



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE CIENCIAS**

Estudio psicofísico de la capacidad para discriminar  
estímulos táctiles y auditivos en humanos

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**B I Ó L O G A**

PRESENTA:

Leidy Ana Ortiz Colín

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Luis Alonso Lemus Sandoval



2010



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

FACULTAD DE CIENCIAS  
Secretaría General  
División de Estudios Profesionales

Votos Aprobatorios

ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ  
Jefe de la División de Estudios Profesionales  
Facultad de Ciencias  
**Presente**

Por este medio hacemos de su conocimiento que hemos revisado el trabajo escrito titulado:

"Estudio psicofísico de la capacidad para discriminar estímulos táctiles y auditivos en humanos".

realizado por **Ortiz Colín Leidy Ana** con número de cuenta **0-9609895-6** quien ha decidido titularse mediante la opción de tesis en la licenciatura en **Biología**. Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Propietario Dr. Julio Roque Morán Andrade

Propietario Dr. José Fernando Peña Ortega

Propietario Tutor Biol. Luis Alonso Lemus Sandoval

Suplente M. en C. Enrique Moreno Saenz

Suplente M. en C. Julio Alejandro Prieto Sagredo

Atentamente,

"POR MI RAZA HARÁ EL ESPÍRITU"

Ciudad Universitaria, D. F., a 19 de noviembre de 2008

EL COORDINADOR DEL COMITÉ ACADÉMICO DE LA LICENCIATURA EN BIOLOGÍA

DR. PEDRO GARCÍA BARRERA

Señor sinodal: antes de firmar este documento, solicite al estudiante que le muestre la versión digital de su trabajo y verifique que la misma incluya todas las observaciones y correcciones que usted hizo sobre el mismo.

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en especial a la Facultad de Ciencias a la que debo mi formación profesional y parte de mi admiración y respeto por la naturaleza.

Al Dr. Ranulfo Romo Trujillo por su apoyo durante mi estancia en el laboratorio y por facilitarme los recursos materiales para realizar este proyecto.

Al Dr. Luis Alonso Lemus Sandoval por permitirme vivir y aprender de esta valiosa experiencia.

A los Dres. Adrián Hernández y Antonio Zainos por su disposición y contribución al elaborar este proyecto.

A los miembros del jurado: Enrique Moreno, Fernando Peña, Julio Moran y Julio Prieto por sus sugerencias, apoyo y paciencia en la revisión de este trabajo.

Al Ing. Alejandro Dávila Mérida, Ing. Manuel Álvarez López y a la Biol. Ana Vianey Rivera Santamaría por su asesoría para la programación del análisis estadístico.

A cada uno de mis compañeros de laboratorio, que durante mi permanencia en él me apoyaron y me guiaron.

A Dios por bendecirme a cada instante.

A Papá y Mamá por haber cambiado el rumbo de mi vida, darme tanto amor y dejarme el más bello de los recuerdos. Aún los extraño mucho.

A mis padres: Alfredo y Lucina, les ofrezco este logro como prueba de que los amo y de lo que significan para mí, sin ustedes esto en ninguna de sus formas hubiera sido realidad.

A Jesús, mi hermano, mi amigo, mi confidente y la persona que le dio un nuevo significado a mi vida. ¡Gracias por existir!

Al mi grupito “Pangea” por llenar de felicidad e ilusión mi existencia.

A mis amigos: Adrián Hernández, Alberto Ríos (Riachuelo), Alma, Alimon, Arturo, Billy, Claudia, Daniel, Dulce, Efro, Ivonne, Jannet, Karen, Karla bonita, Lizeth (lisita), Lucía, mis tías consentidas (Chelo e Imelda, jeje), Miss Chayo, Mónica, Monoel, Paco, Román, Toño Zainos, Vianey, Viky, Xochíchezalli (Xo bonita) y Zaira; por TODOS aquellos momentos que hemos compartido, su apoyo incondicional, su confianza y por su cariño hacía mí. Este logro tiene un poquito de cada un@ de ustedes.

A Verito Chula, mi amiga, mi hermana por permitirme a través de su mirada, conocer el color de la esperanza.

A mi güerito Erik, he aquí la hija que nunca vamos a tener (jajaja) sin tú confianza, persistencia y cariño no existiría. ¡Gracias amigo!

A “La Tucita”

Ella está en el horizonte -dice Fernando Birri-. Me acerco dos pasos, ella se aleja dos pasos.  
Camino diez pasos y el horizonte se corre diez pasos más allá. Por mucho que yo camine,  
nunca la alcanzaré. ¿Para qué sirve la utopía? Para eso sirve: para caminar.

La dicha de la vida consiste en tener siempre algo que hacer, alguien a quien amar y alguna  
cosa que esperar.  
Thomas Chambers.

Saber que se pode, querer que se possa...  
D. Torres.

# ÍNDICE

	Página
I RESUMEN.....	1
II INTRODUCCIÓN.....	2
II.I Psicofísica.....	2
II.II Sistema somatosensorial.....	6
II.II.I Código neural y flutter somatosensorial.....	8
II.III Sistema auditivo.....	9
II.III.I Código neural y flutter auditivo.....	12
III PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
IV OBJETIVOS.....	14
V HIPÓTESIS.....	14
VI MÉTODOS.....	14
VI.I Tarea de discriminación.....	15
VI.II Análisis de datos.....	17
VII RESULTADOS.....	18
VII DISCUSIÓN.....	27
VIII.I Discriminación vs categorización.....	28
VIII.II Discriminación táctil f1 fijo vs f2 fijo.....	29
VIII.III Discriminación auditiva f1 fijo vs f2 fijo.....	30
VIII.IV Discriminación táctil vs auditivo.....	31
VIII.V Fracciones de Weber en el rango de flutter.....	31
IX CONCLUSIÓN.....	32
X LITERATURA CITADA.....	32

**Ortíz Colín, L. A. 2010. Estudio psicofísico de la capacidad para discriminar estímulos táctiles y auditivos en humanos. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.**

**I RESUMEN**

Los sistemas sensoriales son nuestro nexo con el ambiente (Fanjul *et al.*, 1998). La manera en que cada uno de ellos transduce, codifica e integra la información proveniente de los estímulos físicos, ha sido de gran interés en el campo de las neurociencias, ya que estos procesos explican el fenómeno de percepción. Mediante los experimentos que combinan métodos psicofísicos con técnicas de neurofisiología, ha sido posible descifrar la manera en que el sistema nervioso codifica la información sensorial (Romo *et al.*, 2002). Para ello se han estudiado distintas modalidades sensoriales, entre las que destaca el flutter. El flutter es una submodalidad sensorial que se produce al tocar un objeto que vibra en un rango de frecuencias entre 5 y 50 Hz (Romo *et al.*, 2003). Al discriminar un par de frecuencias de estímulos vibrotáctiles en el rango de flutter (5-50 Hz; Hernández *et al.*, 1997) la actividad eléctrica de las neuronas de la corteza somatosensorial primaria (S1) codifica la frecuencia de los estímulos y dicha actividad es capaz de explicar la conducta (Salinas *et al.*, 2000; Hernández *et al.*, 2000; Luna *et al.*, 2005). Algunos estudios realizados en el sistema auditivo, sugieren que la actividad de las neuronas en la corteza auditiva primaria (A1) codifica estímulos en el rango de flutter acústico (10-45 Hz, Bendor, 2007), y que dicha codificación es suficiente para explicar la conducta (Lemus *et al.*, 2009). Sin embargo, hasta la fecha no ha sido posible determinar si la capacidad para, discriminar estímulos vibrotáctiles y auditivos, ambos en el rango de flutter, es la misma. Esta tesis presenta los resultados obtenidos en estudios psicofísicos realizados por humanos durante la discriminación de estímulos táctiles y acústicos en el rango de flutter. Estos resultados permitieron saber si la capacidad de sujetos humanos al comparar las modalidades táctil y acústica es la misma.



## II INTRODUCCIÓN

### II.I Psicofísica

El fenómeno de percepción surge a partir de la detección y transformación de la energía de los estímulos en información útil para el cerebro (Shiffman, 2004). Pero ¿cómo pueden los estímulos producir percepción? Una aproximación al problema es mediante experimentos realizados con técnicas psicofísicas que permiten evaluar las respuestas ante una estimulación sensorial. La psicofísica se define como el estudio de la relación cuantitativa entre los estímulos ambientales y la percepción sensorial que generan (Shiffman, 2004).

El estudio de la psicofísica se enfoca principalmente al estudio de las funciones sensoriales, aunque también se ha utilizado para el estudio de procesos como la memoria (Kaernbach *et al.*, 2004). En este sentido, sus métodos se utilizan tanto para definir los límites en el funcionamiento de un sistema sensorial determinado (detección) como para determinar la capacidad de discriminación entre un par de estímulos (Maiche y Estaún, 2009; Bonet, 1994).

Ernest Weber durante el periodo de 1827 y 1831, realizó experimentos con distintas modalidades sensoriales, entre ellos destacan los referentes a la discriminación de peso y luminiscencia (Shiffman, 2004). Basándose en estos estudios, Weber formuló la relación matemática que existe entre la intensidad de los estímulos y la sensación producida por estos. Observó que el incremento o disminución que requiere un estímulo para ser percibido como diferente a otro, es proporcional a la magnitud absoluta del estímulo, estableciendo que *independientemente de sus magnitudes o intensidades físicas absolutas dos estímulos deben diferir en una proporción constante para que su diferencia sea perceptible*. A este postulado se le conoce como “fracciones de Weber”, expresándose a través de la siguiente fórmula:

$$\Delta I = I * k$$

Donde:

$\Delta I$  = valor del umbral diferencial (UD).

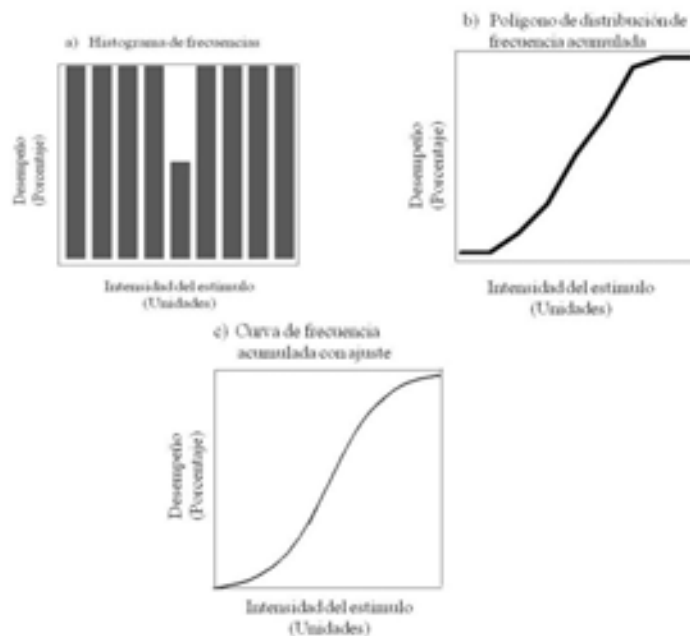
I = magnitud de la intensidad del estímulo con que se obtiene el umbral.

K = constante que varía en función de la modalidad sensorial estudiada. Ésta se determina por la proporción en la que deben diferir los estímulos para que su diferencia

física sea perceptible (Shiffman, 2004). Experimentalmente suele ser un valor fijo elegido arbitrariamente.

