

## ANÁLISIS DE FIJACIONES EN MOVIMIENTOS PARA LOCALIZACIÓN Y RECONOCIMIENTO AUDITIVO DE OBJETOS

Valentín Lunati<sup>a</sup>, Ariel Podlubne<sup>a</sup>, Fernando Bermejo<sup>a,b</sup> y Claudia Arias<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>*Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), FRC - UTN, - UA CONICET, Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina, 50259@frc.utn.edu.ar; aripod@gmail.com, fbermejo@psyche.unc.edu.ar, carias@psyche.unc.edu.ar; <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra>*

<sup>b</sup>*Facultad de Psicología, Universidad Nacional de Córdoba, Enfermera Gordillo esquina Enrique Barros, Ciudad Universitaria. Córdoba, Argentina. <http://www.psyche.unc.edu.ar>*

**Palabras Clave:** Detección de fijaciones, Movimientos sacádicos, Derivación numérica, Percepción-acción

**Resumen.** El análisis del movimiento está siendo cada vez tenido más en cuenta en estudios sobre habilidades perceptuales. El gran desarrollo de técnicas de análisis de movimientos oculares en la percepción visual es una pauta de esta tendencia. En este sentido, dichas técnicas pueden servir como modelo para analizar movimientos en otras modalidades perceptuales. Este trabajo muestra la aplicación de técnicas de análisis de movimientos oculares al análisis del movimiento de otras partes del cuerpo (cabeza o mano) implicadas en pruebas de localización y reconocimiento auditivo de objetos sin claves visuales. Para realizar el análisis, en primer lugar, se acondicionan los datos de movimiento obtenidos en las pruebas mediante un sensor de 6 grados de libertad. Luego, se realiza la simplificación de los mismos a movimientos bidimensionales para obtener su proyección sobre el plano del objeto a localizar o reconocer, a partir de lo cual es posible aplicarles el mismo análisis que a los movimientos oculares. Específicamente, se implementa la detección de fijaciones y movimientos sacádicos mediante un cálculo diferencial bidimensional. Además, se efectúa un estudio del error propio de los datos y el de los diferentes métodos de diferenciación numérica analizados. Finalmente, se calculan diferentes índices para caracterizar el número, duración y posición de las fijaciones así como regiones de interés y estrategias de reconocimiento.

## 1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente el estudio de la percepción se focalizó en el resultado del acto perceptivo, la imagen final que se obtiene a través de cualquier modalidad sensitiva. Nuevas tendencias en ciencias cognitivas replantean nociones tradicionales de este proceso y amplían su campo de estudio. Se considera que la percepción de un agente es inseparable de su movimiento, por lo tanto, cualquier intento de explicarla debe comprender un tratamiento detallado de su actividad exploratoria.

Un fenómeno que se ha vuelto paradigmático a la luz de estos enfoques teóricos es la ecolocación humana, habilidad que resulta crucial para el logro de la movilidad independiente de la persona ciega. Implica generar sonidos (ej. click en la boca) para localizar y reconocer objetos silentes que no se ven, utilizando la información contenida en las relaciones que se establecen entre los sonidos autogenerados y sus reflexiones en los objetos del entorno. La línea de investigación interdisciplinaria en ecolocación humana del CINTRA (UTN FRC, UA CONICET) de larga data está generando interesantes aportes experimentales en el estudio de esa habilidad y de otros fenómenos de (audio) percepción-acción sin claves visuales que surgieron como proyección y expansión natural del primer objeto de estudio. En el presente, se está desarrollando un trabajo de investigación colaborativo con el Grupo Robótica: Acción y Percepción del LAAS, CNRS, Francia. Se busca concretar aportes interdisciplinarios recíprocos desde la Psicología de la Percepción y la Robótica de última generación, en pos de avanzar en la comprensión de la ecolocación humana y de la audición robótica en el contexto de posturas teóricas compartidas por ambos grupos.

Este trabajo propone desarrollar un método para analizar movimientos complejos realizados con una mano o la cabeza en pruebas perceptuales de localización y reconocimiento sin claves visuales. Se busca desarrollar una herramienta, basada en el análisis de los movimientos oculares, que ofrezca un registro detallado de la actividad exploratoria que realizan los participantes. Para ello, se implementa un algoritmo que detecta características específicas de los movimientos, como son las fijaciones y los movimientos sacádicos y que permite calcular diferentes índices de rendimiento. A continuación se presentan los principales argumentos teóricos sobre: nuevas tendencias en ciencias cognitivas, el abordaje experimental con el que se trabaja en la línea de investigación de ecolocación humana y la propuesta de aplicar un método de análisis, similar al de movimientos oculares, en diferentes tareas perceptuales. Posteriormente, se detallan los aspectos técnicos de la propuesta: la obtención de datos, su tratamiento y la implementación del algoritmo. Finalmente, se evalúa la eficacia del método a través del análisis de diferentes ensayos de una prueba de reconocimiento de objetos vía ecolocación.

## 2. PERCEPCIÓN COMO CONTINGENCIA SENSORIOMOTORA

Teorías clásicas de la percepción sostienen que ésta se constituye a través de un proceso inferencial en una serie de pasos, en el que el perceptor elabora una representación de una realidad ya dada. Nuevas perspectivas teóricas niegan la previa existencia de tal realidad y hacen hincapié en el rol fundamental del acoplamiento entre la percepción y la acción para la construcción del objeto perceptual (Noë y Thompson, 2002). Consideran que el ambiente ofrece rica y precisa información que se genera precisamente a partir de la interacción individuo-ambiente estructurada por medio de reglas sensoriomotoras. Principales ejemplos de esta nueva perspectiva son: el enfoque ecológico de Gibson (1979), la teoría enactiva de Garcia (1997) y el enfoque de las contingencias sensoriomotoras de O'Regan y Noë (2001).

