métodos es la combinación de valores de los parámetros que optimicen el ajuste, o bien, que reduzcan mejor el error del modelo, que corresponde a la diferencia entre la ejecución de los participantes y la del modelo.

8.2.1. AJUSTE CON EL MODELO DE ACUMULACIÓN

La versión acumulativa del modelo supone fijar el valor de $\lambda = 0$, mientras buscamos los valores óptimos del resto de los parámetros. Al fijar de este modo el valor de λ , la variable de decisión Irregular se mantiene sobre el valor de evidencia que había acumulado hasta el final del intervalo anterior (Figura 10c) y permanece constante en ese valor hasta la siguiente entrada de información al final del intervalo actual. Así, la variable de decisión Irregular guarda e integra todas las entradas que el modelo recibe a favor de la respuesta “Irregular”.

Combinando los métodos de búsqueda que referimos más arriba encontramos que los valores óptimos de los parámetros del modelo en esta versión corresponden a $\mathbf{RS} = 0.231$; $\mathbf{m} = -0.468$; $\mathbf{UD} = 2.305$; fijando el valor de $\lambda = 0$. El error computado bajo la combinación de estos valores fue igual a 0.12.

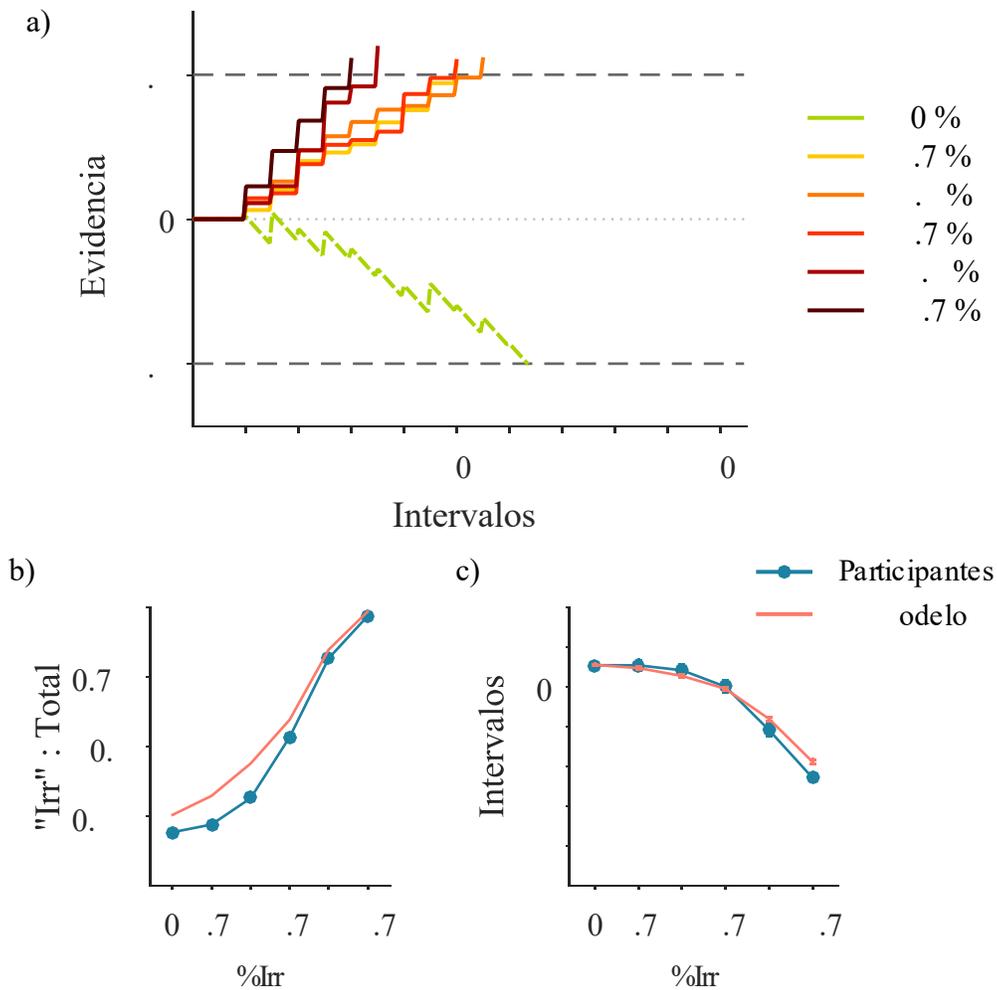


Figura 18. Respuesta del modelo de acumulación frente a ensayos individuales y ajuste a las respuestas y tiempos de respuesta promedio de los participantes. Ejecución del modelo de acumulación frente a ensayos tomados al azar dentro cada nivel de Porcentaje de Irregularidad. Para cada tipo de estímulo se muestra sólo la variable de decisión que alcanzó su respectivo umbral de decisión las líneas continuas representan variables de decisión “Irregular”, las líneas con guiones representan variables de decisión “Regular” (a). Comparación entre la ejecución del modelo con los parámetros encontrados y la ejecución de los participantes en términos de la curva psicométrica (b) y cronométrica (c).