Esta ley junto con los avances en la investigación del sistema nervioso y de la percepción dio origen a la psicofísica. En 1860, Gustav Theodor Fechner definió la psicofísica como *la ciencia exacta de las relaciones funcionales o relaciones de dependencia entre el cuerpo y la mente*. Fechner desarrolló la teoría psicofísica basada en el concepto de umbral sensorial (Shiffman, 2004). La teoría del umbral asume que existen dos modalidades básicas de umbrales sensoriales: umbral absoluto (UA) y umbral diferencial (UD). Tanto el umbral absoluto como el umbral diferencial se consideran variables aleatorias asociadas a una función de distribución normal o gaussiana (Blanco, 1996). Ambos tipos de umbrales pueden presentar variaciones de acuerdo al sistema sensorial en estudio, a las condiciones experimentales y a las características propias de los sujetos (Blanco, 1996). Según Fechner, el supuesto de que el umbral sensorial se distribuye normalmente está justificado por la forma que toma la gráfica que relaciona la intensidad del estímulo con el desempeño del sujeto en experimentos de detección y de discriminación (Fechner, 1860). Los experimentos de detección consisten en presentar una serie de estímulos de diferente magnitud, donde los sujetos deben responder *si* cuando detectan el estímulo (Blanco, 1996). Las respuestas generadas durante una tarea de detección determinan el umbral absoluto (UA). El UA se define como la intensidad a la cual se detecta un estímulo en el 50 % de sus aplicaciones (Blanco, 1996). Al resolver de la tarea de discriminación, se obtiene el umbral diferencial (UD) El UD responde a la pregunta ¿cuál es la intensidad mínima que deben presentar entre sí dos estímulos para que la diferencia entre ellos sea perceptible? (Schiffman, 2004). En términos de probabilidad, un umbral diferencial es la diferencia que hay entre un estímulo base que al compararse con otro estímulo se considera mayor o menor el 75% de las veces (Blanco, 1996). Los experimentos de discriminación consisten en aplicar un par de estímulos separados uno del otro por un intervalo de tiempo (Blanco, 1996). Los sujetos perciben el primer estímulo y posteriormente lo comparan con el segundo estímulo, indicando sí perciben que el segundo es mayor o menor al primero (Blanco, 1996). Esto se obtiene por medio de una función psicométrica. En general, una función psicométrica es cualquier función que relacione la intensidad del estímulo y el rendimiento de un sujeto en una tarea psicofísica, en dónde el sujeto indica el porcentaje de respuestas positivas (Blanco, 1996). La gráfica

de esta función es una curva con forma de *S* alargada. Se construye representando en el eje de la *x* (abscisa) la intensidad del estímulo y en el eje de la *y* (ordenada) el porcentaje de aciertos (desempeño). La forma de *S* alargada muestra la relación entre una curva gaussiana y su correspondiente función de distribución acumulada (Blanco, 1996). En la Figura 1 se muestran las tres gráficas hipotéticas que se obtienen en una función psicométrica.



**Figura 1:** Gráficas que se obtienen en una función Psicométrica. a) El histograma de frecuencias representa la distribución normal del umbral sensorial, cuando los sujetos respondieron de manera acertada si el segundo estímulo era mayor, menor ó igual que el primero. b) El polígono de distribución de frecuencias acumuladas indica el porcentaje de veces en que los sujetos percibieron el segundo estímulo mayor que el primero. c) La curva de frecuencia acumulada con ajuste logístico, inicialmente, se basa en los resultados obtenidos en el polígono de frecuencia acumulada. El ajuste se obtiene aplicando una mayor cantidad de estímulos o empleando alguna ecuación para ajustar el valor de las respuestas.

Tanto la detección como la discriminación de estímulos son métodos psicofísicos diseñados para asignarles un valor objetivo a las percepciones (Schiffman, 2004). Su diseño experimental consiste en presentar una serie de estímulos que produzcan determinadas percepciones en los sujetos, los que a su vez, deben informar como las percibieron (Schiffman, 2004). En estos experimentos se presentan dos tipos de variables: variables subjetivas y variables objetivas. Las variables subjetivas son reportes de sensaciones que son inobservables e imposibles de medir mediante un aparato (Blanco, 1996). Los estímulos y las respuestas constituyen variables objetivas, porque son observables, fáciles de registrar y de medir a través de un aparato (Blanco, 1996). Los estímulos pueden ser, entre otros, visuales, térmicos, mecánicos o auditivos.

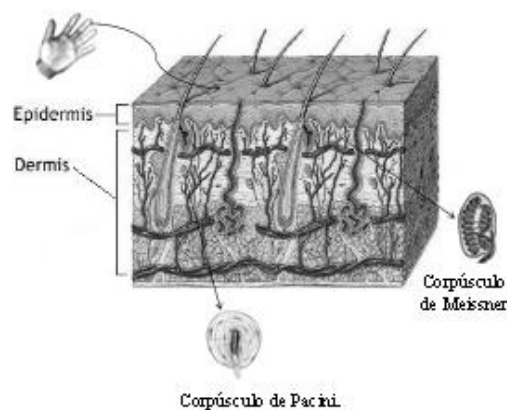
Las respuestas son verbales o conductuales. Las respuestas verbales, son frases cortas, por ejemplo *sí, no, lo veo ó es igual* (Blanco, 1996). Las respuestas conductuales son movimientos que sustituyen a las respuestas verbales, generalmente se expresan presionando un botón (Blanco, 1996). La certeza de las respuestas puede verse afectada por la variabilidad de la actividad fisiológica espontánea de los órganos sensoriales, las fluctuaciones propias de los estímulos y los cambios aleatorios en los instrumentos que miden y aplican los estímulos (Blanco, 1996). La detección de un estímulo que presenta la misma modalidad y/o intensidad en distintos ensayos, es regulada por las emociones, las expectativas, el nivel de atención y la motivación (Blanco, 1996). Estos factores constituyen los sesgos de respuesta que se pueden reducir al aplicar una mayor cantidad de estímulos.

De lo anterior, se puede decir que la psicofísica se centra en la relación entre las características físicas de un estímulo y los atributos de su percepción (Kandel, 1997). Por su parte, el estudio de la fisiología sensorial ha intentado explicar la actividad neural generada por los estímulos físicos, cómo los receptores sensoriales transducen la información proveniente de los estímulos y como ésta información es procesada por el cerebro (Kandel, 1997). Durante las últimas décadas se han realizado experimentos en los que la psicofísica y la neurofisiología, de manera conjunta, han logrado hallar la relación funcional entre un estímulo y la descarga neural que genera (Romo *et al.*, 2003). Sin embargo, hasta la fecha no se ha establecido si la capacidad para discriminar la misma información en dos modalidades sensoriales distintas, es la misma. El presente estudio empleó la psicofísica para medir y correlacionar curvas psicométricas de humanos que discriminaban estímulos táctiles y auditivos en el rango de flutter.

## **II.II Sistema somatosensorial**

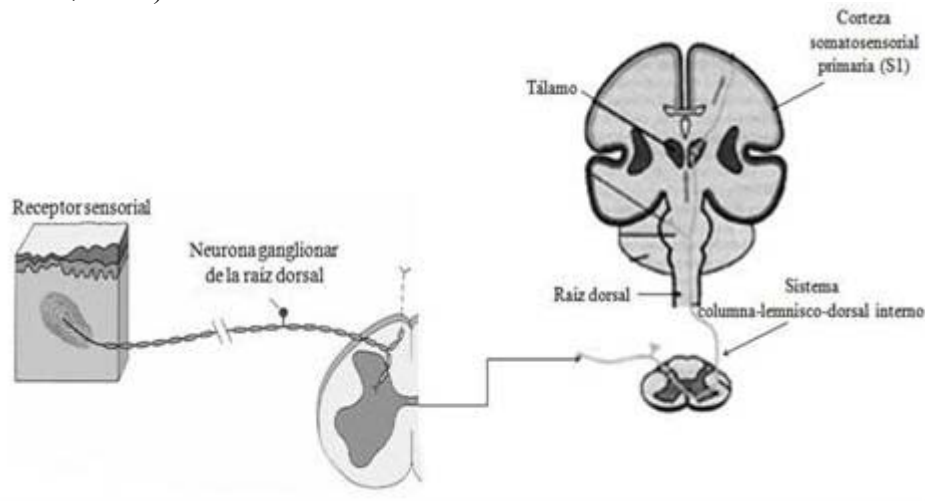
El sistema somatosensorial es un conjunto de órganos y estructuras que forman la cubierta exterior del cuerpo humano. Sus funciones generales son de protección, sostén y biomecánicas (movimiento y equilibrio corporal; Almagía, 2006). La piel constituye el principal órgano del sistema somatosensorial (Braun, 2002; Alcaraz, 1992). Existen dos tipos de piel: con vello y sin vello o glabra (Guyton, 2006). Ambas están formadas por dos capas: la epidermis y la dermis (Brady, 1996). En la epidermis inciden directamente los estímulos externos. La dermis es una capa profunda y gruesa donde se localizan las terminaciones nerviosas (Ville, 1997). La piel glabra de la yema de los

dedos posee una gran cantidad de receptores somáticos ó mecanorreceptores (Kandel, 1997). Los mecanorreceptores son células especializadas que rodean las terminaciones nerviosas periféricas de neuronas aferentes, que a su vez conducen percepciones somáticas a la médula espinal y encéfalo (Kandel, 1997). En la yema de los dedos se encuentran dos mecanorreceptores de adaptación rápida conocidos como corpúsculos de Pacini y de Meissner (Kandel, 1997). Los corpúsculos de Pacini se localizan en el tejido subcutáneo de la piel y su estructura es parecida a una cápsula formada por tejido conjuntivo que envuelve la terminación nerviosa (Figura 2). Estos mecanorreceptores son sensibles a estímulos en el rango de frecuencias de 60 a 400 Hz; y poseen campos receptivos (áreas de excitación) amplios que tienen una zona central de máxima sensibilidad (Kandel *et al.*, 2000). Los corpúsculos de Meissner se localizan en la capa superficial de la piel (Kandel, 1997; Figura 2). Sin embargo, sus campos receptivos ocupan un área menor y son más abundantes que los corpúsculos de Pacini (Kandel, 1997). Su morfología consiste en una estructura globular que en su interior contiene líquido y células epiteliales, la terminación nerviosa está rodeada por una capsula formada por numerosas células de tejido conectivo (Tortora, 2002). Una propiedad importante que caracteriza a los corpúsculos de Pacini y de Meissner, es la capacidad de responder rápidamente al inicio de un estímulo constante, interrumpiendo posteriormente las descargas neuronales aunque el estímulo se mantenga. Esta capacidad se conoce como adaptación rápida (Kandel *et al.*, 2000).



**Figura 2:** Ubicación y morfología de los mecanorreceptores de adaptación rápida (Modificado de Kandel *et al.*: the bodily senses. En: Principles of neural sciences, 4ª ed. Mc Graw-Hill. USA, 2000). Los corpúsculos de Meissner se localizan en la epidermis; son abundantes en la yema de los dedos y presentan mayor sensibilidad a estímulos vibratorios inferiores a 50 Hz. Los Corpúsculos de Pacini se ubican en la dermis, poseen campos receptivos amplios y responden a vibraciones de alta frecuencia (60-400 Hz).

La estimulación vibrotáctil recibida por los corpúsculos de Meissner se dirige, a través del axón periférico de la neurona ganglionar de la raíz dorsal (NGRD), al sistema columna-lemnisco-dorsal interno (Purves *et al.*, 2001; Figura 3). Este sistema realiza las sinapsis que permiten al estímulo llegar al tálamo para que la información se interprete en la corteza somatosensorial primaria, también conocida como S1 (Purves *et al.*, 2001; Cordova *et al.*, 2002).



**Figura 3:** Vías de codificación para estímulos táctiles (Modificado de Kandel *et al.*: the bodily senses. En: Principes of neural sciences, 4ª ed. Mc Graw-Hill. USA, 2000). El receptor somático de la neurona ganglionar de la raíz dorsal (NGRD) constituye la terminación aferente primaria. La NGRD conduce la información vibrotáctil hacia el tálamo; a través del sistema columna-lemnisco dorsal interno y de allí se transmite hacia la corteza somatosensorial primaria (S1).