El enfoque enactivo sostiene que el acto perceptivo es una consecuencia en acción del aco-

plamiento estructural que se da entre el organismo y el ambiente en busca de significados. En este sentido, la cognición depende del tipo de experiencias que ocurren en un cuerpo que posee determinadas habilidades sensoriomotoras en un contexto biológico, psicológico y cultural (Varela et al., 1992). Particularmente, el enfoque sensorio-motor considera que la calidad de la percepción depende de la habilidad para explorar el ambiente, esto es, percibir es una forma de actuar (Noë, 2005). El individuo -aprendiendo cómo cambia la información ambiental en función de sus movimientos (actividad exploratoria)- establece reglas que vinculan la acción y la percepción formando contingencias sensoriomotoras (O'Regan y Noë, 2001). McGann (2010) sostiene que cualquier intento por comprender cómo se percibe debe tener en cuenta la tendencia adaptativa del perceptor en su relación con el ambiente. En otras palabras, una forma estable de percibir se estructura no sólo por la sensibilidad biológica del perceptor sino que también abarca su meta y el conjunto de habilidades o experticia desarrollada en un determinado tiempo. La realización de una tarea perceptual compleja requiere de patrones de coordinación sensoriomotora distribuidos en el tiempo, de manera consecutiva o en paralelo, y de la participación de diferentes sistemas perceptuales y motores. Varias de estas combinaciones de patrones pueden ser eficaces, sin embargo, algunas pueden serlo más que otras. La organización de patrones de coordinación sensoriomotora que el perceptor utiliza regularmente porque los prefiere, se denomina estrategia sensoriomotora y describe la manera como un individuo se sincroniza a una situación específica mediante la selección y modulación de patrones de coordinación sensoriomotora de acuerdo con normas pertinentes (Buhrmann et al., 2013).

## 2.1. La sustitución sensorial como fenómeno para el abordaje experimental de la percepción

En virtud de los avances logrados en neurociencias y en tecnología, está siendo posible investigar mecanismos fundamentales de la percepción, que hasta el momento sólo habían sido abordados como especulaciones teóricas. Especial mención merece la investigación en sustitución sensorial (SS), fenómeno mediante el cual la información sobre los objetos y el ambiente que normalmente se adquiere a través de uno de los sentidos (ej. visión), puede obtenerse por otro sentido (audición o tacto). Los dispositivos de sustitución sensorial (DSS) son complejos sistemas tecnológicos diseñados para realizar la transformación de la información entre las modalidades sensoriales. Fueron creados con el doble propósito de a) asistir a las personas con discapacidad sensorial en el control de tareas cotidianas y b) estudiar los mecanismos de plasticidad cerebral involucrados. Personas con y sin discapacidad equipadas por primera vez con un DSS, se convierten en participantes nóveles en esta “nueva modalidad perceptual”, con lo cual se hace posible estudiar la génesis de un percepto y los procesos sensorio-motores y cognitivos involucrados (Lenay et al., 2003). Es necesario resaltar que para apropiarse del dispositivo es necesario que el usuario tenga control motor sobre la información de entrada y se someta a un conveniente período de aprendizaje (Bach-y Rita y Kercel, 2003).

Un fenómeno que se ha vuelto paradigmático a la luz de estos enfoques teóricos es la ecolocación humana, habilidad que resulta crucial para el logro de la movilidad independiente de la persona ciega (Arias et al., 2011). Implica generar sonidos propios (ej. click en la boca) para localizar y reconocer objetos silentes que no se ven, utilizando la información contenida en las relaciones que se establecen entre los sonidos autogenerados y sus reflexiones en los objetos del entorno. Por una parte, se considera que la ecolocación es una conducta típica de percepción acción de lazo cerrado -en alusión al sistema de control realimentado: la diferencia entre la salida y la entrada se usa como control para llevar la salida a un valor conveniente- en la que la persona modula la acción para controlar la percepción. La acción está representada por la

actividad exploratoria que el individuo realiza (sonidos propios y movimientos de cabeza y/o bastón) para generar información relevante. La percepción está representada por perceptos tonales y/o espaciales relacionados con la presencia y características de los objetos, que la persona aprende (implícitamente) a percibir probablemente como Gestalts auditivas (Neuweiler, 1990; Arias, 2009). Por la otra, se ha considerado a la ecolocación como un SSS natural viso-auditivo con el que viene equipado el ser humano, donde el “dispositivo” que transforma la información sensorial es el SNC vía un proceso de aprendizaje implícito. (Bach-y Rita y Kerckel, 2003; Arias, 2009).

Los resultados de las investigaciones en este campo de estudio están poniendo en cuestión las nociones clásicas de modalidad sensorial y su localización cerebral. Algunos investigadores argumentan a favor de un funcionamiento amodal del cerebro y proponen una distribución cortical ligada a funciones (ej. localizar objetos) no dependiente de la entrada sensorial (Amedi et al., 2007), mientras que otros hacen hincapié en la conveniencia de redefinir los sentidos según las relaciones de acoplamiento sensorio-motor que se establecen en la interacción individuo-ambiente (Auvray y Myin, 2009).

## 2.2. El estudio del movimiento en la percepción

Como se mencionó, una idea central en estas novedosas teorías cognitivas es que la percepción y la acción están estrechamente unidas, que la percepción implica una exploración activa. La información perceptual relevante se extiende en el espacio y en el tiempo, en tanto la actividad exploratoria es esencial para su recogida (Gibson, 1979). En lugar de presuponer una imagen estructurada previamente, el objeto perceptual se va creando a partir de las interacciones que genere el receptor. El estudio de la percepción, entonces, debe dar cuenta de cómo los cambios en la adquisición de información perceptual hacen variar el control de la actividad exploratoria. En tanto la persona realice un repertorio de acciones que le permita desplegar una estrategia sensoriomotora adecuada, podrá, más allá de la resolución del sensor con que recoja la información, percibir un objeto (Gapenne, 2010). El estudio de la percepción visual desde hace tiempo entiende la necesidad de integrar datos detallados de los movimientos oculares para comprender la adquisición información visual. Stone et al. (2003) afirman que para generar modelos que expliquen cómo se percibe deben confluír la investigación propia de la psicofísica y el comportamiento motor. Entienden a la percepción como un proceso sensoriomotor, como si fuera “el paso final en una danza interactiva entre la sensación y la acción”.

Una tarea perceptual muy simple para abordar el estudio de la visión es pedirle a una persona equipada con un dispositivo de seguimiento de movimientos oculares que mire un objeto ubicado en un determinado lugar. Este comportamiento fue estudiado seriamente desde la década de '50 por científicos que estaban interesados en conocer el movimiento una imagen en las retinas de los participantes y cómo era su percepción. Estos primeros estudios revelaron que había un patrón de movimiento típico: oscilaciones lentas del ojo, interrumpido periódicamente (a lo sumo, 2 o 3 veces por segundo) por movimientos rápidos, cuyos tamaños rara vez excedían los 12-150 ms y que ocurrían simultáneamente en ambos ojos (Kowler, 2011). Desde entonces, la investigación del movimiento ocular ha visto enormes avances. Se conocen las principales vías nerviosas que controlan los diferentes tipos de movimientos oculares y la tecnología de seguimiento de los movimientos se ha desarrollado considerablemente y se han vuelto ampliamente disponibles. De todas maneras, preguntas del estilo ¿cómo se relacionan los movimientos oculares y la percepción? siguen marcando el ritmo de la investigación (Schütz et al., 2011).