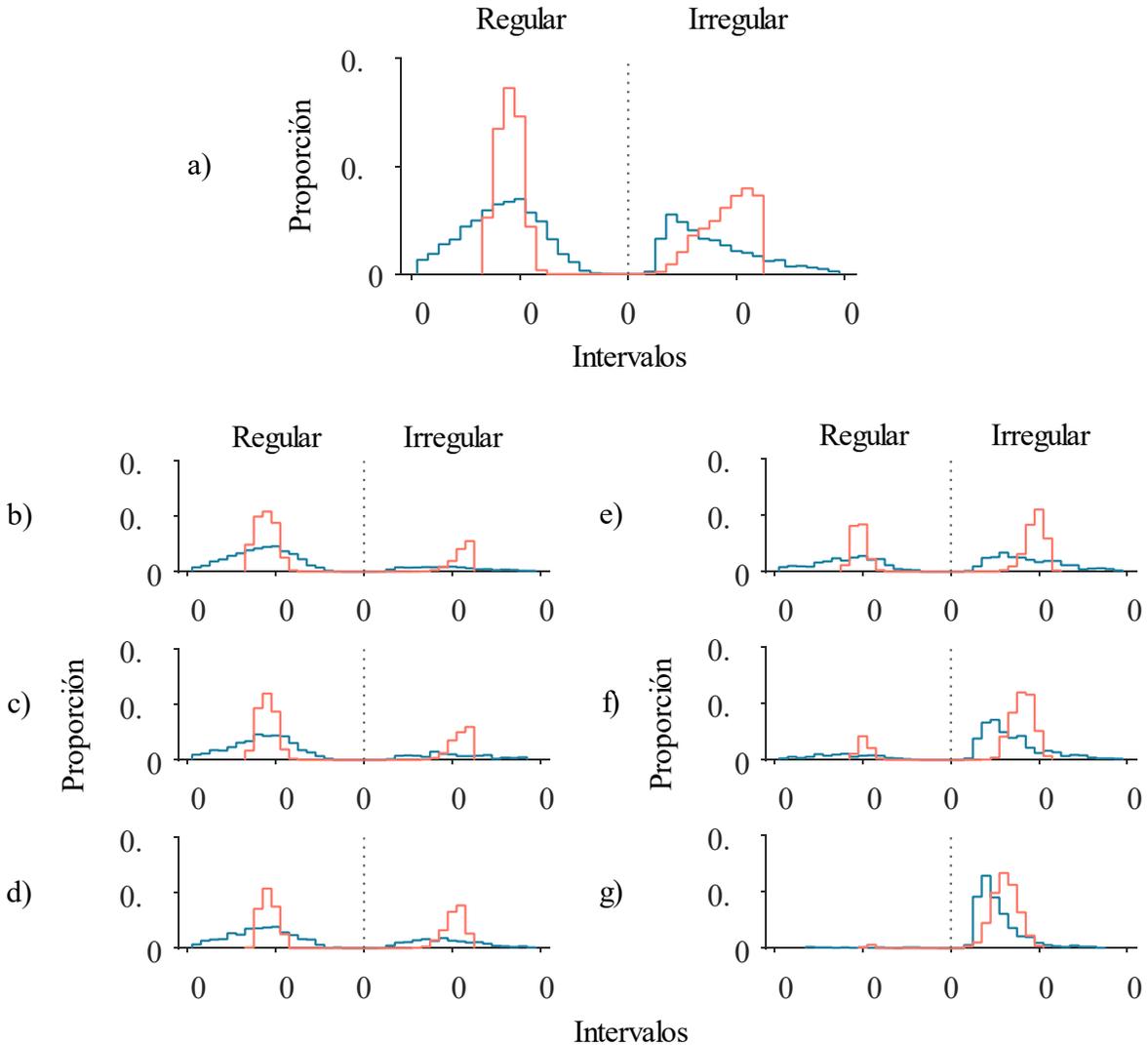


Figura 19. Ajuste del modelo de acumulación a la distribución de respuestas y tiempos de respuesta de los participantes. Comparación entre la distribución de respuestas (“Regular” en los valores negativos e “Irregular” valores positivos) y el tiempo de respuesta (intervalos) del modelo bajo los parámetros encontrados y la ejecución de los participantes, considerando todos los niveles de Porcentaje de Irregularidad (a). Separación de los datos por niveles de Porcentaje de Irregularidad: 0 % (b), 1.7 % (c), 3.3 % (d), 6.7 % (e), 13.3 % (f) o 26.7 % (g).

8.2.2. AJUSTE CON EL MODELO DE DETECCIÓN

La hipótesis contraria al modelo de acumulación supone que los participantes resolvieron la tarea usando una estrategia de detección (Figura 10d). El modelo de detección descarta el almacén e

integración de evidencia, de hecho, supone que existe una tasa alta de olvido tan grande que las respuestas “Irregular” sólo se alcanzarían a partir de una entrada positiva de tamaño tal que alcance ella sola el umbral de decisión.

Siguiendo los métodos de ajuste del modelo anterior, encontramos que los valores óptimos de los parámetros del modelo en esta versión corresponden a $RS = 0.432$; $m = -0.49$; $UD = 1.064$; fijando el valor de $\lambda = 5$. El error computado bajo la combinación de estos valores fue igual a 0.65.