### II.II.I Código neural y flutter somatosensorial

La sensación de flutter o aleteo (Mountcastle *et al.*, 1967), se genera cuando se hace vibrar la piel a frecuencias que van de los 5 a los 50 Hz (Romo *et al.*, 2002) y se utiliza para diferenciar dos estímulos vibratorios que codifican para dos clases distintas de receptores sensoriales somáticos (Mountcastle *et al.*, 1967). Este fenómeno ha sido sumamente útil para investigar procesos sensoriales somestésicos (Talbot *et al.*, 1968). Mountcastle y sus colegas, mostraron que la sensación de flutter es mediada principalmente por mecanorreceptores de Meissner de adaptación rápida (Talbot *et al.*, 1968). Los experimentos realizados con el sistema somatosensorial de muestran que humanos y monos tienen capacidades similares para discriminar frecuencias mecánicas en el rango de flutter (Mountcastle *et al.*, 1990, Hernández *et al.*, 1997). Los resultados neurofisiológicos sugieren que la actividad neural provocada por la estimulación de las fibras aferentes de los órganos de Meissner, posee una estructura periódica, es decir, los potenciales de acción están estrechamente relacionados con la fase de las oscilaciones

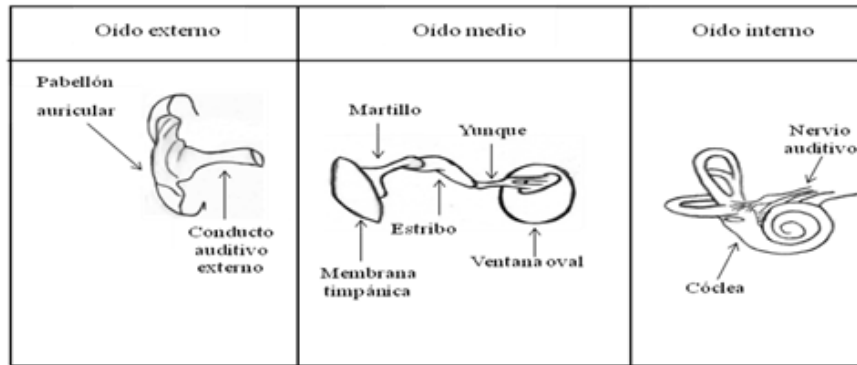
mecánicas de los estímulos (Talbot *et al.*, 1968). La frecuencia de disparo de las fibras aferentes de los órganos de Meissner se mantiene entre los 10-50 Hz (Talbot *et al.*, 1968). Se propuso que posiblemente la codificación de la frecuencia de los estímulos sea realizada por neuronas ubicadas en áreas centrales a las aferentes primarias, mediante una secuencia temporal entre los potenciales de acción (Ahissar y Vaadia, 1990).

La discriminación de estímulos vibrotáctiles en el rango de flutter, representa un modelo adecuado para el estudio de la percepción somática debido a que utiliza dos disciplinas experimentales: la psicofísica y la neurofisiología. Mountcastle y sus colaboradores cuantificaron la relación entre el valor real de un estímulo y el valor subjetivo reportado por sujetos humanos (Mountcastle *et al.*, 1969). En segundo lugar, registraron, en monos anestesiados las descargas neurales de las fibras aferentes cutáneas, utilizando los mismos estímulos de los experimentos de psicofísica. A partir de estas investigaciones en el sistema somatosensorial, ha sido posible estudiar la manera en la que los estímulos somestésicos son codificados y utilizados en procesos tales como la memoria, la toma de decisiones y la ejecución motora (Romo *et al.*, 2002, 2003; Hernández *et al.*, 2002; Lemus *et al.*, 2007).

### **II.III Sistema auditivo**

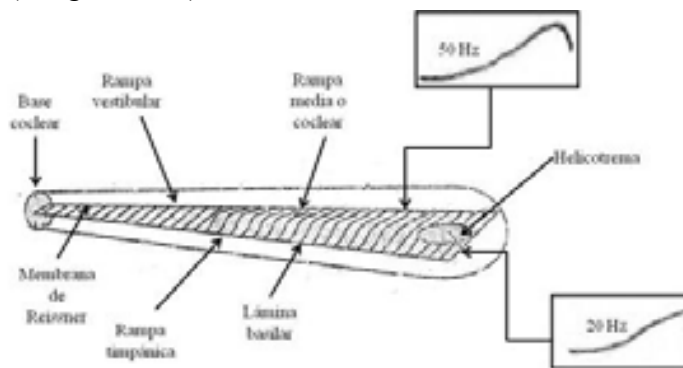
Para la mayoría de los animales, el sistema auditivo constituye una fuente de información vital sobre lo que ocurre en el entorno (Gideon, 2006). La función esencial de este sistema es, transformar las variaciones de presión originadas por la propagación de las ondas sonoras en impulsos eléctricos (Resnick, 1998). El grado de sensibilidad auditiva varía de una especie a otra. En humanos, el rango normal de audición se produce entre los 20 y 20,000 Hz (Purves *et al.*, 2001). Para este caso, la percepción de estímulos auditivos es posible gracias al conjunto de órganos especializados en detectar ondas sonoras y transformarlas en impulsos nerviosos que son interpretarlos en la corteza cerebral (Ross *et al.*, 1994).

Morfológicamente, el sistema auditivo humano se divide en tres áreas funcionales: oído externo, oído medio y oído interno (Higashida, 1991; Figura 4).



**Figura 4 :** Áreas funcionales relevantes del sistema auditivo humano. La función de l oído externo es captar las ondas sonoras para conducir las, en primera instancia, hacia la membrana timpánica. La vibración de la membrana timpánica ocasionada por las ondas sonoras, desencadena el movimiento en secuencia del, martillo, estribo, yunque hasta la ventana oval. La ventana oval es el punto de transición entre el oído medio y el oído interno. El oído interno, la cóclea a través del nervio auditivo transforma las ondas sonoras en impulsos nerviosos.

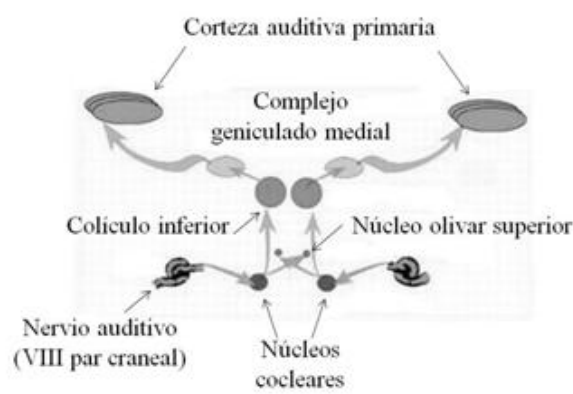
La cóclea, a su vez, contiene tres conductos: conducto o rampa vestibular, conducto coclear y conducto o rampa timpánica (Figura 5). La rampa vestibular y el conducto coclear están separados por la membrana de Reissner (Vargas, 1999). La lámina basilar divide a la rampa timpánica del conducto coclear. Estructuralmente, la lámina basilar divide a la rampa timpánica del conducto coclear. Estructuralmente, la lámina basilar es más amplia en su extremo apical que en su extremo basal y presenta numerosas propiedades mecánicas a lo largo de ella (Kandel *et al.*, 2001). El área apical o de la helicotrema, es sensible a frecuencias bajas de aproximadamente 20 Hz (Vargas, 1999). Las frecuencias subsecuentes se representan gradualmente hacia su base (Figura 5). En la superficie de la lámina basilar se encuentra el órgano de Corti que contiene a las células ciliadas (Vargas, 1999).



**Figura 5 :** Morfología de la cóclea de senrollada (Modificado de Purves *et al.*: Sistema auditivo. En: Invitación a la neurociencia. Interamericana. México, 2001). La cóclea está formada por tres cámaras longitudinales: la rampa timpánica, la rampa vestibular y la rampa media o coclear. La rampa timpánica se comunica con la vestibular en el helicotrema. Estas tres cámaras están separadas por dos membranas: la membrana de Reissner, entre la rampa vestibular y la rampa media o coclear; y la membrana basilar, entre la rampa media o coclear y la rampa timpánica. En la membrana basilar se localizan las células ciliadas (los receptores auditivos). Los gráficos perfilan la amplitud de la onda de propagación a lo largo de la membrana basilar para dos frecuencias y muestra que la amplitud máxima de la onda varía en función de la frecuencia de estimulación (Purves *et al.*, 2001).



Las células ciliadas tienen forma cilíndrica o de matraz (Purves *et al.*, 1997). Presentan pequeñas prolongaciones descendentes (cilios). Los cilios varían en cuanto a su capacidad de respuesta y tamaño (Vargas, 1999). Los haces ciliares largos responden a frecuencias más bajas, mientras que los haces ciliares de menor tamaño son sensibles a frecuencias altas (Houssay, 1994). Las células ciliadas se agrupan en cuatro columnas: una hilera formada por células ciliadas internas (cci) y tres más por células ciliadas externas (cce). Las cci constituyen los verdaderos receptores auditivos (Houssay, 1994), debido a que estimulan el 95% de las fibras del nervio auditivo que se proyectan hasta el encéfalo (Purves *et al.*, 2001). Se ha propuesto que las cce controlan la sensibilidad de las cci para responder a diferentes tonos (Vargas, 1999). Las terminaciones nerviosas del nervio auditivo, conocido como VIII par craneal, hacen sinapsis en los núcleos cocleares dorsal y ventral del bulbo raquídeo. En una segunda conexión sináptica, la información se dirige al núcleo olivar superior. A partir de allí, la vía auditiva asciende a través de lemnisco lateral. Algunas fibras terminan en el núcleo del lemnisco lateral y la mayoría continúan hasta el colículo inferior. De ahí, otro relevo neural conduce la información hasta el complejo geniculado medial del tálamo, quien a su vez envía la información auditiva a la corteza auditiva primaria (Vargas, 1999; Figura 6). Finalmente en la corteza auditiva primaria, también conocida como A1, se representa la percepción y la codificación de los estímulos auditivos (Purves *et al.*, 2001).



**Figura 6:** Vías nerviosas auditivas (Modificado de [neurofisiología granada.com/peat/imagenes/viaauditiva.jpg](http://neurofisiología.granada.com/peat/imagenes/viaauditiva.jpg)). Durante el proceso de percepción del sonido, se llevan a cabo tres sinapsis. Las fibras nerviosas del VIII par craneal realizan una primera sinapsis en los núcleos cocleares. La segunda sinapsis se efectúa en el núcleo olivar superior, a partir de este punto, las fibras que aún no terminan, conducen la información auditiva hasta el colículo inferior, y de ahí, al complejo geniculado medial. A su vez el geniculado envía proyecciones a la corteza auditiva primaria (A1).

### **II.III.I Código neural y flutter auditivo.**

Se considera flutter acústico a los estímulos auditivos que oscilan entre los 10-45 Hz. (Bendor y Wang, 2007). En los experimentos neurofisiológicos donde se emplea el flutter acústico, los estímulos se presentan como pulsos consecutivos que se perciben como una serie de sonidos cortos. Bendor y Wang en 2007 realizaron experimentos en *Callithrix jacchus* (mono tití) empleando esta modalidad sensorial. Durante los experimentos los monos permanecieron despiertos, se avaluó su respuesta neural cuando estos percibían la estimulación de flutter auditivo. Sin embargo, los monos no tenían que discernir entre un estímulo y otro ni expresar una respuesta a través de alguna conducta. Los resultados de estos experimentos concluyeron que las neuronas de la corteza auditiva primaria (A1) codifican los estímulos en el rango de flutter preferentemente a través de la tasa de disparo y solo en baja proporción en el intervalo entre espigas (Bendor y Wang, 2007). Lemus *et al* en 2009 realizaron experimentos neurofisiológicos en los que monos *Macaca mulatta* resolvieron una tarea psicofísica de discriminación auditiva en el rango de flutter. En la que los primates tenían que comparar un par de estímulos acústicos y expresar una respuesta. Con los resultados obtenidos en este experimento se estableció qué de esa actividad neural, es útil para discriminar estímulos en el rango de flutter acústico (Lemus *et al.*, 2009).

De manera análoga al sistema somatosensorial, la discriminación psicofísica de estímulos auditivos es un modelo útil para el estudio de la percepción auditiva. Sin embargo, una porción considerable de estos estudios se encuentra dirigida a comparar estímulos cuyas frecuencias oscilan en el rango de percepción audible (20 -20,000 Hz). Permitiendo establecer la ubicación y posible modo de acción de los mecanorreceptores de las células ciliadas (Munar *et al.*, 2002). Esta aportación ha sido significativa para el desarrollo de técnicas y equipo medico para el tratamiento de patologías auditivas como: hipoacusias cocleares (Munar *et al.*, 2002). Sin embargo, muchas preguntas con respecto a la fisiología coclear permanecen sin respuesta. Como por ejemplo, el conocer los mecanismos en que las células ciliadas externas interactúan mecánicamente con las células ciliadas internas ó el cómo el amplificador coclear logra la selectividad de frecuencia.