### 2.3. Movimientos oculares

Los movimientos del ojo son importantes porque sólo se dispone de una alta agudeza visual en la fovea, la pequeña región circular en la retina central que tiene mayor cantidad de receptores sensitivos. Los movimientos del ojo dirigen la fovea hacia puntos de interés en el campo visual (un proceso denominado foveación). Los movimientos sacádicos son movimientos súbitos y rápidos que ocurren cuando la mirada cambia de un punto de fijación a otro. Duran 45 ms aproximadamente y tienen como finalidad colocar nuevos puntos de interés de la escena visual en la fovea. El control motor de las sacadas implica determinar el punto de interés en el campo visual al que el ojo va a dirigirse y transformar esas coordenadas visuales en un valor de amplitud y dirección para el movimiento del ojo. La finalización de una sacada da lugar a una fijación, momento en que los ojos están relativamente estacionarios, captando la información. Las fijaciones duran en promedio 218 ms, en un rango de 66 a 416 ms (Aivar et al., 2011).

El seguimiento de ojos (eye tracking) es una técnica utilizada para medir el movimiento de los ojos, brinda información sobre qué está mirando una persona en un momento dado y cómo sus ojos se mueven de una ubicación a otra. A partir de estas técnicas es posible realizar un estudio detallado de las fijaciones oculares, los movimientos sacádicos y la trayectoria visual, la secuencia completa de seguimiento ocular que incluye las fijaciones y sacadas de interconexión. Con estos datos es posible calcular diferentes índices para describir los movimientos, entre los más comunes se destacan: cantidad de fijaciones, duración de las fijaciones, cantidad de fijaciones dentro de una determinada área, cantidad de movimientos sacádicos, amplitud de las sacadas y dirección de las sacadas (Poole y Ball, 2005).

### 2.4. Equivalencia entre el análisis de movimientos oculares y el movimiento de otras partes del cuerpo implicadas en tareas perceptuales

Varios autores plantean una equivalencia entre los movimientos oculares y los movimientos de cabeza, tanto para detectar información visual (Populin y Yin, 1998) como auditiva (Perrott et al., 1987). Es decir, los autores, al medir movimientos de la cabeza en diferentes tareas perceptuales, los compararon con los movimientos de los ojos. Asimismo, Gappenne (2010) sugiere que las diferentes modalidades perceptuales comparten mecanismo sensoriomotores comunes que pueden explicar cierta similitud en la exploración que se haga con cada una.

Para la realización de este trabajo, se cuenta con una amplia base de datos de pruebas de localización y reconocimiento auditivo de objetos vía DSSs realizadas en el CINTRA - UTN-FRC / UA CONICET. En cada ensayo de las pruebas, los participantes exploraron el ambiente con movimientos de manos o cabeza según donde lleve el dispositivo, para descubrir dónde se ubica el objeto experimental o decir cuál es su forma geométrica. Más allá de saber si la respuesta fue correcta o incorrecta, resulta de gran interés poder caracterizar los movimientos realizados en cada ensayo para poder dar cuenta si hay una estrategia sensoriomotora más eficiente que otra o qué movimientos brindan más información en estos escenarios perceptuales. Los datos obtenidos en estas pruebas, a grandes rasgos, muestran aspectos comunes con los observados en el registro del movimiento ocular. Sus trayectorias exhiben movimientos exploratorios de gran amplitud entremezclados con periodos estacionarios. Dado esto, se busca analizar estos movimientos a partir de la aplicación de técnicas de análisis de movimientos oculares.

De todas maneras es importante señalar algunas discrepancias evidentes entre estos tipos de datos. La duración de los movimientos de los movimientos oculares (entre 20 y 200 ms) es notablemente menor a la realizada por los otros miembros del cuerpo que se quiere medir (los movimientos de la mano oscilan entre 2000 y 3000 ms). Los movimientos sacádicos son despla-

zamientos de tipo balístico que unen dos fijaciones, por ende de fácil reconocimiento, mientras que los obtenidos en las pruebas son movimientos complejos más difíciles de identificar.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Instrumentación de las pruebas y datos obtenidos

Para la aplicación de las técnicas de análisis se trabajará con los datos de 3 ensayos, obtenidos por participantes adultos con visión normal en la prueba de reconocimiento de objetos con un DSS natural (ecolocación), que se describe a continuación. Prueba de reconocimiento de objetos vía ecolocación: fue resuelta en la cámara silente del CINTRA - UTN-FRC / UA CONICET, utilizando la herramienta de investigación SLyRO (Sistema de Localización y Reconocimiento de Objetos) (Ramos et al., 2009) especialmente construida a tal fin. Como se puede observar en la figura 1, el participante, con la visión ocluida, permaneció sentado con una linterna sónica (dispositivo que emite un haz sonoro) y un sensor de movimientos comercial en una de sus manos. Se usaron placas de material reflejante y diferentes formas geométricas de igual superficie como objeto experimental. En cada ensayo, el experimentador colocó enfrente del participante un objeto experimental de manera aleatoria. Su tarea consistió en autoproducir sonidos con la linterna sónica para generar reflexiones y explorar el ambiente moviendo libremente la mano, con el fin de localizar y reconocer el objeto experimental. Cuando juzgó que tenía suficientes datos para responder, apretó el pulsador para indicar su respuesta y nombró la figura que se presentó, con lo cual el ensayo finalizará. La variable bajo estudio fue: forma geométrica del objeto (cuadrado, círculo y triángulo). Los parámetros del rendimiento son: precisión (diferencia promedio entre la posición real del objeto y la posición percibida); duración promedio de ensayos; aciertos y errores según forma geométrica; trayectoria perceptual realizada en cada ensayo (movimientos de la cabeza o de la linterna sónica). Se registrará además, la vivencia que tuvo el participante de su experiencia en las pruebas luego de finalizar cada una.

Los datos de la posición y orientación de la mano o cabeza del sujeto se capturan mediante un sensor comercial de 6 grados de libertad PATRIOT™ de Polhemus. Este sensor se encuentra integrado en la herramienta de investigación SLyRO desarrollada por el CINTRA - UTN-FRC / UA CONICET. El mismo provee en tiempo real la información de posición (X, Y y Z en coordenadas cartesianas) y orientación (azimut, elevación y rolo) de hasta dos sensores que pueden integrarse fácilmente sobre diversas superficies. El sensor basa su funcionamiento en la utilización de campos magnéticos y trabaja con una frecuencia de muestreo de 60 Hz. Los datos son capturados por un PC mediante un software para la administración de las pruebas y posteriormente procesados utilizando MATLAB.