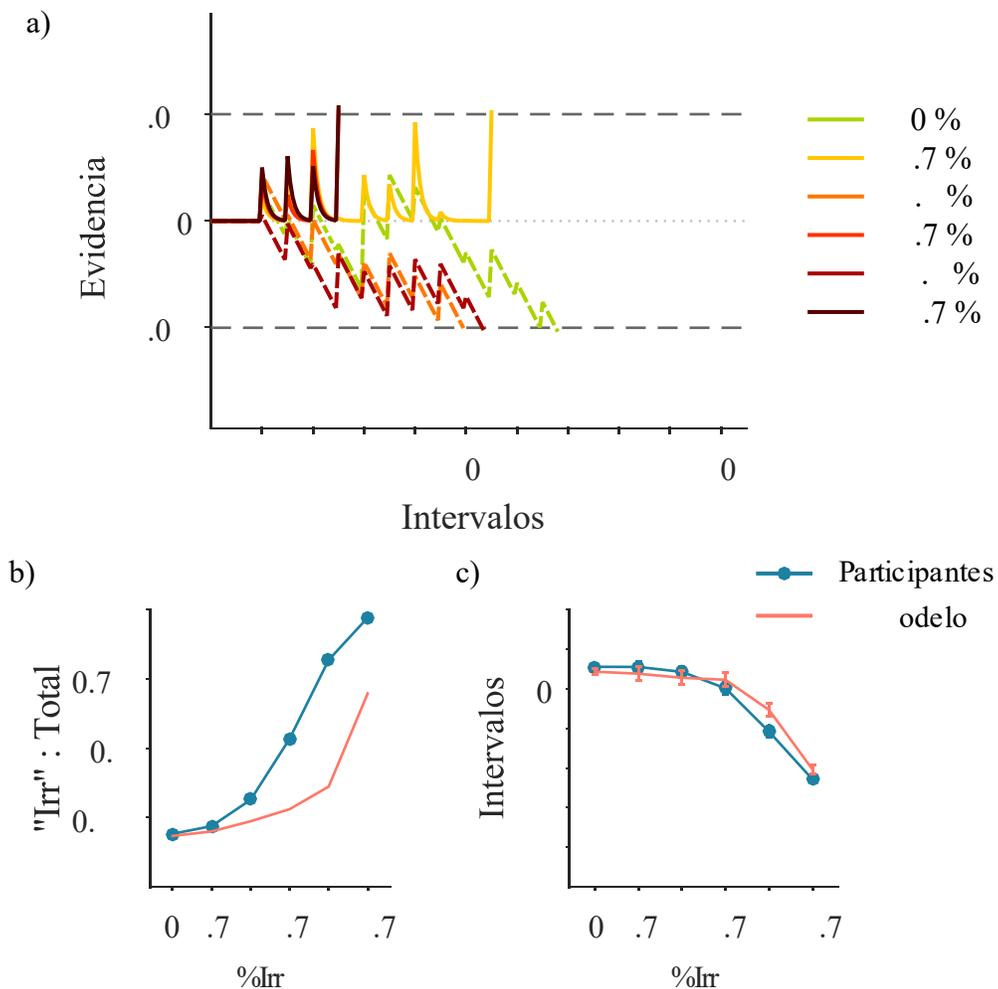


Figura 20. Ejecución del modelo de detección frente a ensayos individuales y ajuste a las respuestas y tiempos de respuesta promedio de los participantes. Ejecución del modelo de acumulación frente a ensayos tomados al azar dentro cada nivel de Porcentaje de Irregularidad.

Para cada tipo de estímulo se muestra sólo la variable de decisión que alcanzó su respectivo umbral de decisión las líneas continuas representan variables de decisión “Irregular”, las líneas con guiones representan variables de decisión “Regular” (a). Comparación entre la ejecución del modelo con los parámetros encontrados y la ejecución de los participantes en términos de la curva psicométrica (b) y cronométrica (c).