### **III PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

A través del diseño de experimentos que combinan métodos psicofísicos y registros neurofisiológicos se ha encontrado una relación fisiológica entre los estímulos y la actividad neural al resolver una tarea de discriminación. Esto ha permitido explicar la dependencia que existe entre un estímulo y la percepción que produce. La mayoría de estos trabajos fueron realizados usando tareas psicofísicas somestésicas en el rango de flutter debido a que proporcionan información importante sobre la actividad neural y la frecuencia de disparo de las fibras aferentes (Romo *et al.*, 2002). En el caso de psicofísica auditiva, las investigaciones están enfocadas a determinar niveles de voz y sensibilidad auditiva empleando valores de ondas sonoras con frecuencias que se ubican en el intervalo de 300 a 3000 Hz (Tortora, 2002). El presente estudio empleó la psicofísica para determinar umbrales sensoriales y correlacionar la capacidad de discriminación táctil y auditiva en el rango de flutter en humanos. Los resultados obtenidos aportarán información referente a la manera en la que el cerebro resuelve operaciones y si estas operaciones dependen de la modalidad sensorial.

#### **IV OBJETIVO**

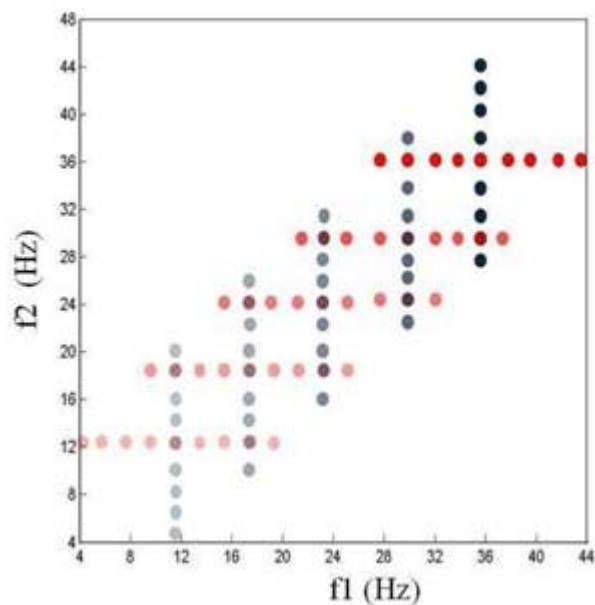
Determinar si la capacidad para discriminar estímulos táctiles y auditivos en humanos es la misma.

#### **V HIPOTESIS**

Dado que la información sensorial táctil llega al sistema nervioso central a través de vías neurales distintas a la información sensorial auditiva, entonces es posible que la capacidad de discriminación de estímulos táctiles sea distinta a la capacidad de discriminación de estímulos auditivos.

## VI MÉTODOS

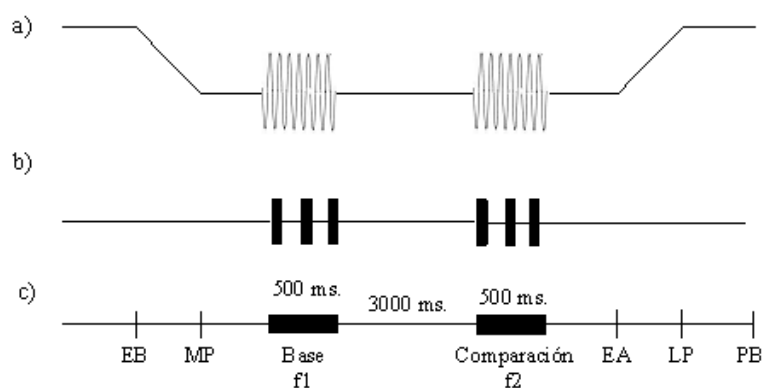
Los experimentos fueron realizados con 18 humanos, (11 mujeres y 7 hombres) con una edad comprendida entre los 19 y 27 años y con ausencia de patologías auditivas, de acuerdo a lo reportado por los propios individuos. Durante los experimentos, los sujetos permanecieron dentro de un cuarto cerrado y sonoamortiguado. En el interior del cuarto, un par de bocinas emitían ruido blanco, mientras otro par de bocinas emitían los estímulos de flutter acústico generados por una computadora. Los estímulos auditivos consistieron en un conjunto de vibraciones sonoras con frecuencias que oscilaron entre los 4 y 48 Hz, correspondientes al rango de flutter. Para aplicar los estímulos somestésicos, se utilizó un estimulador lineal mecánico vibrotáctil controlado por un sistema de cómputo. Los estímulos táctiles fueron aplicados en la yema del dedo medio de la mano derecha. En la Figura 7 se representan los pares de estímulos utilizados para cada experimento durante la tarea de discriminación. Se eligieron cinco frecuencias centrales (12, 18, 24, 30 y 36) y cada una de ellas se comparó contra nueve frecuencias, cuatro frecuencias menores, cuatro mayores y una de idéntico valor que la referencia.



**Figura 7 :** Pares de frecuencias empleados durante los experimentos de discriminación. Cada punto representa un par de frecuencias. En cada sesión experimental usaba solo una secuencia vertical o una horizontal de nueve puntos, donde las condiciones táctil y auditiva se intercalaban aleatoriamente. Nótese que  $f_1$  podía ser fija en todos los ensayos mientras que  $f_2$  variaba (puntos azules), o bien  $f_2$  podía ser fija en todos los ensayos mientras que  $f_1$  variaba (secuencias rojas).

## VI.I Tarea de discriminación

Tanto para la tarea de discriminación vibrotáctil como auditiva, el ensayo comenzó cuando la punta del estimulador mecánico descendió presionando la piel de la yema del dedo medio de la mano derecha, del sujeto experimental. Al sentir el contacto, el sujeto colocó la mano izquierda sobre la palanca indica, con este movimiento le indicaba al sistema que estaba listo para recibir los estímulos. Tras un retardo variable (1 a 3 segundos), se le aplicó al sujeto el estímulo base o primer estímulo ( $f_1$ ) de 500 milisegundos (ms) de duración (Lemus, 2002). Tres segundos más tarde se aplicó el estímulo de comparación ( $f_2$ ) de la misma duración que el estímulo base y después de otros 3 segundos se retiró la punta del estimulador. Inmediatamente después, el sujeto liberaba la palanca y presionaba uno de dos botones que se encontraban frente a él. Si presionaba el botón izquierdo indicaba que  $f_2$  fue de mayor frecuencia que  $f_1$ , e n cambio si presiona el botón derecho, indica que  $f_2$  fue de menor frecuencia que  $f_1$ . En cada ensayo  $f_1$  y  $f_2$  fueron exclusivamente táctiles o exclusivamente auditivos. Los ensayos táctiles y auditivos se presentan de manera intercalada y aleatoria. Las respuestas fueron almacenadas por el sistema de cómputo en términos de aciertos y errores, para posteriormente determinar los umbrales diferenciales (UD) de discriminación para ambas modalidades (táctil y auditiva). La Figura 8 muestra los eventos de la tarea de discriminación.



**Figura 8:** Tarea de discriminación. a) Ensayo táctil. b) Ensayo auditivo. c) Secuencia temporal. EB; la punta del estimulador baja. MP; el sujeto coloca la mano sobre la palanca. F1; frecuencia del estímulo base. F2; frecuencia del estímulo de comparación. Cada estímulo dura 500 milisegundos (ms). EA; la punta del estimulador se levanta. LP; el sujeto retira la mano de la palanca. PB; se presiona un botón.

Cada estímulo tenía una duración de 500 ms. (Figura 8). Los estímulos táctiles fueron producidos por movimientos oscilatorios del estimulador mecánico en un intervalo de 5 a 50 Hz. Para la modalidad auditiva, los estímulos consistieron en un tren de pulsos, donde cada pulso duró 20 ms a una frecuencia de 1 kHz. El intervalo temporal entre los pulsos definió la frecuencia del estímulo de 500 ms y podía variar entre los 5 y 50 Hz.

## VI.II. Análisis de datos

Los datos obtenidos en cada experimento se procesaron en el programa MatLab 6.5 aplicando la ecuación de Boltzmann de la siguiente forma:

Expresión general de la ecuación Boltzmann.

$$P = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(x - x_0)/dx}} + A_2$$

Para aplicar esta ecuación como una función psicométrica, se definieron los parámetros de la tarea psicofísica de discriminación, de manera que:

P = Porcentaje de veces en que los sujetos percibieron la frecuencia del estímulo de comparación mayor a la del estímulo base ( $f_2 > f_1$ ).

x = Valor de la frecuencia del estímulo de comparación ( $f_2$ ).

$A_1$  = Porcentaje mínimo en el que los sujetos consideraron  $f_2 > f_1$ .

$A_2$  = Porcentaje máximo en el que los sujetos consideraron  $f_2 > f_1$ .

$x_0$  = Valor de la frecuencia central según el caso (12, 18, 24, 30 ó 36).

dx = Determina velocidad de cambio de la función (pendiente).

Con la ecuación Boltzmann se obtuvo el umbral diferencial (UD), el ajuste de datos y una curva psicométrica para cada frecuencia central (12, 18, 24, 30 y 36 Hz). Posteriormente, se aplicó el mismo procedimiento a los valores del umbral diferencial (UD) de la población.

Para comparar el desempeño de los sujetos al discriminar estímulos táctiles y auditivos se aplicó un análisis ROC (Receiver Operating Characteristic) con el programa MatLab 6.5. Se eligió este análisis porque no requiere supuestos acerca de la distribución de los datos y muestra qué tan diferente es un conjunto de datos respecto al otro. La prueba estadística no paramétrica ROC calcula la probabilidad de que cualquier valor de una

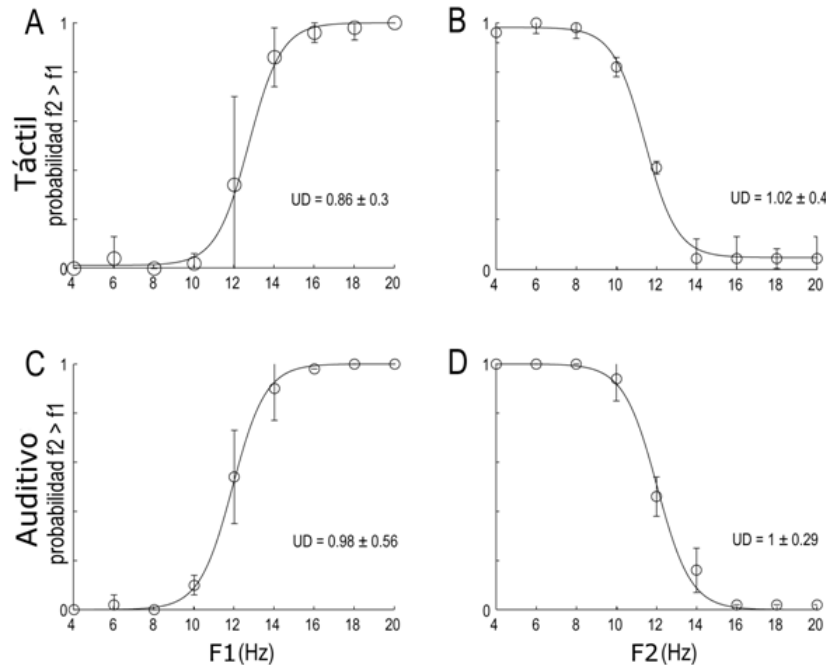
distribución A tomado al azar, sea mayor a cualquier valor de una distribución B tomado al azar ( $ROC(A>B)$ ). El valor ROC tiende al valor 1, si A es mucho mayor que B, y tiende a cero en el caso contrario. Cuando no existen diferencias entre A y B, el valor ROC corresponde a 0.5 (Murray, 1991).