#### 3.2. Acondicionamiento de los datos para el análisis de fijaciones

Debido a que el sensor de movimientos utiliza campos magnéticos para su funcionamiento, es muy sensible a la presencia de objetos metálicos y, sobretodo, de campos electro-magnéticos estáticos o alternos dentro del área de cobertura del sensor. Por esta razón, se evitó utilizar objetos metálicos en la instrumentación de las pruebas.

En las pruebas desarrolladas, el sujeto debía utilizar un dispositivo, llamado “linterna sónica”, una herramienta de investigación diseñada para realizar pruebas de ecolocación con personas ciegas y con visión normal sin entrenamiento previo en esta habilidad. El dispositivo, que emite un haz sonoro direccional, permite al usuario detectar objetos silentes cercanos a través de las reflexiones producidas. La presencia de esta linterna sonora en el recinto genera una pequeña pero notoria interferencia con el sensor observándose como ruido aleatorio sumado a los

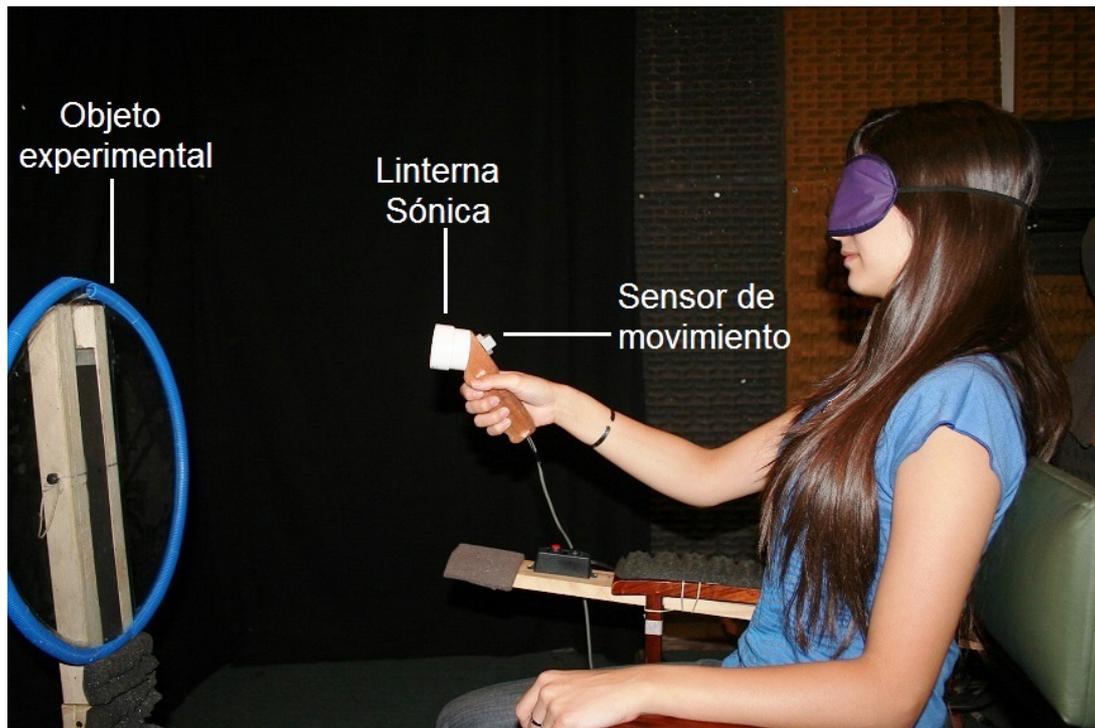


Figura 1: Montaje experimental de la prueba de reconocimiento de formas vía ecolocación.

datos provistos por el sensor durante los periodos de utilización de la linterna. Para eliminar este ruido se aplicó un filtro pasa bajos a los datos de posición y orientación. Tras el análisis de los movimientos más rápidos desarrollados por los sujetos durante pruebas piloto, se determinó que la frecuencia de corte adecuada para este filtro pasa-bajos es de 1 Hz. En base a lo anterior, se implementó el filtro mostrado en la figura 2.

Fue necesaria una adaptación de formatos para ubicar al sujeto dentro del primer octante ( $X+$ ,  $Y+$ ,  $Z+$ ) y se convirtieron los datos de posición y orientación a cm y grados respectivamente. Finalmente, con la intención de simplificar los análisis posteriores, se obtuvo la proyección de los movimientos tridimensionales de la mano del sujeto sobre el plano que contiene al blanco. De esta manera se describen los movimientos en dos dimensiones y se pueden contemplar los efectos de direccionalidad de la linterna sónica utilizada por el sujeto.

### 3.3. Métodos numéricos para la detección y análisis de fijaciones

El objetivo principal en los análisis de movimientos oculares es el de caracterizar la señal en términos de movimientos sacádicos y fijaciones. Para ello, en general se utilizan tres enfoques: el primero consiste en detectar las regiones en que el promedio de la señal del desplazamiento varía abruptamente, indicando de esta manera el final de una fijación e inicio de una sacada, como se muestra en la figura 3.

Otro enfoque ampliamente utilizado es el análisis de la velocidad de los movimientos, mediante la derivada de la señal, localizando las fijaciones en las regiones en donde la velocidad es cero o se mantiene por debajo de un determinado valor, generalmente establecido de manera empírica (Duchowski, 2007). Un tercer y más reciente enfoque se basa en la señal de aceleración de los movimientos, pudiendo diferenciar a partir de la misma los componentes progresivos y regresivos de las fijaciones permitiendo, además, determinar con mayor precisión sus puntos de inicio y fin. (Behrens et al., 2010). Como se describió en la sección 2.3, los movimientos de

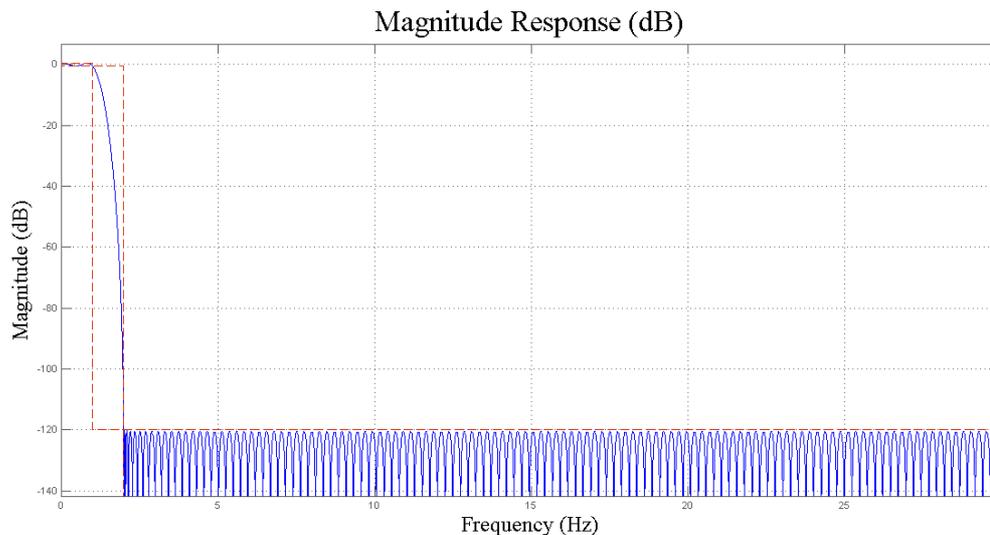


Figura 2: Respuesta en frecuencia (módulo) del filtro aplicado a los datos de movimiento.