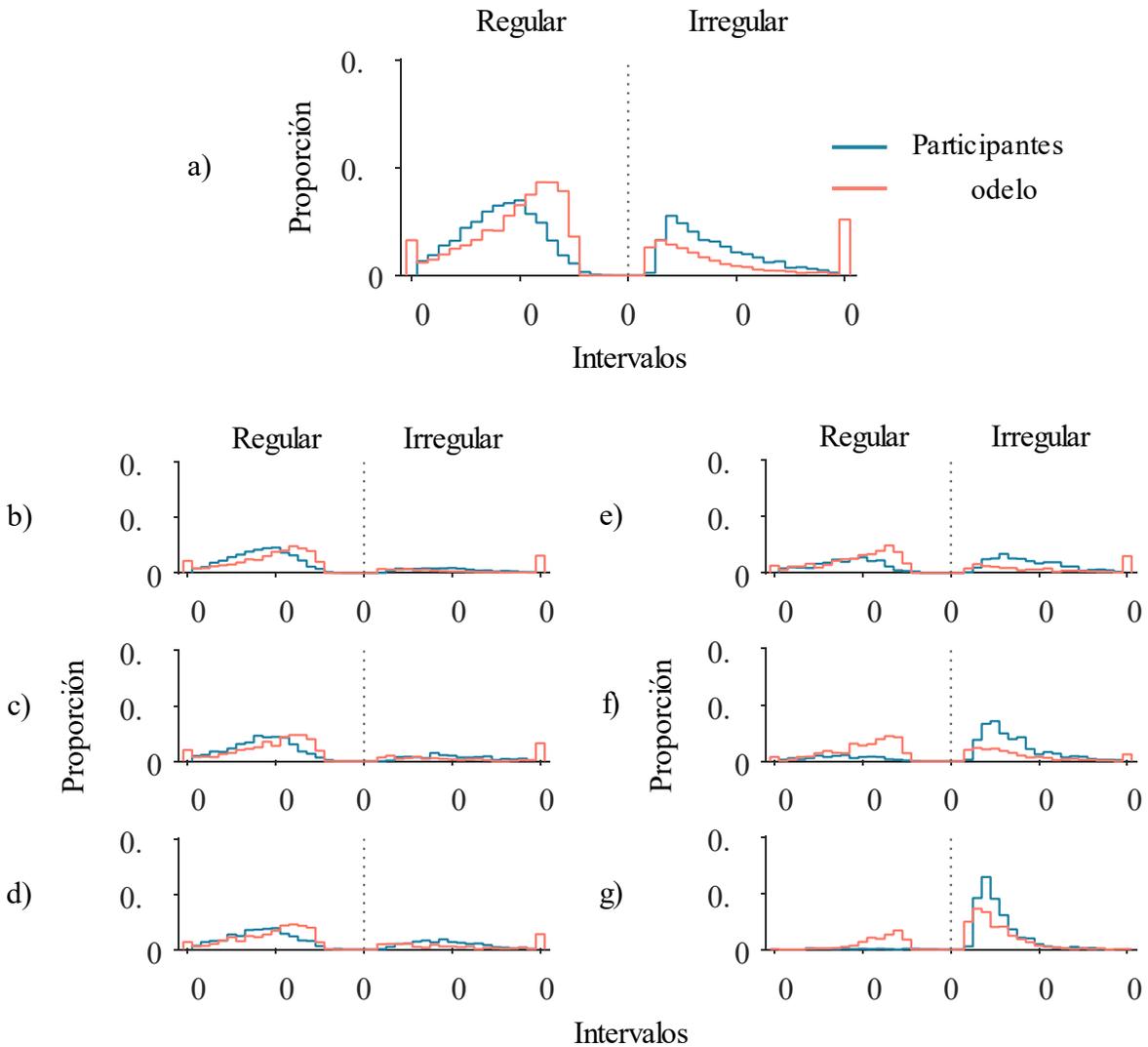


Figura 21. Ajuste del modelo de detección a la distribución de respuestas y tiempos de respuesta de los participantes. Comparación entre la distribución de respuestas (“Regular” en los valores negativos e “Irregular” valores positivos) y el tiempo de respuesta (intervalos) del modelo bajo los parámetros encontrados y la ejecución de los participantes, considerando todos los niveles de Porcentaje de Irregularidad (a). Separación de los datos por niveles de Porcentaje de Irregularidad: 0 % (b), 1.7 % (c), 3.3 % (d), 6.7 % (e), 13.3 % (f) o 26.7 % (g).

8.2.3. AJUSTE CON EL MODELO MIXTO

Encontramos que los valores óptimos de los parámetros del modelo en esta versión corresponden a $RS = 0.328$; $m = -0.448$; $UD = 1.529$ y $\lambda = 0.285$. El error computado bajo la combinación de estos valores fue igual a 0.08.