## VII RESULTADOS

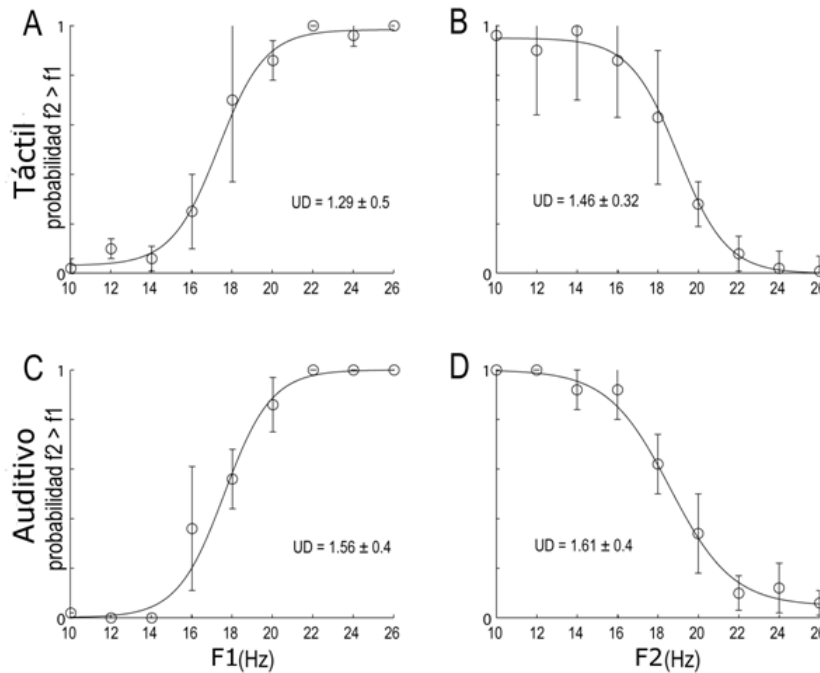
El desempeño de los sujetos durante la tarea de discriminación se muestra en las figuras 9, 10, 11, 12 y 13. En cada una de ellas, la modalidad táctil está representada en los paneles A y B, mientras que la modalidad auditiva se expresa en C y D. Las frecuencias centrales (12, 18, 24, 30 y 36) permanecieron fijas durante el primer o segundo estímulo. F1 y F2 hacen referencia a la estimulación correspondiente a la frecuencia fija durante el primer y segundo estímulo, respectivamente. De esta manera, se establecieron cuatro condiciones experimentales para las frecuencias fijas de 12, 18, 24, 30 y 36 Hz: 1) táctil primer estímulo fijo (F1); 2) táctil segundo estímulo fijo (F2); auditivo primer estímulo fijo (F1) y auditivo segundo estímulo fijo (F2). Para cada condición experimental se obtuvo el UD y una curva psicométrica.

En la figura 9 se muestran los resultados obtenidos durante la tarea de discriminación táctil y auditiva cuando la frecuencia fija fue de 12 Hz en el primer (F1) y segundo (F2) estímulo. En esta figura la forma de las curvas psicométricas se asemeja a una S bien definida (sigmoide).



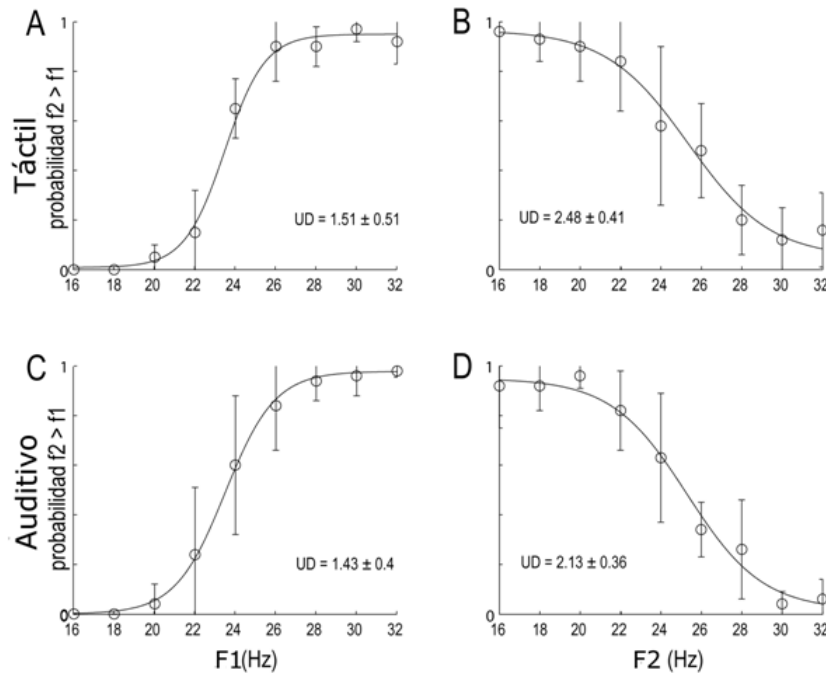
**Figura 9:** Curvas psicométricas para frecuencia fija de 12 Hz. Las curvas muestran el desempeño que obtuvieron los sujetos al realizar la tarea de discriminación. Los paneles A y B hacen referencia a la condición táctil cuando el primer (F1) y segundo estímulo (F2) permanecieron fijos, respectivamente. La condición auditiva se indica en los paneles C y D. En C se observa la curva psicométrica que se formó cuando la frecuencia del primer estímulo (F1) fue constante. La gráfica del panel D indica el desempeño de los sujetos cuando el segundo estímulo (F2) se mantuvo fijo.

La Figura 10 corresponde al desempeño obtenido por los sujetos para la frecuencia fija de 18 Hz. Si se compara el UD de cada panel con los que se alcanzaron para 12 Hz, se aprecia que este valor aumento. En estas gráficas también se logra distinguir una forma sigmoïdal.



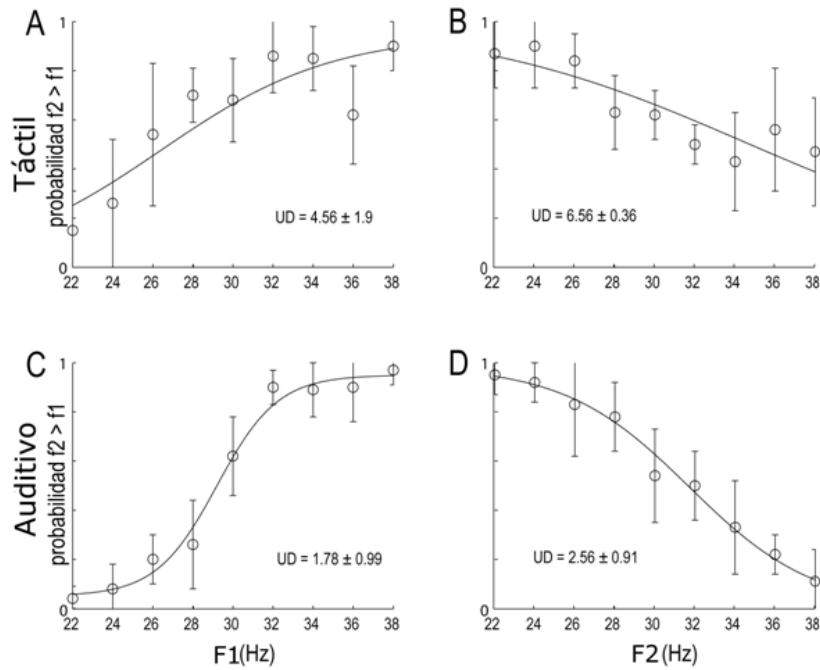
**Figura 10:** Curvas psicométricas para frecuencia fija de 18 Hz. Las curvas muestran el desempeño que obtuvieron los sujetos al realizar la tarea de discriminación. Los paneles A y B hacen referencia a la condición táctil cuando el primer (F1) y segundo estímulo (F2) permanecieron fijos, respectivamente. La condición auditiva se indica en los paneles C y D. En C se observa la curva psicométrica que se formó cuando la frecuencia del primer estímulo (F1) fue constante. La gráfica del panel D indica el desempeño de los sujetos cuando el segundo estímulo (F2) se mantuvo fijo.

Como se indica en la figura 11, el UD para cada condición experimental continúa incrementándose conforme aumenta la frecuencia fija (24 Hz). Aquí las curvas psicométricas muestran una inclinación mayor cuando la frecuencia fija se presenta en el segundo estímulo (F2) para ambas modalidades.

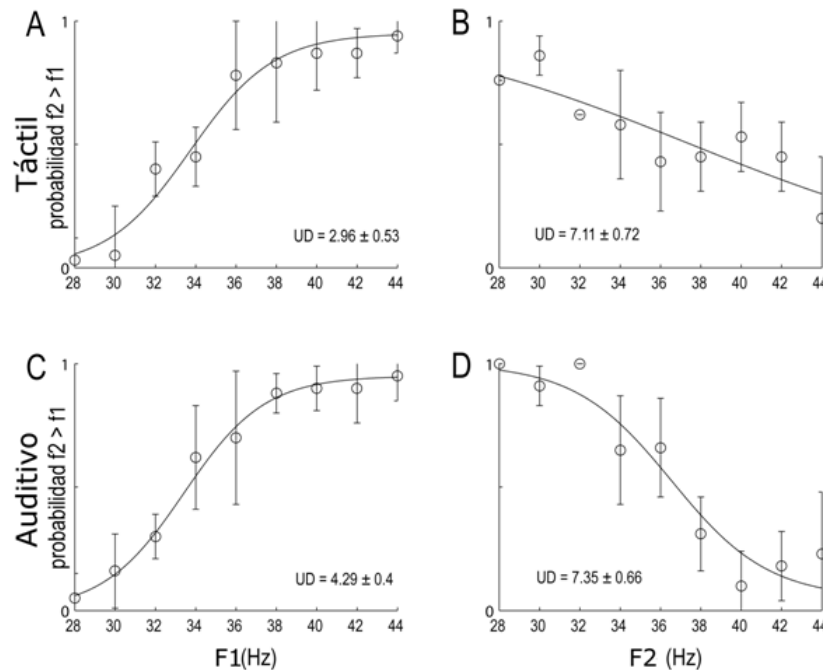


**Figura 11:** Curvas psicométricas para frecuencia fija de 24 Hz. Las curvas muestran el desempeño que obtuvieron los sujetos al realizar la tarea de discriminación. Los paneles A y B hacen referencia a la condición táctil cuando el primer (F1) y segundo estímulo (F2) permanecieron fijos, respectivamente. La condición auditiva se indica en los paneles C y D. En C se observa la curva psicométrica que se formó cuando la frecuencia del primer estímulo (F1) fue constante. La gráfica del panel D indica el desempeño de los sujetos cuando el segundo estímulo (F2) se mantuvo fijo.

Las curvas psicométricas para las frecuencias fijas de 30 y 36 Hz (figuras 12 y 13, respectivamente) en el caso de la modalidad auditiva presentan prolongaciones ocasionadas por el ajuste propio de los datos. En la modalidad táctil, el desplazamiento visualmente se asemeja a una recta. Sin embargo, esta dispersión de datos no es estadísticamente significativa. Este comportamiento deja ver que al emplear frecuencias fijas más altas, los sujetos obtienen un UD más alto.



**Figura 12:** Curvas psicométricas para frecuencia fija de 30 Hz. Las curvas muestran el desempeño que obtuvieron los sujetos al realizar la tarea de discriminación. Los paneles A y B hacen referencia a la condición táctil cuando el primer (F1) y segundo estímulo (F2) permanecieron fijos, respectivamente. La condición auditiva se indica en los paneles C y D. En C se observa la curva psicométrica que se formó cuando la frecuencia del primer estímulo (F1) fue constante. La gráfica del panel D indica el desempeño de los sujetos cuando el segundo estímulo (F2) se mantuvo fijo.