ojos tienen un patrón conocido y sumamente estudiado, consistente de movimientos rectilíneos rápidos, las sacadas, intercalados por cambios bruscos de dirección o velocidad, las fijaciones. Estas características hacen que los métodos anteriores sean de una implementación relativamente sencilla y eficiente. Para el procesamiento de los datos de movimientos de mano y cabeza, se optó por el enfoque basado en el cálculo de la velocidad, en otras palabras, la derivada del desplazamiento. Este método presenta la ventaja de su facilidad de cálculo y parametrización. En contrapartida, como el proceso de derivación es numéricamente inestable y tiende a maximizar los errores debidos a ruido aleatorio presente en la señal, como ocurre en los datos disponibles, fue necesario adaptar esta técnica de manera tal de reducir las detecciones de fijaciones falsas.

### 3.4. Cálculo de la derivada

La obtención de la derivada de una función de la cual solo se posee un conjunto discreto y finito de valores se puede resolver mediante una ecuación de diferencias finitas, en este trabajo se implementó la fórmula de diferencias adelantada de 5 puntos expresada por la ecuación 1, la cual puede ser demostrada a partir de la derivación de un polinomio de interpolación, obtenido a partir de los datos, o a partir de la aproximación mediante los polinomios de Taylor (Burden y Faires, 2001). Este método presenta la ventaja de poder utilizar un conjunto grande de valores para obtener la derivada de cada punto, lo cual ayuda a reducir los errores debidos al ruido presente en los mismos.

$$\frac{df}{dt} = \frac{-25f(t) + 48f(t+1) - 36f(t+2) + 16f(t+3) - 3f(t+4)}{12h} + O(h^4) \quad (1)$$

En esta fórmula se observa que el error numérico es del orden  $O(h^4)$ , mucho menor en comparación con el de la expresión de cálculo basado en solo dos puntos el cual es  $O(h)$ . Se realizó su implementación mediante un script en lenguaje MATLAB.

### 3.5. Modelo propuesto para la detección de fijaciones

En este trabajo se buscó construir un método de análisis objetivo de la actividad exploratoria realizada por participantes en pruebas comportamentales de percepción. De acuerdo a las

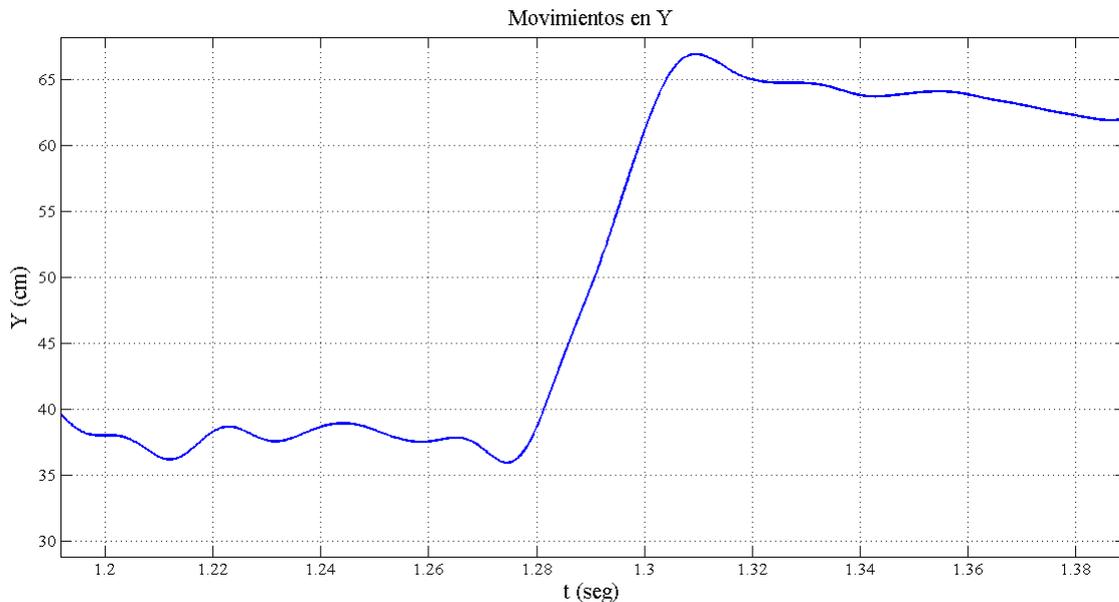


Figura 3: Movimiento sacádico en elevación entre dos fijaciones en las cuales se pueden observar variaciones suaves de la posición.

coincidencias encontradas entre los movimientos sacádicos oculares y los movimientos corporales que se precisan estudiar, se propuso aplicar un modelo equivalente al de reconocimiento de fijaciones oculares, para analizar diferentes movimientos corporales involucrados en tareas perceptuales. El modelo en cuestión se debe encargar de la obtención de datos válidos, esto es, debe ser capaz de instrumentar las categorías de análisis (fijaciones y movimientos sacádicos) de manera confiable y estable en los diferentes ensayos de las pruebas perceptuales. Debido a las diferencias ya mencionadas entre ambos tipos de movimientos y la naturaleza de los datos disponibles, se optó por desarrollar un algoritmo propio para la detección de fijaciones que permita, además, contemplar las particularidades de los mismos.

A fin de mantener las equivalencias entre los análisis se continuaron utilizando los mismos términos para designar periodos de movimiento y periodos estacionarios, esto es, sacadas y fijaciones respectivamente. Para la identificación de las sacadas se tuvieron en cuenta las siguientes especificaciones: son los movimientos que unen dos periodos estacionarios; se clasificaron en trayectorias curvas y rectas según se asemejen más a una forma rectilínea o curva; su orientación (horizontal, vertical u oblicua) fue determinada por sus posiciones inicial y final; se consideraron si son movimientos progresivos (si mantienen la misma orientación que la sacada anterior), regresivos (si tienen la dirección opuesta a la sacada anterior), o bien, si cambian de dirección (cuando los movimientos son cercanos a los  $90^\circ$  en relación a la sacada anterior). Se consideró como fijación a todo periodo de quietud en elevación y azimut, o de pequeños movimientos, donde se asume que la cabeza o la mano finalizó un movimiento mayor, una sacada. Finalmente, debido a que los desplazamientos en profundidad son muy pequeños en relación a los horizontales y verticales, se simplificó el análisis a un modelo bidimensional a partir de la proyección de los movimientos 3D sobre el plano del blanco a reconocer.