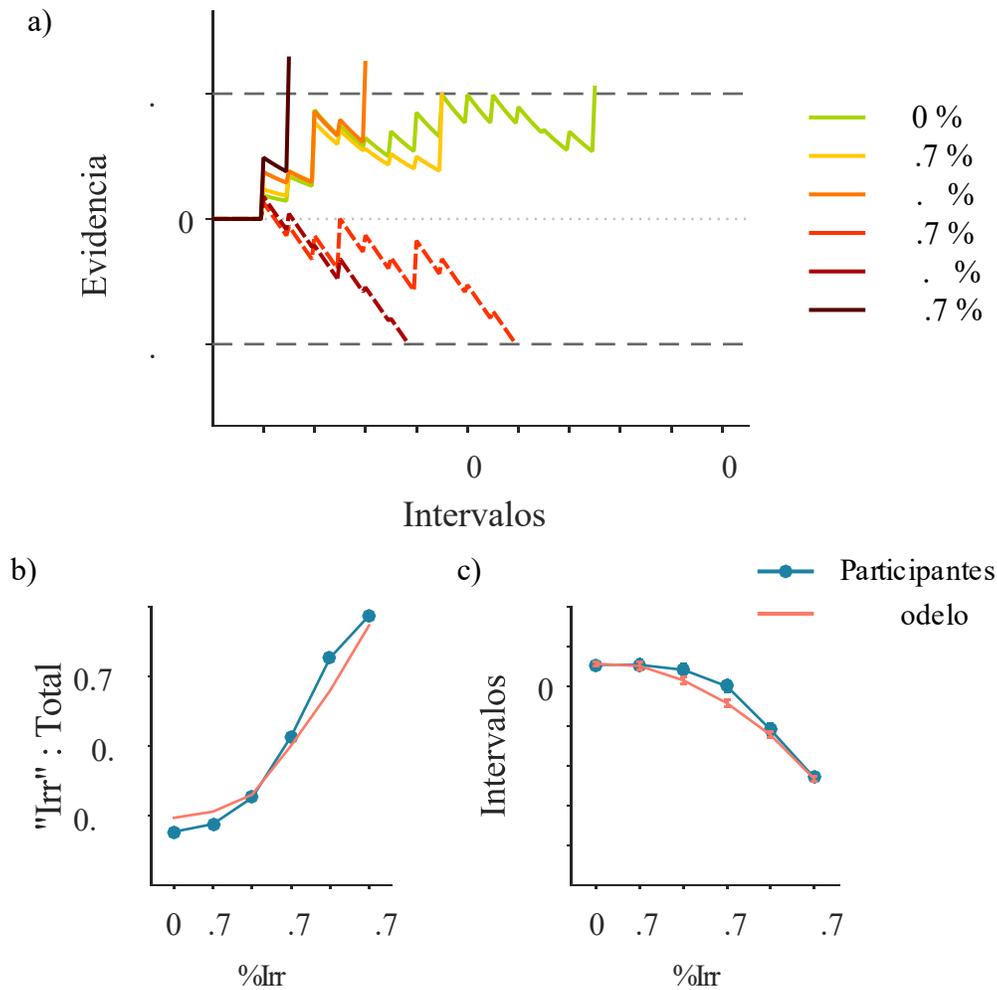


Figura 22. Ejecución del modelo mixto frente a ensayos individuales y ajuste a las respuestas y tiempos de respuesta promedio de los participantes. Ejecución del modelo de acumulación frente a ensayos tomados al azar dentro cada nivel de Porcentaje de Irregularidad. Para cada tipo de estímulo se muestra sólo la variable de decisión que alcanzó su respectivo umbral de decisión: las líneas continuas representan variables de decisión “Irregular”, las líneas con guiones representan variables de decisión “Regular” (a). Comparación entre la ejecución del modelo con los parámetros encontrados y la ejecución de los participantes en términos de la curva psicométrica (b) y cronométrica (c).

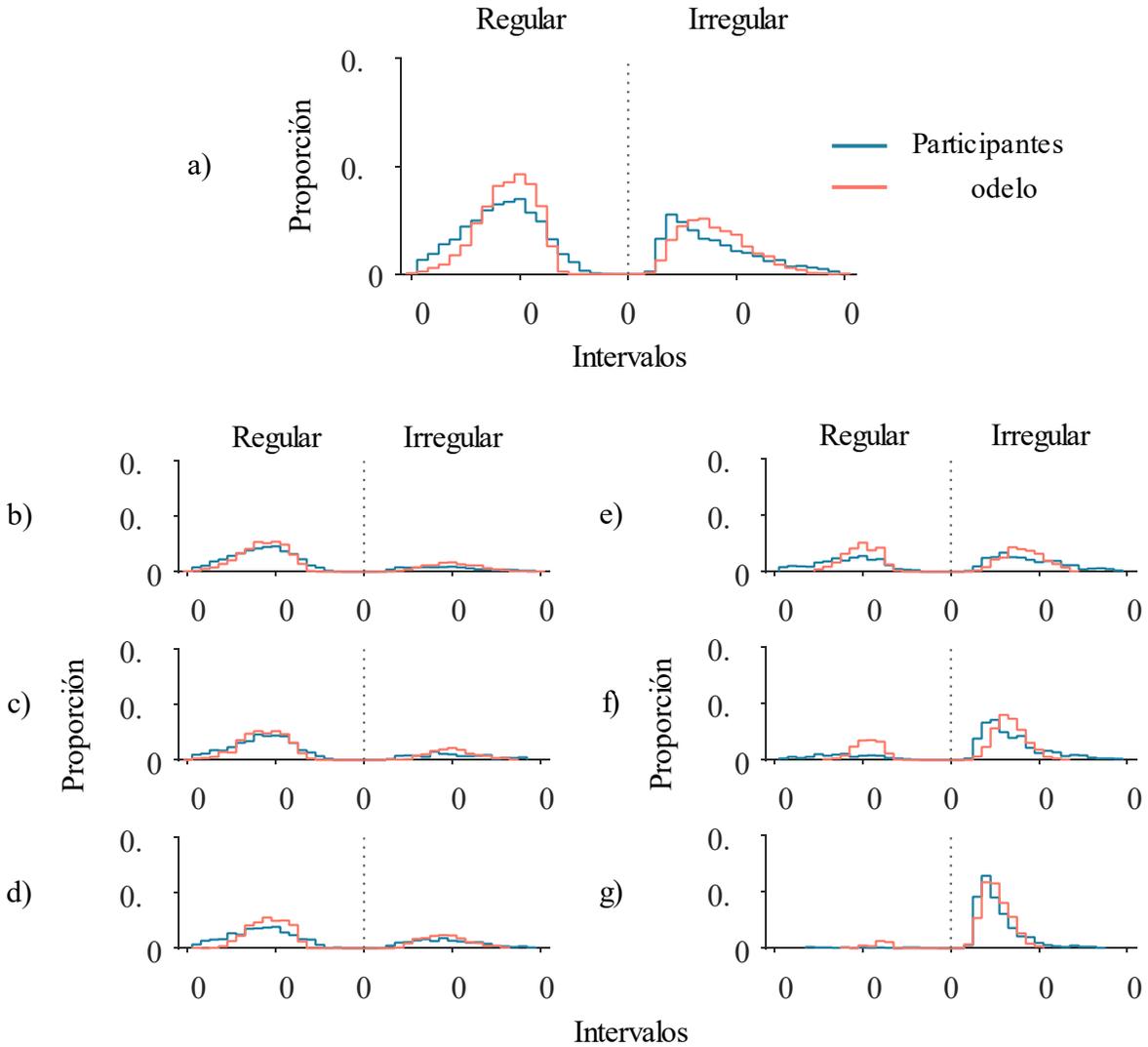


Figura 23. Ajuste del modelo mixto a la distribución de respuestas y tiempos de respuesta de los participantes. Comparación entre la distribución de respuestas (“Regular” en los valores negativos e “Irregular” valores positivos) y el tiempo de respuesta (intervalos) del modelo bajo los parámetros encontrados y la ejecución de los participantes, considerando todos los niveles de Porcentaje de Irregularidad (a). Separación de los datos por niveles de Porcentaje de Irregularidad: 0 % (b), 1.7 % (c), 3.3 % (d), 6.7 % (e), 13.3 % (f) o 26.7 % (g).