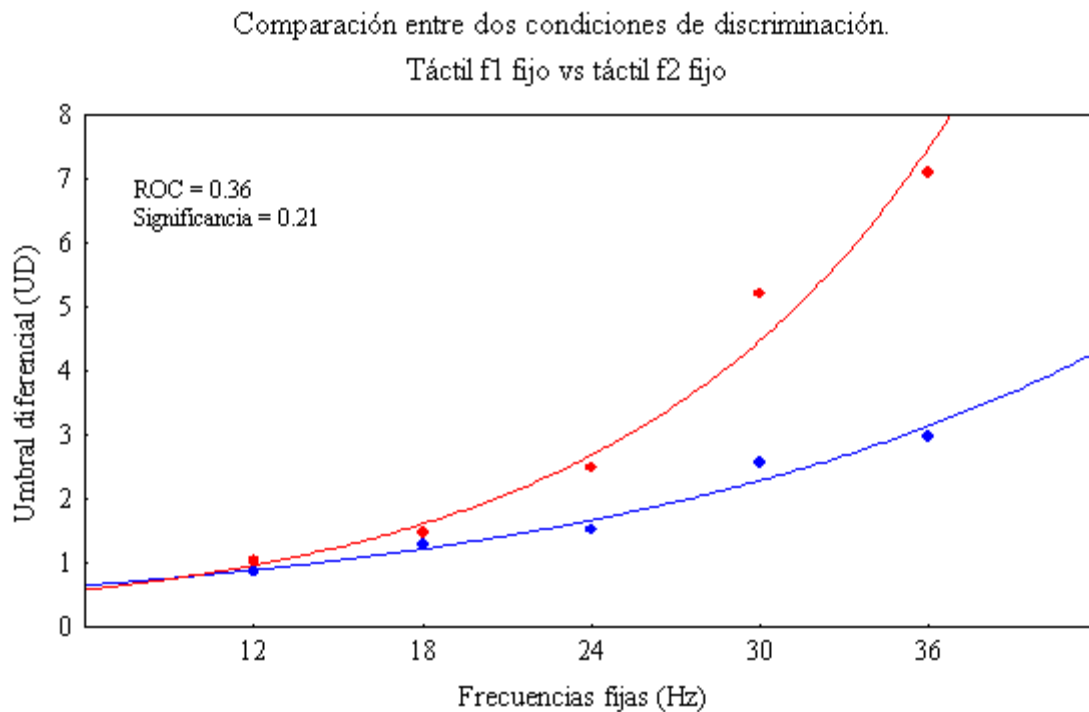


**Figura 13:** Curvas psicométricas para frecuencia fija de 36 Hz. Las curvas muestran el desempeño que obtuvieron los sujetos al realizar la tarea de discriminación. Los paneles A y B hacen referencia a la condición táctil cuando el primer (F1) y segundo estímulo (F2) permanecieron fijos, respectivamente. La condición auditiva se indica en los paneles C y D. En C se observa la curva psicométrica que se formó cuando la frecuencia del primer estímulo (F1) fue constante. La gráfica del panel D indica el desempeño de los sujetos cuando el segundo estímulo (F2) se mantuvo fijo.

De las curvas psicométricas de las Figuras 9, 10, 11, 12 y 13, se puede establecer que, cuando se comparó la modalidad táctil con la auditiva y la frecuencia fija se presentó durante el primer (F1) y segundo estímulo (F2) el comportamiento de la curva no varió. También los sujetos mostraron mayor capacidad para discriminar el primer estímulo ya fuera táctil o auditivo cuando la frecuencia fija se presentaba durante el primer estímulo (F1).

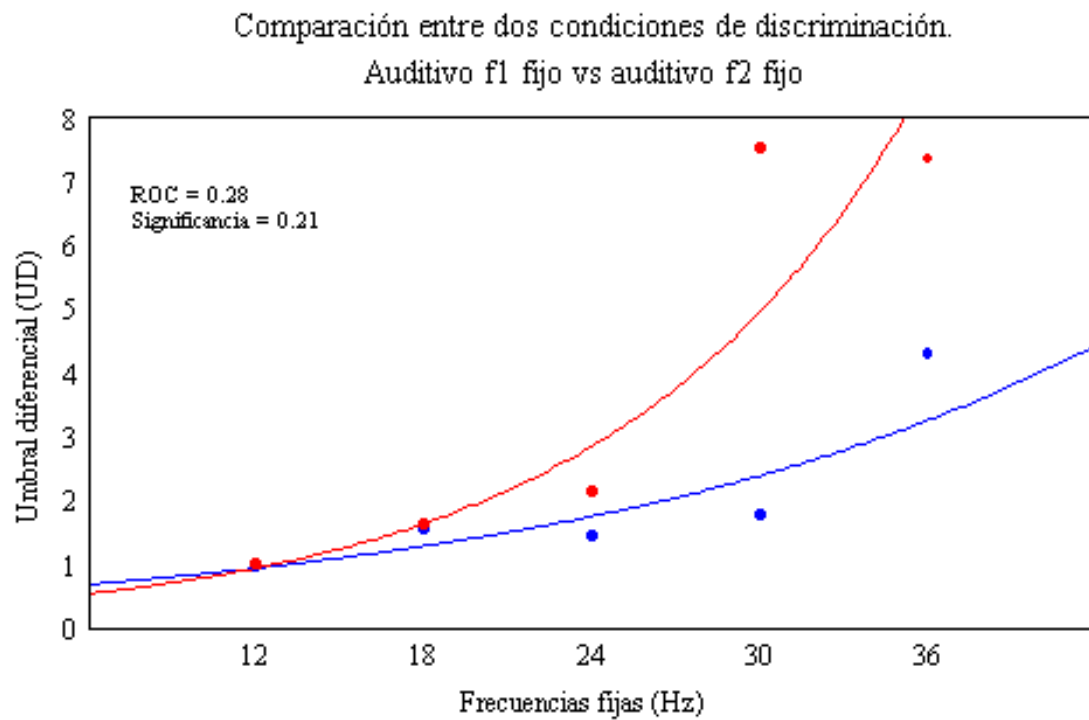
Las Figuras 14, 15, 16 y 17 muestran los promedios del umbral diferencial (UD) para cada frecuencia fija. Al conjunto de promedios pertenecientes a cada experimento táctil F1 y F2 fijo; así como para auditivo F1 y F2 fijo se ajustaron curvas exponenciales.

En la Figura 14 se ilustra una gráfica formada por los umbrales de discriminación para cada frecuencia fija. En ella se comparan dos condiciones experimentales: táctil f1 fijo con táctil f2 fijo. Nótese que los umbrales de discriminación se incrementan exponencialmente en función del incremento de la frecuencia fija.



**Figura 14.** Comparación entre dos condiciones: táctil f1 fijo vs táctil f2 fijo. La gráfica indica el ajuste exponencial del umbral diferencial (UD) poblacional. En ella se compara la modalidad táctil cuando la frecuencia se mantiene fija durante el primer (azul) y segundo estímulo (rojo). Se observa que la dispersión de los datos aumenta conforme se incrementa la frecuencia fija.

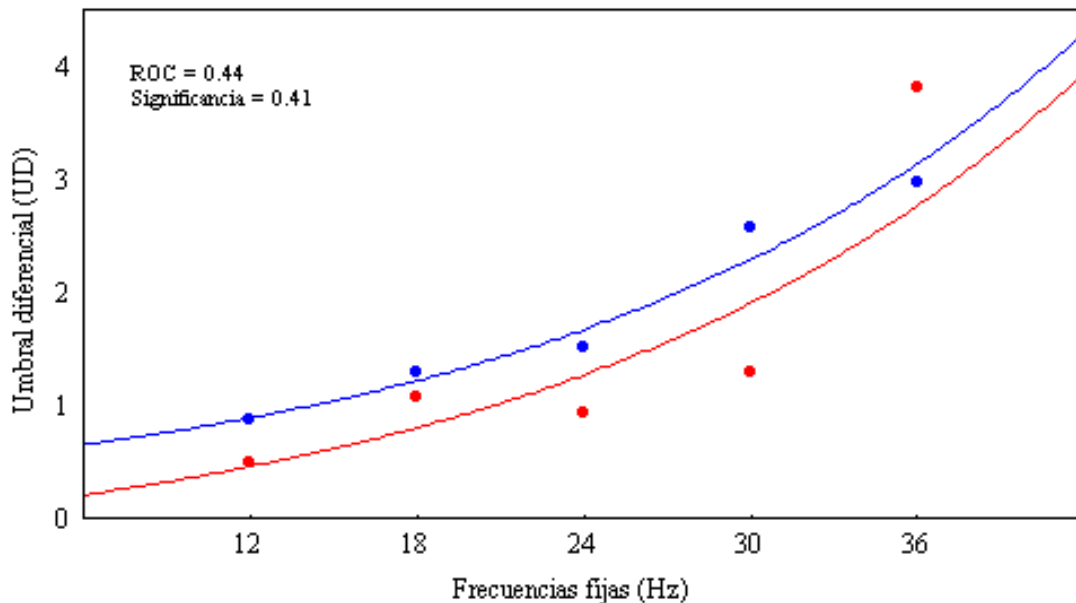
El ajuste exponencial para el UD alcanzado para las condiciones experimentales auditivo F1 y F2 fijo se pueden ver en la Figura 15.



**Figura 15.** Comparación entre dos condiciones: auditivo f1 fijo vs auditivo f2 fijo. La gráfica indica el ajuste exponencial de l umbral diferencial (UD) poblacional. En ella se compara la modalidad auditiva cuando la frecuencia se mantiene fija durante el primer (azul) y segundo estímulo (rojo). Se observa que la dispersión de los datos aumenta conforme se incrementa la frecuencia fija

La Figura 16 representa la comparación entre las dos modalidades sensoriales en estudio (táctil y auditivo). En esta gráfica el ajuste exponencial se refiere a la frecuencia fija durante el primer estímulo (F1).

Comparación entre dos condiciones de discriminación.  
Táctil f1 fijo vs auditivo f1 fijo

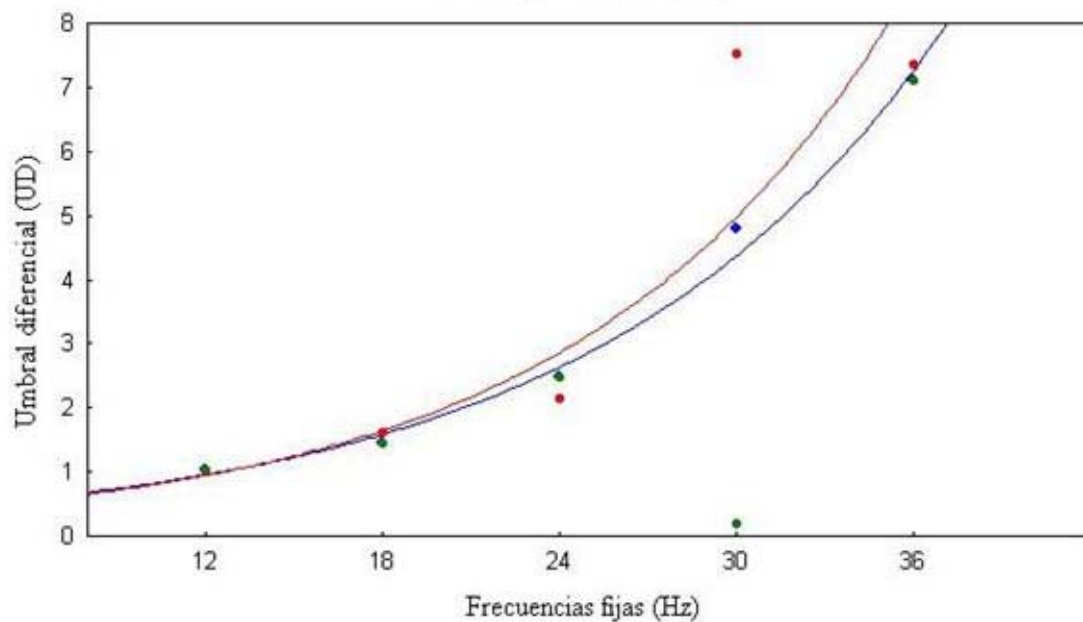


**Figura 16:** Comparación entre dos condiciones: táctil f1 fijo vs auditivo f1 fijo. La gráfica indica el ajuste exponencial de umbral diferencial (UD) poblacional. En ella se compara la modalidad táctil (azul) y auditiva (rojo) cuando la frecuencia se mantiene fija durante el primer estímulo. Se observa que la dispersión de los datos aumenta conforme se incrementa la frecuencia fija.

El patrón de distribución exponencial del umbral diferencial (UD) de la población se mantiene al comparar las condiciones experimentales: táctil y auditiva frecuencia fija durante el segundo estímulo (F2). Aquí se observa que al realizar el ajuste Boltzmann para la modalidad táctil correspondiente a la frecuencia fija de 30 Hz, no se encontró un punto en 0.25, por lo tanto el programa no realizó un ajuste correcto. De haber considerado este valor, el ajuste exponencial se hubiera alterado considerablemente. Para hallar un UD aproximado al valor real, se promedió el UD correspondiente a 24 y 36 Hz.