En consecuencia, la detección de las fijaciones consistió básicamente en buscar los momentos en que los movimientos se mantienen relativamente estacionarios. Se efectuó el análisis a partir de la señal de velocidad, inspeccionando la misma en búsqueda de los momentos en que

la velocidad se mantiene próxima a cero. Es interesante destacar que los cruces por cero de esta función indicarían la presencia de fijaciones entre sacadas regresivas, es decir, con direcciones opuestas. En este trabajo, para independizar los cálculos de la dirección se trabajó con el módulo del vector velocidad ecuación 2. La discriminación entre sacadas progresivas y regresivas se efectuó a partir de los índices obtenidos posteriormente como se explica en la sección 4.

Posteriormente, se definió un umbral límite dentro del cual se considera que existe una fijación, siguiendo la literatura, se tomó como criterio objetivo el uso de la desviación estándar de la velocidad afectada por un factor constante determinado empíricamente (Duchowski, 2007; Populin y Yin, 1998). Este método basado en un umbral fijo es el más utilizado en movimientos oculares en donde los mismos son bien conocidos. En el caso de los movimientos analizados, se observan grandes variaciones de la velocidad utilizada por los sujetos durante los diferentes ensayos y dentro de cada uno. Esto derivó en la necesidad de adaptar el criterio para cada ensayo sin perder la homogeneidad de los cálculos para posteriores análisis. Para esto, se implementó una definición de umbral adaptativo tomando como referencia trabajos como el de Behrens et al. (2010) en el cual se va recalculando el umbral dentro de una ventana temporal centrada en el punto de interés, en movimientos oculares se utilizan ventanas de un ancho alrededor de 200ms. Para el análisis de los movimientos en estudio se determinó de manera empírica el ancho óptimo de ventana. Este y los demás parámetros serán resumidos posteriormente.

$$|v(t)| = \sqrt{\frac{\partial x^2}{\partial t} + \frac{\partial y^2}{\partial t}} \quad (2)$$

Aplicando este criterio adaptativo sobre la señal de velocidad, se fue construyendo una nueva señal de tipo lógico que toma el valor 1 o 0 cuando el punto analizado corresponde a una fijación o no respectivamente como se muestra en la figura 4. Basándose en esta señal es que se calcularon la mayoría de los índices descritos posteriormente. Como último paso, se aplicó a esta señal un filtro destinado a eliminar falsos positivos definiendo como parámetro la duración mínima que puede tener una fijación, en número de muestras, el cual también fue determinado de manera empírica.

A pesar de los diferentes recursos utilizados, en la literatura se constató que es sumamente difícil alcanzar una efectividad del 100 % en la detección del número de fijaciones (Duchowski, 2007). Esto es debido principalmente a la dificultad de definir con exactitud el concepto de fijación, dando lugar a criterios de detección que detectan casi la totalidad de las fijaciones pero pierden precisión en la duración de las mismas, obteniéndose en consecuencia, fijaciones con grandes amplitudes, lo cual va en contra de su definición. Por otro lado, con criterios más exigentes, se puede perder la detección de un porcentaje de fijaciones, pero se obtienen duraciones y amplitudes más coherentes. La adecuada definición del criterio dependerá de los objetivos del análisis que se desee realizar. El objetivo propuesto para este trabajo fue el de obtener una mayor precisión en el número de fijaciones con el interés de analizar las regiones de interés utilizadas por los sujetos. De esta manera, se logró la construcción de un primer modelo que caracteriza las fijaciones y movimientos sacádicos bajo esta modalidad perceptual descrito previamente en la sección 2.4, con el cual se obtuvo una detección altamente eficiente de las fijaciones y sacadas.

### 3.6. Parametrización del método

Como fue anteriormente explicado, se definieron diferentes parámetros de entrada del algoritmo empleado a fin de optimizar la detección de fijaciones. Los mismos debieron determinarse

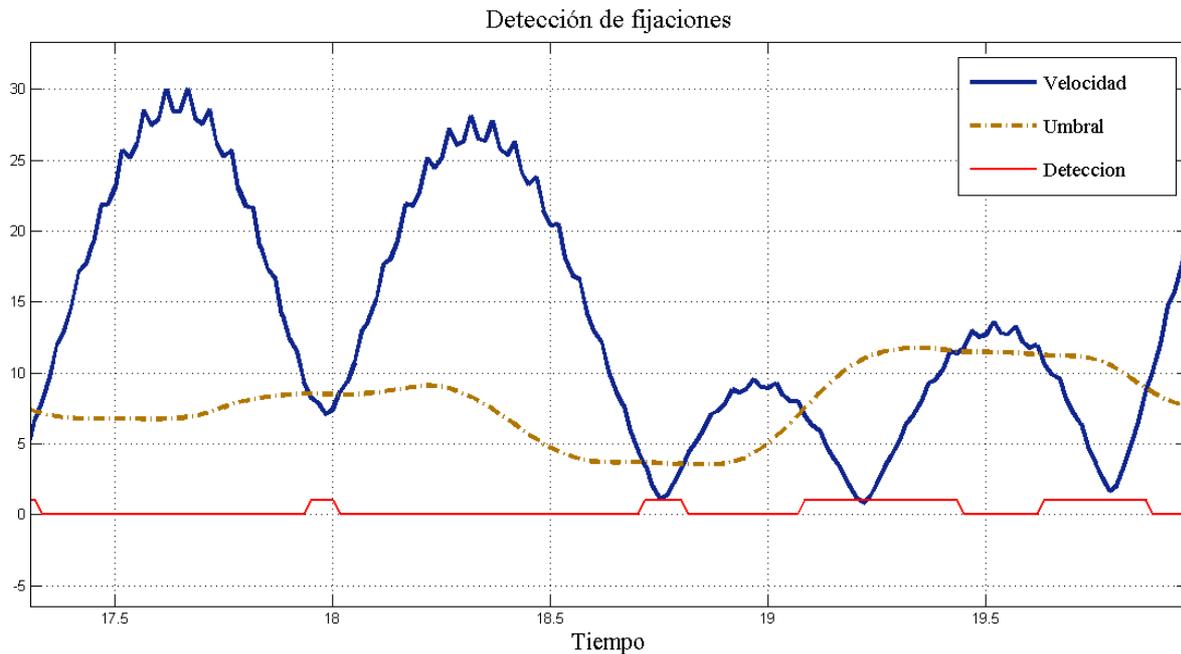


Figura 4: Gráfico que muestra como varía el umbral (línea a rayas marrón) de detección de fijaciones en función de la variación de la velocidad (línea azul). A partir de la comparación entre ambas señales se obtiene una señal de detección tipo lógico (en rojo).

de manera empírica mediante el análisis visual de los gráficos obtenidos. Se evaluaron diferentes juegos de parámetros y se decidió por el que brindó la mayor eficacia en la detección del número de fijaciones. La determinación del número real de fijaciones se realizó de manera visual directamente sobre los gráficos de movimientos tridimensionales de diferentes ensayos y a partir de una previa definición del criterio a seguir para identificar una fijación.