9. CONCLUSIÓN

Diseñamos y aplicamos una tarea de percepción de irregularidad para evaluar la sensibilidad que tienen participantes humanos para discriminar estímulos con estructuras temporales complejas como estímulos Regulares o Irregulares. El diseño experimental nos permitió evaluar también el efecto de la Modalidad Sensorial de los pulsos y la Duración Media de los intervalos de tiempo en los estímulos. Finalmente, construimos un modelo de procesamiento de información que integra evidencia de irregularidad a nivel de ensayos independientes con el fin de tratar de emular los procesos que un participante llevaría a cabo para emitir una respuesta en un tiempo dado frente a cada estímulo presentado.

Suponíamos que los mecanismos abocados a la percepción de intervalos únicos servirían también para identificar la regularidad o irregularidad de una estructura de información temporal más compleja como la de los estímulos de nuestra tarea. De ser esto cierto, esperábamos que la ejecución en la tarea replicara algunos de los efectos más consistentes dentro de la literatura de percepción de intervalos.

En primer lugar, tal como esperábamos, encontramos incrementos monotónicos en la identificación de los estímulos bajo la categoría de respuesta “Irregular” a medida que incrementó el Porcentaje de Irregularidad de los estímulos. Este patrón de respuesta se ajustó adecuadamente a una función logística continua, que permitió a su vez, estimar parámetros importantes para resumir y comparar la ejecución entre los distintos niveles incluidos en los factores Modalidad Sensorial y Duración Media, del diseño experimental.

De acuerdo con nuestras hipótesis y con la literatura sobre el tema, la sensibilidad para realizar discriminaciones de irregularidad en los estímulos fue mayor cuando éstos se presentaron en la modalidad Auditiva que cuando se presentaron en la modalidad Visual. A diferencia de lo que esperábamos, la modalidad Táctil presentó una sensibilidad por lo menos tan reducida como la de la modalidad Visual. Los tiempos de respuesta, coinciden con este patrón general: el sistema auditivo parece haber requerido menos tiempo para emitir las respuestas, especialmente frente a los estímulos más irregulares, que los sistemas táctil y auditivo. Es importante mencionar que los participantes no recibieron un entrenamiento especial en alguna de

las modalidades antes de ejecutar la tarea, de manera que los resultados no pueden ser atribuidos directamente a algún tipo de aprendizaje directo sobre los estímulos. Sin embargo, un aspecto a considerar es que no verificamos sistemáticamente la igualdad de intensidad en las propiedades de los estímulos que los hacían auditivos, visuales o táctiles. Si bien, los pulsos (que presentaban la aferencia directa a los sistemas sensoriales) tenían siempre la misma duración en todas las modalidades, no podemos asegurar que el volumen, la frecuencia de vibración o la luminosidad de los estímulos pudiera hacer que unos u otros fueran más o menos fáciles de procesar.

Por otro lado, corroboramos que, frente a estímulos con la forma de estructuras de información temporal compleja, se conserva la propiedad escalar, de manera que la sensibilidad del sistema utilizado para resolver la tarea es proporcional a la Duración Media de los intervalos que componen los estímulos. Los tiempos de respuesta parecen indicar que los participantes organizan su respuesta ponderando el costo por obtención de evidencias y las expectativas que crean sobre los momentos en que podrían para responder óptimamente.

Finalmente, el modelo de decisión, tal como lo programamos aquí parece emular de manera aceptable la ejecución promedio de los participantes, así como la distribución de respuestas en el tiempo. Resulta notable que el diseño del modelo permita evaluar la implementación de estrategias de ejecución opuestas al modificar solamente el valor de uno de sus parámetros. Sin embargo, el diseño mismo del modelo requiere evaluaciones más detalladas ya que resulta muy estrecha la diferencia de ajuste que permitió descartar la hipótesis de detección sobre la de acumulación.

REFERENCIAS

- Allan, L.G. (1979). The perception of time. *Perception & Psychophysics*, 26(5), 340-354. DOI: 10.3758/BF03204158
- Allan, L.G. (1998). The influence of scalar timing model on human timing research. *Behavioural Processes*, 44(2), 101-117. DOI: 10.1016/S0376-6357(98)00043-6
- Allman, M.J., Teki, S., Griffiths, T.D. & Meck, W.H. (2013). Properties of the internal clock: First- and second-order principles of subjective time. *Annual Review of Psychology*, 65, 743-771. DOI: 10.1146/annurev-psych-010213-115117
- Arstila, V. & Lloyd, D. (2014). Preface. En *Subjective time: The philosophy, psychology and neuroscience of temporality* (IX-XI). Cambridge, MA: MIT Press.
- Block, R.A. (1990). Models of psychological time (Chapter 1). En Block, R.A. (Ed.), *Cognitive models of psychological time* (1-35). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Block, R.A. (2003). Psychological timing without a timer: The roles of attention and memory. En Helfrich, H. (Ed.), *Time and mind II: Information processing perspectives* (41-59). Cambridge, MA: Hogrefe & Huber.
- Buhusi, C.V. & Meck, W.H. (2005). What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(10), 755-765. DOI: 10.1038/nrn1764
- Buhusi, C.V., Oprisan, S.A. & Buhusi, M. (2016). Clocks within clocks: timing by coincidence detection. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 8, 207-213. DOI: 10.1016/j.cobeha.2016.02.024
- Call, J. (2000). Representing space and objects in monkeys and apes. *Cognitive Science*, 24(3), 397-422. DOI: 10.1016/S0364-0213(00)00024-0
- Cassenti, D.N. (2011). The intrinsic link between motor behavior and temporal cognition. *New ideas in Psychology*, 29(2), 72-79. DOI: 10.1016/j.newideapsych.2010.03.011