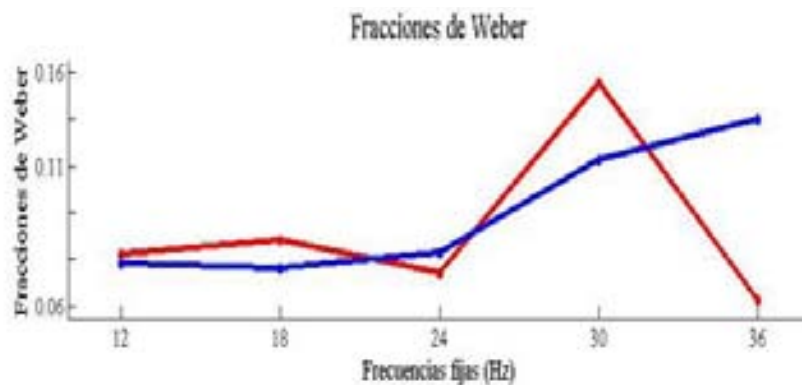
### Comparación entre dos condiciones de discriminación.

Táctil f2 fijo vs auditivo f2 fijo



**Figura 17:** Comparación entre dos condiciones: táctil f2 fijo vs auditivo f2 fijo. La gráfica indica el ajuste exponencial de l umbral diferencial (UD) poblacional. En ella se compara la modalidad táctil (azul) y auditiva (rojo) cua ndo la frecuencia se mantiene fija dur ante e l segundo estímulo. Se o bserva q ue e l umbral aumenta conforme se incrementa la frecuencia fija. En verde se ilustra el punto con el valor de l UD arrojado al azar por el sistema para la frecuencia fija de 30 Hz. Nótese que si se toma en cuenta este punto, el ajuste se altera notablemente.

En la Figura 18 se muestran las fracciones de Weber que se obtuvieron con base a los valores del UD que se expresan en los paneles de las figuras 9, 10, 11, 12 y 13. Para calcular las fracciones de Weber se utilizó la fórmula  $\Delta I = I * k$ . Una vez despejada k, se dividió  $\Delta I$  (UD) entre I (frecuencia fija) con lo que se obtuvo el valor de k. Los valores de las fracciones de Weber generalmente se expresan en decimales para facilitar los cálculos (Schiffman, 2004).



**Figura 18:** Fracciones de Weber. En la gráfica se representa la tendencia de valores de fracciones de Weber. Se puede apreciar que al incrementarse las frecuencias fijas también se presenta un aumento en el UD. La modalidad táctil está representada en color azul y la modalidad auditiva en color rojo.



## VIII DISCUSIÓN

Para discriminar un par de estímulos ya sean táctiles o auditivos en el rango de flutter, es necesario atender al primer estímulo ( $f_1$ ) y luego comparar el recuerdo de este contra un segundo estímulo ( $f_2$ ), de manera que el resultado de dicha comparación se transforme en una señal de decisión que pueda ser enviada al aparato motor para expresar una respuesta. Los mecanismos neuronales involucrados en estos procesos son: la formación de categorías de cantidades a partir de información sensorial, la retención en la memoria de trabajo de dichas categorías, la comparación de información sensorial contra la memoria de trabajo, la decisión formada a partir de dicha comparación y finalmente, la generación de una señal motriz. En principio, estos procesos son realizados por el cerebro siempre que se toman decisiones a partir de la comparación de información sensorial. Sin embargo, existe la posibilidad de que dichos mecanismos sean diferentes para cada modalidad sensorial. Está claro por ejemplo, que un estímulo táctil de flutter de 10 Hz será distinto a un estímulo auditivo de flutter de 10 Hz, en tanto a que son percibidos, uno cómo táctil y otro como auditivo. Sin embargo, la información relativa a la cantidad del estímulo (10 Hz) es percibida como la misma para ambas modalidades. Si esto no fuera así, no podríamos tomar información sensorial y transformarla en categorías de cantidades, sin las cuales, sería imposible realizar algunas conductas. Somos capaces por ejemplo, de reconocer a una persona independientemente de si la vemos o la escuchamos hablar. De igual manera, somos capaces de sumar ( $2 + 2$ ), independientemente de si vemos la operación escrita o si la escuchamos. Tomando este último ejemplo, cabe preguntarse si la operación de “suma” es realizada por un circuito cerebral dedicado a realizar sumas, o si por el contrario, existe un circuito que realiza sumas auditivas, otro, sumas visuales, otro, táctiles, etc. En la tarea de discriminación de frecuencias tendría que haber por lo tanto, circuitos dedicados a la discriminación táctil y circuitos dedicados a la discriminación auditiva. La evidencia anatómica con la que contamos sugiere que si bien la información sensorial es procesada en sitios cerebrales dedicados a cada modalidad, también sugiere que hay áreas de asociación donde dicha información es integrada. Sin embargo, hasta la fecha no conocemos los mecanismos mediante los cuales la información procedente de varias modalidades sensoriales es procesada en las cortezas de asociación. Estudios anatómicos realizados en la década de los ochenta (Goldman-Rakic y Selemon, 1984), establecen que por ejemplo la corteza prefrontal de asociación mantiene segregada en

columnas la información sensorial proveniente de varias modalidades sensoriales. Estas columnas podrían entonces agruparse y formar circuitos independientes dentro de los cuales se realizan las operaciones de discriminación para cada modalidad sensorial o, de manera alternativa, podrían procesar la información en términos operacionales (ej. memoria, comparación, decisión), sin importar la modalidad sensorial que aporte información. Un primer acercamiento a este problema es el estudio psicofísico al cual se dedica el presente estudio. Con él se pretende establecer si se tiene la misma capacidad para discriminar información a partir de dos modalidades sensoriales distintas. Si el procesamiento de información de modalidades sensoriales distintas se mantuviera segregado en todo momento, entonces sería lógico pensar que la capacidad para discriminar dicha información variaría de condición a condición.

### **VIII.I Discriminación vs categorización**

Para discriminar la diferencia entre las frecuencias de  $f_1$  y  $f_2$  es necesario retener en la memoria de trabajo la información de  $f_1$  de manera que este recuerdo sea comparado contra  $f_2$ . Sin embargo, estudios previos muestran que cuando uno de los estímulos permanece fijo durante una serie completa de ensayos, puede ocurrir que los sujetos dejen de prestar atención al estímulo fijo y recurran exclusivamente a categorizar el estímulo variable, asignándole así, un valor arbitrario (Hernández *et al.*, 1997). Así, los valores asignados serían exclusivamente alto o bajo, en contraste con el requerimiento de la discriminación donde tendría que ser  $f_2 > f_1$  o  $f_2 < f_1$ . Esto se ha visto particularmente con el desempeño de monos entrenados en esta tarea. Este fenómeno se explica por la recompensa que reciben los monos en cada ensayo, ya que tienden a buscar la estrategia más sencilla que les garantice la obtención de la recompensa. Sin embargo este no es el caso en la conducta humana durante esta tarea, ya que no se obtiene recompensa al final de cada ensayo, incluso, con la instrucción que reciben los humanos previo al experimento, se alerta de la necesidad de comparar ambos estímulos en todo momento. Una pregunta pertinente es, si pese a esto, el cerebro humano tiende de manera natural, a desechar la información no relevante y basar su conducta solo en la información relevante (en este caso la del estímulo variable). Pero si esto fuera así, entonces se verían sesgos o desviaciones en las curvas sigmoides ajustadas a los datos conductuales, que serían producto de la asignación arbitraria de valores a las frecuencias del estímulo variable. Al observar las gráficas obtenidas al discriminar con distintas frecuencias base, se puede concluir que al menos en los casos de las frecuencias fijas de

12, 18 y 24 Hz (Figuras 9, 10 y 11) no ocurre este fenómeno, pero si con las frecuencias fijas 30 y 36 Hz (Figuras 12 y 13). Si los sesgos en las curvas se explicaran por el fenómeno de categorización, entonces estos sesgos tendrían que observarse en todos los casos, lo cual no resulta cierto, y en consecuencia, los sesgos en las curvas de los casos de 30 y 36 Hz deben explicarse por otras causas que discutiremos más adelante. Por el momento podemos concluir que la explicación más loable es que en el caso de los humanos que participaron en este estudio, la estrategia utilizada fue la discriminación y no la categorización.

### **VIII.II Discriminación táctil f1 fijo vs f2 fijo**

De la Figura 14 es interesante hacer notar que en ambos casos los umbrales de discriminación se incrementan de manera exponencial en función del incremento de los estímulos fijos. La experiencia subjetiva de todos los sujetos indicó que en la medida en la que se incrementó la frecuencia fija, de igual manera se incrementa la dificultad para discernir la diferencia entre f1 y f2. Esto resulta congruente con el modelo de Weber que predice este hecho. Sin embargo, no se encontró una diferencia significativa entre ambas distribuciones ( $ROC = 0.36$ ,  $p = 0.21$ ), pese a que aparentemente existe un incremento exponencial de los umbrales de discriminación mayor cuando f1 permaneció fijo (ajuste en azul; Figura 14), que durante la condición f2 fijo (ajuste en rojo; Figura 14). Podría en todo caso existir una tendencia que divide ambas distribuciones aunque no sea de manera significativa. Dado que en ambos casos se trató de la misma modalidad sensorial, dicha diferencia aparente solo podría ser explicada en términos de la condición experimental. La diferencia radica en la ubicación del estímulo fijo. En el primer caso, las frecuencias a discriminar o frecuencias variables, se presentan en f2 y por lo tanto son más próximas en el tiempo a la decisión y a la ejecución motora. Al observar la Figura 14 se podría inferir que la capacidad de los sujetos para discriminar frecuencias es mayor cuando el estímulo fijo se presenta en f1. Descartando el fenómeno de categorización, aparentemente la memoria de f1 se vería en alguna medida degradada como producto del tiempo inter-estímulo y, en consecuencia, la capacidad para discriminar ambos estímulos se vería igualmente degradada. Este fenómeno es concordante con estudios previos que muestran que la información durante el periodo de memoria se ve afectado cuando varía el periodo de memoria (Brody *et al.*, 2003) y que la conducta se ve afectada (Lemus *et al.*, 2007).

### **VIII.III Discriminación auditiva f1 fijo vs f2 fijo**

Es interesante notar que al igual que con el caso táctil, la discriminación auditiva pareciera verse afectada por la memoria (Figura 15), pero la diferencia entre las distribuciones de los umbrales de discriminación en los casos f1 fijo y f2 fijo no resultaron significativamente distintas ( $ROC = 0.28$ ,  $p = 0.21$ ). Por otro lado, las curvas ajustadas a los umbrales de discriminación de las condiciones auditivas, muestran un comportamiento exponencial en función de las frecuencias fijas, lo cual sugiere que la capacidad para discriminar frecuencias en el rango de flutter se aproximan a las predicciones del modelo de Weber. Previamente se ha considerado que en esta tarea existe una correlación entre las fracciones de Weber y la diferencia entre la frecuencia de f1 y f2 (Verguts, 2007; Deco *et al.*, 2007). Sin embargo los modelos no predicen la manera en la que las fracciones de Weber se modulan en función del tiempo inter-estímulo. Si bien el presente estudio no pretendió encontrar la modulación de dichas fracciones en función del tiempo, es posible que la aparente diferencia entre las condiciones f1 fijo vs f2 fijo se deba a un fenómeno de pérdida de información debido al intervalo inter-estímulo. En todo caso resulta interesante que tal diferencia aparente es la misma para las modalidades táctil y auditiva.

### **VIII.IV Discriminación táctil vs auditiva**

Para rechazar la hipótesis nula de que la capacidad para discriminar frecuencias en el rango de flutter es la misma para la modalidad táctil y auditiva, sería necesario encontrar diferencias significativas entre las distribuciones de la condición táctil f1 fijo y auditivo f2 fijo (Figura 16), así como entre las condiciones táctil f2 fijo y auditivo f2 fijo (Figura 17). Dado que la única diferencia en estos casos es la modalidad sensorial, cualquier diferencia significativa supondría precisamente una diferencia en la manera de procesar ambas modalidades. Sin embargo, en ninguno de los dos casos se encontraron diferencias significativas ( $ROC = 0.44$ ,  $p = 0.41$  y  $ROC = 0.44$ ,  $p = 0.31$  respectivamente; Figuras 15 y 16). Es interesante que pese a que no se rechazó la hipótesis nula, de cualquier manera el cerebro posee un mecanismo para discernir la procedencia de la información en el rango de flutter. Dicho de otra manera, tenemos por ejemplo la capacidad de discriminar entre un estímulo de 10 Hz táctil y un estímulo de 10 Hz auditivo. Sin duda el hecho de que la entrada de información sensorial en estas modalidades sea distinta, establece una diferencia anatómica que quizás a nivel de las cortezas primarias se correlacione con la percepción de la modalidad. Sin embargo, la

ausencia de diferencias en el cómputo de información para las frecuencias en el rango de flutter, supone un procesamiento central que es independiente de la modalidad sensorial. La alternativa sería que cada modalidad sensorial computara de la misma manera la información del flutter y que este cómputo se mantuviera disgregado en cerebro en las respectivas modalidades sensoriales. Si bien esto pareciera ser un mecanismo redundante por parte del cerebro, no puede ser descartado, por lo cual es necesario realizar experimentos neurofisiológicos que despejen esta interrogante.