Los parámetros de entrada del algoritmo son: - El factor constante  $k$  aplicado al valor de la desviación estándar de la velocidad en la definición del umbral - El ancho en segundos de la ventana de adaptación del umbral,  $t_v$  - El ancho mínimo de fijación en número de muestras, en este caso, múltiplos de 16ms (periodo de muestreo),  $n_f$ .

En consecuencia, el criterio general para la detección de fijaciones a partir del análisis del módulo del vector velocidad de la señal de desplazamiento puede resumirse de la siguiente manera:

$$Si(|v(t)|) < std(|v(t- > t + t_v)|) * k \wedge duración\_fijación > nk \rightarrow Fijación$$

Se analizaron los conjuntos de parámetros indicados en la tabla 1. Valores fuera de los rangos presentados devuelven resultados que son a simple vista ineficaces. Además, variaciones más pequeñas de los mismos no presentan diferencias substanciales en los resultados. En la tabla 2 se muestran los resultados a partir del análisis de una muestra de 3 ensayos, uno de cada figura. A partir de la misma se eligió la combinación de parámetros P5 con la cual se realizó el análisis de los datos presentado en la sección 4.

Combinación:	k	tv	nf
P1	1	1.5	4
P2	1	1	4
P3	1.5	1.5	4
P4	1.5	1	4
P5	1	1	2

Tabla 1: Combinaciones de parámetros evaluadas

Forma	P1	P2	P3	P4	P5	Inspección visual
Triángulo	67	72	53	55	74	77
Cuadrado	68	66	56	53	71	71
Círculo	73	71	67	61	77	76
% de acuerdo - Trian.	87.0	93.5	68.8	71.4	96.1	-
% de acuerdo - Cuad.	95.8	93.0	78.9	74.6	100.0	-
% de acuerdo - Circ.	96.1	93.4	88.2	80.3	98.7	-
% de acuerdo total	92.9	93.3	78.6	75.4	98.3	-

Tabla 2: Tabla comparativa de eficiencia según parámetros

### 3.7. Análisis de errores

#### 3.7.1. Ruido presente en los datos

Como fue mencionado anteriormente, durante el proceso de adquisición de datos existen diferentes fuentes de interferencia y error que generan ruido presente en las señales a analizar. En primer lugar, el propio sensor varía su precisión en función de la distancia de cada elemento sensor hacia la unidad generadora del campo magnético, esto se muestra en la figura 5 ofrecida por el fabricante. Sumado a este problema de alcance del sensor, se deben sumar interferencias generadas por otros elementos presentes en el rango del sensor que de alguna manera afecten el campo presente, en particular la linterna sonora. A partir de mediciones durante los momentos de quietud se determinó que los errores aleatorios presentes en la señal de movimientos son del orden de  $\pm 0,5^\circ$ .

#### 3.7.2. Errores introducidos por los cálculos

Además de los ruidos propios presentes en los datos, el propio cálculo aporta nuevas fuentes de error. En particular se deben considerar dos: el error de truncamiento y el de redondeo. El primero se origina debido a tomar un número finito de valores para el cálculo de la derivada, en este caso 5. Los errores de redondeo se deben a la precisión y tipo de datos utilizados en los cálculos, en particular en las divisiones por valores pequeños como  $h^4$ . En este caso se utilizaron cálculos en coma flotante de doble precisión. Una manera de reducir los errores de truncamiento

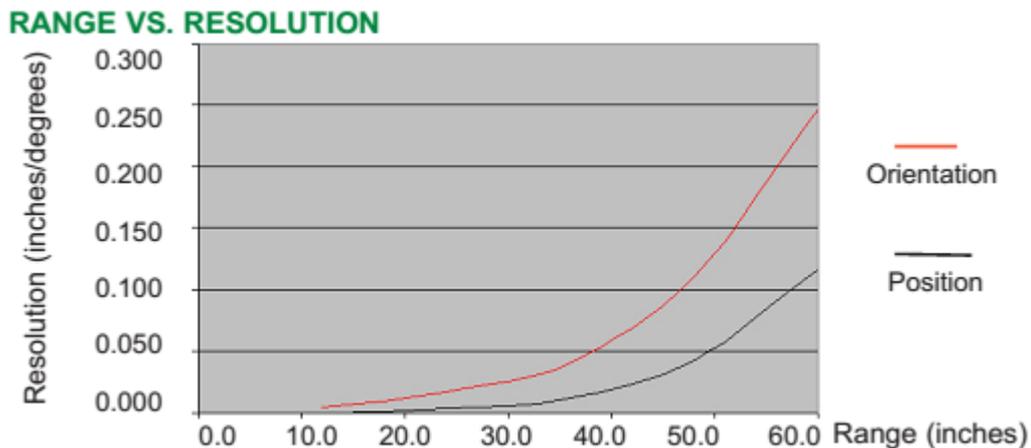


Figura 5: Precisión del sensor en orientación y posición en función de la distancia entre los elementos sensores y el generador de campo. (Polhemus, 2012)

es de reducir el tiempo entre muestras, en este caso el periodo de muestreo, pero reduciendo este valor se incrementan los errores debido al redondeo (Burden y Faires, 2001). Para realizar una estimación y validación del método de diferenciación implementado se calculó la derivada de la función seno y se compararon con los valores ofrecidos por la misma función en MATLAB. De esta manera se obtuvo un error del orden de  $10^{-9}$ , despreciables en relación a los errores propios de los datos y los valores típicos de amplitud de fijación y sacadas.