- Chater, N. & Brown, G.D.A. (1999). Scale invariance as a unifying psychological principle. *Cognition*, 69(3), B17-B24. DOI: 10.1016/S0010-0277(98)00066-3
- Dehaene, S. & Brannon, E.M. (2010). Space, time, and number: a Kantian research program. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(12) 517-519. DOI: 10.1016/j.tics.2010.09.009
- Di Luca, M. & Rhodes, D. (2016) Optimal perceived timing: integrating sensory information with dynamically updated expectations. *Scientific Reports*, 6, 28563. DOI: 10.1038/srep28563
- Díaz, J.L.G. (2011). Cronofenomenología: El tiempo subjetivo y el reloj elástico. *Salud Mental*, 34(4), 379-389.
- García-Pérez, M.A. (2014). Does time ever fly or slow down? The difficult interpretation of psychophysical data on time perception. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(415), 1-19. DOI: 10.3389/fnhum.2014.00415
- Gibbon, J. (1991). Origins of scalar timing. *Learning and Motivation*, 22(1-2), 3-38. DOI: 10.1016/0023-9690(91)90015-Z
- Gibbon, J. (77). Scalar expectancy theory and Webber's law in animal timing. *Psychological Review*, 84(3), 279-325. DOI: 10.1037/0033-295X.84.3.279
- Grondin, S., Meilleur-Wells, G., Ouellette, C. & Macar, F. (1998). Sensory effects on judgments of short time intervals. *Psychological Research*, 61(4), 261-268. DOI: 10.1007/s004260050030
- Grondin, S. (2012). Violation of the scalar property for time perception between 1 and 2 seconds: Evidence from interval discrimination, reproduction, and categorization. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(4), 880-890. DOI : 10.1037/a0027188
- Gruart, A., Delgado, J.M., Escobar, C. & Aguilar, R. (2002). *Los relojes que gobiernan la vida*. México: Fondo de Cultura Económica.

- Hastings, M.H., Maywood, E.S. & Brancaccio, M. (2018). Generation of circadian rhythms in the suprachiasmatic nucleus. *Nature Reviews Neuroscience*, 19(8), 453-469. DOI: 10.1038/s41583-018-0026-z
- Hawkins, G.E., Forstmann, B.U., Wagenmakers, E.J., Ratcliff, R., & Brown, S.D. (2015). Revisiting the Evidence for Collapsing Boundaries and Urgency Signals in Perceptual Decision-Making. *Journal of Neuroscience*, 35(6), 2476–2484. DOI:10.1523/jneurosci.2410-14.2015
- Helfrich, H. (2003). Preface. En Helfrich, H. (Ed.), *Time and mind II: Information processing perspectives* (xi-xiv). Cambridge, MA: Hogrefe & Huber.
- Hughes, H.C. (1999). *Sensory exotica: A world beyond human experience*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Ivry, R.B. (1996). The representation of temporal information in perception and motor control. *Current Opinion in Neurobiology*, 6(6), 851-857. DOI: 10.1016/S0959-4388(96)80037-7
- Keating, P. & King, A.J. (2015). Sound localization in a changing world. *Current Opinion in Neurobiology*, 35, 35-43. DOI: 10.1016/j.conb.2015.06.005
- Kingdom, F.A.A. & Prins, N. (2010). *Psychophysics. A practical introduction*. San Diego, CA, US: Elsevier Academic Press.
- Kopec, C.D. & Brody, C.D. (2010). Human performance on the temporal bisection task. *Brain and Cognition*, 74(3), 262-272. DOI: 10.1016/j.bandc.2010.08.006
- Kotz, S.A., Ravignani, A. & Fitch, W.T. (2018). The evolution of rhythm processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(10), 896-910. DOI: 10.1016/j.tics.2018.08.002
- López, F. (2012). Aprendizaje y control temporal: adquisición y transferencia (Capítulo 1). En Guilhardi, P., Menez, M. & López, F. (Eds.), *Tendencias en el estudio contemporáneo de la estimación temporal* (13-40). México: UNAM-Facultad de Psicología.