### **VIII.V Fracciones de Weber en el rango de flutter**

En todas las condiciones experimentales probadas se observan incrementos en los umbrales de discriminación en función de las frecuencias fijas. Los mejores ajustes a las distribuciones de los umbrales fueron curvas exponenciales debido a que los sesgos en las curvas de discriminación fueron más evidentes en las frecuencias fijas de 30 y 36 Hz. Dado que el comportamiento no es lineal, la mejor explicación de dicho fenómeno es el predicho por el modelo de Weber, el cual establece que para que sea perceptible la diferencia entre dos estímulos, estos deben diferir en una proporción constante. En los experimentos que realizamos, el incremento de las frecuencias base es de 6 Hz pero la diferencia entre  $f_1$  y  $f_2$  siempre se dio en pasos de 2 Hz, y por esa razón el comportamiento final se ajusta a un modelo exponencial. Esta tendencia se ilustra en la figura 18 donde se grafican las fracciones de Weber en función de las frecuencias fijas. Queda claro entonces que para que el comportamiento fuese lineal, hubiera sido necesario incrementar las diferencias entre  $f_1$  y  $f_2$  en proporción al incremento de las frecuencias fijas.

## **IX CONCLUSIÓN**

El resultado de nuestros experimentos sugiere que tanto para la modalidad táctil como para la acústica, la capacidad para discriminar entre 2 frecuencias en el rango de flutter se ajusta al modelo de Weber, teniendo por lo tanto que: al incremento en la magnitud de las frecuencia base o de referencia le corresponde un incremento exponencial en la capacidad para percibir la diferencia entre ellas. Por otro lado, el resultado de nuestros experimentos no pudo descartar la hipótesis de que los humanos poseen la misma capacidad para discriminar frecuencias en el rango de flutter independientemente de que las frecuencias provengan de estímulos táctiles o acústicos. Estos datos son valiosos al momento de realizar un experimento electro fisiológico que incluya percepción de estímulos de ambas modalidades. Posteriormente la integración de los datos conductuales y electro fisiológicos pueden ser usados para la elaboración de dispositivos que permitan percibir a humanos con limitaciones en estas vías sensoriales.

## X LITERATURA CITADA

Ahissar E., Vaadia E. Oscillatory activity of single units in a somatosensory cortex of an awake monkey and their possible role in texture analysis. *Proc Natl Acad Sci USA*. 87(22): 8935–39. 1990

Alcaráz del Río I. 1992. *Elementos de anatomía humana*. 13ª ed. México. Méndez Editores, 1992.

Almagía F. 2006. *Neuroanatomía Básica: Sistema sensorial somático*. Facultad de Ciencias. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Barcelona, España.

Bendor D., Wang X. Differential neural coding of acoustic flutter within primate auditory cortex. *Nat. Neurosci*. 10:763-71. 2007.

Blanco M. 1996. *Psicofísica*. Editorial Universitas. Madrid, España.

Bonnet C. Psicofísica de los tiempos de reacción: teorías y métodos. *Revista Latinoamericana de Psicología*. 26: 431-44. 1994.

Braun E. 2002. *El saber y los sentidos*. FCE. México.

Briar C. 2004. *Lo esencial del sistema nervioso*. 2ª ed. ELSEVIER. Madrid, España.

Brady, R. 1996. La piel. En: *Curso programado de anatomía y fisiología*. Limusa. México.

Brody D., Hernández A., Zainos A., Romo R. Timing and neural encoding of somatosensory parametric working memory in macaque prefrontal cortex. *Cereb Cortex*. 13(11): 1196-207. 2003.

Caetano G, Jousmaki V. Evidence of vibrotactile input to human auditory cortex. *Neuroimage*. 29(1): 15-28. 2006.

Córdova A., Ferrer R., Muñoz E., Villaverde C. 2002. *Compendio de fisiología para ciencias de la salud*. Mc Graw-Hill. Madrid, España.

Deco G, Pérez-Sanagustín M, de Lafuente V, Romo R. Perceptual detection as a dynamical bistability phenomenon: a neurocomputational correlate of sensation. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 104(50): 20073-77. 2007.

Drake R., Wayne V. 2005. *Anatomía para estudiantes*. ELSEVIER. Madrid, España.

Dykes M. 2003. *Lo esencial en anatomía*. 2ª ed. ELSEVIER. Madrid, España.

Fechner G. 1860. Elements of psychophysics. Cap. VII. Sitio web: file:///D:/Agosto25/Apoyo/Classics%20in%20the%20History%20of%20Psychology%20--%20Fechner%20%281860\_1912%29.htm

Foxe J., Wylie G., Martinez A., Schroeder C., Javitt D., Guilfoyle D., Ritter W., Murray M. Auditory-somatosensory multisensory processing in auditory association cortex: an fMRI study. *Journal Neurophysiology*. 88(1): 540-53.

Fanjul M., Hiriart M. Fernández de Miguel F. 1998. *Biología funcional de los animales. México Siglo XXI. Facultad de Ciencias, UNAM.*

Gidean N. 2006. *Principios de biología, enfoque humano. 2ª ed. LIMUSA WILEY. México.*

Goldman-Rakic S, Selemon D, Schwartz L. Dual pathways connecting the dorsolateral prefrontal cortex with the hippocampal formation and parahippocampal cortex in the rhesus monkey. *Neuroscience*. 12(3): 719-43. 1984.

Guyton A., Hall E. 2006. *Tratado de fisiología médica. 11ª ed. ELSEVIER. España.*

Hernández A., Salinas E., Garcia R. Romo R. Discrimination en the sense of flutter: new psychoophysical measurements in mokeys. *J Neurosci*. 17(16): 6391-6400. 1997.

Hernández A., Zainos A. Romo R. 2000. Neuronal correlates of sensory discrimination in the somatosensory cortex. *Neurobiology* 97: 6191-96.

Hernández A., Zainos A. Romo R. Temporal Evolution of a Decision-Making Process in Medial Premotor Cortex. *Neuron*. 33: 959-72. 2002.

Higashida B. 1991. *Ciencias de la salud. 2ª ed. Mc Graw-Hill. México. Pp. 117-128.*

Houssay A. 1994. *Fisiología humana. 4ª ed. Ateneo. Buenos Aires, Argentina. Pp. 991-992.*

Kaernbach C, Schröger E., Müller H., 2004. *Psychophysics beyond sensation. Lewis and variants of humans cognition. LEA. Leipzig, Germany.*

Kayser C., Petkov I., Augath M. Integration of touch and sound in auditory cortex. *Neuron*. 48(2): 373-84. 2005.

Kandel E. 1997. *Neurociencia y conducta. Madrid: Prentice Hall.*

Kandel E. Schwartz H., Jessell M. 2000. *Principles of neural science. 4ª ed. Mc Graw-Hill. USA.*

Lemus L. 2002. *Codificación neural de la memoria de trabajo en la corteza prefrontal del mono reshus. Tesis (Licenciatura). Facultad de Ciencias, UNAM. D.F., México.*



Lemus L., Hernández A., Luna R., Zainos A., Nacher V. Romo R. Neural correlates of a postponed decision report. *Nature Neuroscience*. 104(43): 17174-79. 2007.

Lemus L., Hernández A., Romo R. Neural encoding of auditory discrimination in ventral premotor cortex. *PNAS*. 106(34): 146401-4650. 2009.

López I., Carles J. Herranz K. El estudio de los aspectos perceptivos en la acústica ambiental. *Revista de Acústica*. 31(2,3): 2-16. 2007.

Luna R., Hernández A., Brody C., and Romo R. 2005. Neural codes for perceptual discrimination in primary somatosensory cortex. *Nature neuroscience*. 8(9): 1210-1219. 2003.

Maiche A, Estaún S. 2009. 10 años y algunos ausentes: el caso de la psicología cognitiva. Universidad Autónoma de Barcelona. Sitio web: [http://psicol93.uab.es/visio/publi/articulos/ps\\_cog.pdf](http://psicol93.uab.es/visio/publi/articulos/ps_cog.pdf).

Mountcastle V., Darian-Smith I., Kornhuber H. A neural basis for the sense of flutter-vibration. *Science*. 155: 597-600. 1967.

Mountcastle, V., Talbot H., Sakata H., Hyavarien J. Cortical neuronal mechanisms in flutter vibration studied in unanesthetized monkeys. *J. Neurophysiol*. 32: 453-484. 1969.

Mountcastle V., Steinmetz A., Romo R. Frequency discrimination in the of flutter: postcentral events in behaving monkeys. *J Neurosci*. 10(9): 3032-38. 1990.

Munar E. Rosselló J, Mas C. El desarrollo de la audición humana. *Psicothema* 14(2): 247-254. 2002.

Murray R., Spiegel D. 1991. Distribución de frecuencias. En: *Teoría y problemas de estadística*. Schaums. Mc Graw-Hill. México.

Neuman, Ormann and Kaernbach. 2004. Timing of "perception" and "perception of time" en *Psychophysics beyond sensation*. Scientific Psychology Series. LEA Londres, Inglaterra.

Purves D., Augustine G J., Fitzpatrick D., McNamara J. 1997. The somatic sensory system. En: *Neurociencia*. SINAUER. USA.

Purves D., Augustine G., Fitzpatrick D., McNamara J. 2001. *Invitación a la neurociencia*. Interamericana. México.

Rauschecker J. Processing of complex sounds in the auditory cortex of cat, monkey, and man. *Acta Otolaryngol. Suppl*. 532: 34-38. 1997.

Resnick R., Halliday David., Kenneth S., 1998. *Física*. Compañía editorial continental. México.

Romo R., Salinas E., Hernández A., Zainos A., Lemus L., de Lafuente V. Luna R. Códigos neurales para la percepción. *Revisiones en neurociencia*. 34(4): 363-70. 2002.

Romo R. 2003. Neurobiología de la toma de decisiones. *Mensaje bioquímico*. Vol XXVII. Depto. Bioquímica, Facultad de Medicina. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.

Romo R., Salinas E. Flutter discrimination: neural codes, perception, memory and decision making. *Nat Rev Neurosci*. 4: 203-18. 2003.

Ross J., Adrianus J., Houtsma M. Discrimination of auditory temporal patterns. *Perception & Psychophysics*. 56(1): 19-26. 1994.

Schiffman H. 2004. Sensación y percepción. Un enfoque integrador. Manual moderno. México.

Salinas E., Hernández A., Zainos A., Romo R. Periodicity and Firing Rate As Candidate Neural Codes for the Frequency of Vibrotactile Stimuli. *J Neurosci*. 20(14): 5503-15. 2000.

Schurmann M, Caetano G, Hlushchuk Y, Jousmaki V, Hari R. Touch activates human auditory cortex. 30(4): 1325-31. 2006.

Soto F, Deco G. Multisensory contribution to the perception of vibrotactile events. *Behavioural Brain Research* 196: 145–54. 2009.

Talbot W., Darian-S., Kornhuber H., Mountcastle V. The sense of flutter vibration: comparison of the human capacity with response patterns of mechanoreceptive afferents from the monkey's hand. *J Neurophysiol* 31: 302-34. 1968.

Tortora G. 2002. Principios de anatomía y fisiología. 9ª ed. Oxford University Press. México.

Vargas D., Palacios V. 1999. Anatomía, fisiología e higiene. CECSA. México.

Verguts T. How to compare two quantities? A computational model of flutter discrimination. *J Cogn Neurosci*. 19(3): 409-19. 2007.

Ville C. 1997. Biología. 8ª ed. Mc Graw-Hill. México.