- Merchant, H. & de Lafuente, V. (2014). Introduction to the neurobiology of interval timing (Chapter 1). En Merchant, H. & de Lafuente, V. (Eds.), *Neurobiology of interval timing* (1-13). New York: Springer.
- Merchant, H., Zarco, W. & Prado, L. (2008). Do we have a common mechanism for measuring time in millisecond range? Evidence from multiple-interval timing task. *Journal of Neurophysiology*, 99(2), 939-949. DOI: 10.1152/jn.01225.2007
- Pang, K.C.H. & McAuley, J.D. (2003). Importance of frontal motor cortex in divided attention and simultaneous temporal processing (Chapter 14). En Meck, W.H. (Ed.), *Functional and neural mechanisms of interval timing*. USA: CRC Press LLC.
- Ortega, L., Guzmán-Martínez, E., Grabowecky, M. & Suzuki, S. (2014). Audition dominates vision in duration perception irrespective of salience, attention, and temporal discriminability. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 76(5), 1485-1502. DOI: 10.3758/s13414-014-0663-x
- Prins, N. & Kingdom, F.A.A. Palamedes: Matlab routines for analyzing psychophysical data. www.palamedestoolbox.org
- Prins, N. & Kingdom, F.A.A. (2018). Applying the model-comparison approach to test specific research hypotheses in psychophysical research using the Palamedes toolbox. *Frontiers in Psychology*, 9:1250. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.01250
- Purves, D., Augustine, G., Fitzpatrick, D., Hall, W., Lamantia, A., White, L. (2012). Sistema Auditivo (Capítulo 13). En *Neurociencia* (5ta ed.) (277-302). Madrid, España: Editorial Médica Panamericana.
- Rajendran, V.G. & Teki, S. (2016). Periodicity versus prediction in sensory perception. *The Journal of Neuroscience: The official journal of the Society of Neuroscience*, 36(28), 7343-7345.
- Rammsayer, T.H. (2003). Sensory and cognitive mechanisms in temporal processing elucidated by a model systems approach (Chapter 6). En H. Helfrich (Ed.), *Time and mind II: Information processing perspectives* (97-113). Cambridge, MA: Hogrefe & Huber.

- Rammsayer, T.H., Borner, N. & Troche, S.J. (2015). Visual-auditory differences in duration discrimination of intervals in the subsecond and second range. *Frontiers in psychology*, 6, 1626. DOI: 10.3389/fpsyg.2015.01626
- Roberts, W.A. (1998). Timing (Chapter 8). En *Principles of animal cognition* (241-265). New York, US: McGraw-Hill.
- Vonderschen, K. & Wagner, H. (2014). Detecting interaural time differences and remodeling their representation. *Trends in Neurosciences*, 37(5), 289-300. DOI: 10.1016/j.tins.2014.03.002
- Wearden, J. H. (1991). Do humans possess an internal clock with scalar timing properties? *Learning and Motivation*, 22(1-2), 59-83. DOI: 10.1016/0023-9690(91)90017-3
- Wearden, J.H., Todd, N.P.M. & Jones, L.A. (2006). When do auditory/visual differences in duration judgments occur? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(10), 1709-1724. DOI: 10.1080/17470210500314729
- Wolfe, J.M., Kluender, K.R., Levi, D.M., Bartoshuk, L.M., Herz, R.S., Lederman, S.J., & Merfeld, D.M. (2015). *Sensation & perception*. Sunderland, MA: Sinauer Associates.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1</i>	Descripción de los estímulos en la tarea de percepción de irregularidad.	22
<i>Figura 2</i>	Diferencia entre los estímulos regulares e irregulares.	22
<i>Figura 3</i>	Presentación de ensayos en distintas modalidades sensoriales.	25
<i>Figura 4</i>	Curvas con distribución normal para cada combinación de los parámetros μ y σ .	28
<i>Figura 5</i>	Secuencia de eventos que componen un ensayo.	30
<i>Figura 6</i>	El mensaje de retroalimentación.	31
<i>Figura 7</i>	Distribución de las combinaciones de ensayos en una sesión experimental.	33
<i>Figura 8</i>	Evidencia calculada a partir de la duración de los intervalos en un estímulo.	36
<i>Figura 9</i>	Elementos de la representación gráfica del modelo de decisión.	38
<i>Figura 10</i>	Operación del modelo de decisión y los efectos sobre las variables de decisión.	40
<i>Figura 11</i>	Proporción de respuestas “Irregular” en función del Porcentaje de Irregularidad de los estímulos.	44
<i>Figura 12</i>	Función psicométrica de la ejecución general.	45
<i>Figura 13</i>	Función cronométrica de la ejecución general.	46
<i>Figura 14</i>	Funciones psicométricas y cronométricas de la ejecución por Modalidad Sensorial.	47
<i>Figura 15</i>	Funciones psicométricas y cronométricas de la ejecución por Duración Media.	49
<i>Figura 16</i>	Parámetros para las agrupaciones por factores.	51
<i>Figura 17</i>	Funciones psicométricas, cronométricas y parámetros para las agrupaciones por combinación de factores.	53
<i>Figura 18</i>	Respuesta del modelo de acumulación frente a ensayos individuales y ajuste a las respuestas y tiempos de respuesta promedio de los participantes.	55
<i>Figura 19</i>	Ajuste del modelo de acumulación a la distribución de respuestas y tiempos de respuesta de los participantes.	56

<i>Figura 20</i>	Respuesta del modelo de detección frente a ensayos individuales y ajuste a las respuestas y tiempos de respuesta promedio de los participantes.	57
<i>Figura 21</i>	Ajuste del modelo de detección a la distribución de respuestas y tiempos de respuesta de los participantes.	58
<i>Figura 22</i>	Respuesta del modelo mixto frente a ensayos individuales y ajuste a las respuestas y tiempos de respuesta promedio de los participantes.	59
<i>Figura 23</i>	Ajuste del modelo mixto a la distribución de respuestas y tiempos de respuesta de los participantes.	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	<i>Condiciones sensoriales de los eventos en los estímulos.</i>	26
Tabla 2	<i>Descriptivos de las distribuciones de duración de los intervalos.</i>	29
Tabla 3	<i>Factores y niveles incluidos en el diseño experimental.</i>	33