#### 4. DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

Para la validación del algoritmo de detección de fijaciones desarrollado, el mismo se aplicó a 3 ensayos de las pruebas realizadas, correspondientes uno a cada forma a identificar por el sujeto. Los gráficos de la figura 6 (a), (b) y (c) muestran la trayectoria de los movimientos y las fijaciones detectadas en cada caso: el eje vertical representa la elevación y el horizontal el azimut, ambos se expresan en grados, el tiempo, en segundos. Las líneas delgadas en color rojo ilustran la figura geométrica del objeto experimental, la línea azul gruesa representa los movimientos que realizó el participante y en rojo se especifican cada fijación detectada. Los gráficos de la figura 6 (d), (e) y (f) muestran la distribución espacial de las fijaciones: el eje vertical representa la elevación y el horizontal el azimut, ambos se expresan en grados. Las líneas delgadas en color rojo ilustran la figura geométrica del objeto experimental, los pequeños rombos azules indican las fijaciones realizadas dentro del objeto experimental y los cuadrados negros las fijaciones realizadas por fuera. La cuadrícula celeste mostrada en cada gráfico se pretende utilizar para realizar un análisis por regiones de las fijaciones, como se puede observar en la misma, se delimitan regiones que contienen al interior de cada figura, otras a los bordes y vértices y el resto al espacio exterior de las figuras.

En base a los datos arrojados por el algoritmo se calcularon una serie de índices para caracterizar los movimientos de cada ensayo, ver tabla 3. Por un lado se analizaron los movimientos sacádicos, de los cuáles se obtuvo el dato de posición inicial y final, duración, amplitud y velocidad. Asimismo, se determinó si el movimiento era recto o curvo mediante un coeficiente que toma la relación entre la amplitud del movimiento y la recta ideal que une sus puntos inicial y final, por lo cual un valor cercano a 1 estaría indicando un movimiento rectilíneo. Para determinar si era horizontal, oblicuo o vertical se analizaron las pendientes medias de cada movimiento,

criterio valido si se verifica el anterior, es decir para movimientos rectilíneos. Finalmente, para clasificarlos como progresivo, regresivo o si el movimiento cambiaba de dirección, se realizó una comparación de pendientes entre movimientos sacádicos contiguos. Por otro lado, se analizaron las fijaciones de acuerdo a la duración y a su posición en relación al objeto experimental, si estaban dentro o fuera del mismo. A partir de estos datos es posible realizar un análisis por regiones.

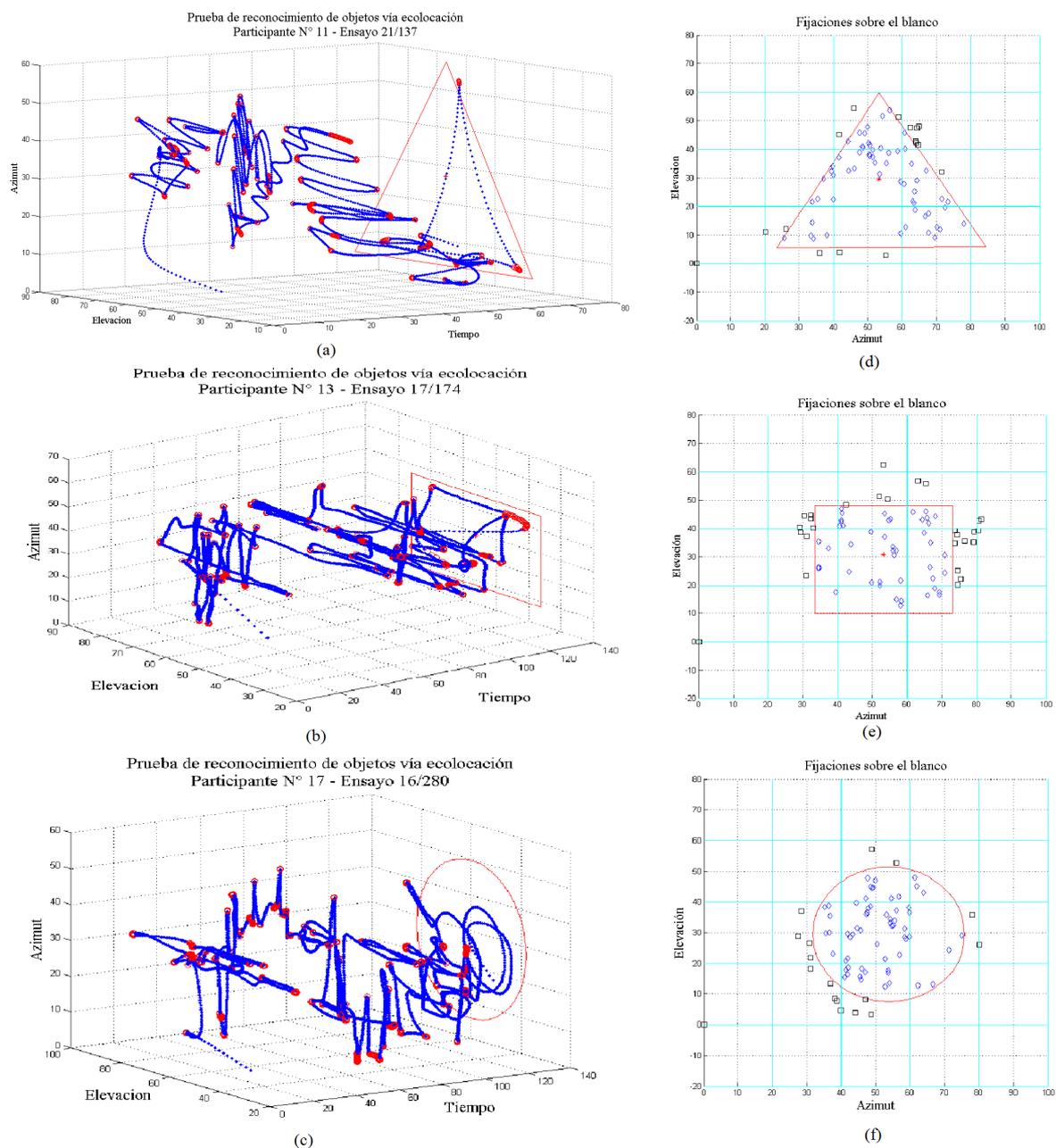


Figura 6: Gráficos de movimientos 3D durante ensayos de reconocimiento de (a) triángulo, (b) cuadrado y (c) círculo. En (d), (e) y (f) se muestra la distribución espacial de las fijaciones de los mismos ensayos.

<b>Figura:</b>	<b>Triángulo</b>	<b>Cuadrado</b>	<b>Círculo</b>
<b>Movimientos Sacádicos</b>			
Cantidad:	69	63	76
Duración (seg)			
Total:	52,23327	107,43376	105,44984
Promedio:	0,7570039	1,7052978	1,3874979
DS:	0,3956294	1,2168637	1,2199762
Amplitud (°)			
Total:	1228,1527	1304,2826	1329,1769
Promedio:	17,799314	20,702898	17,48917
DS:	9,8706803	14,092692	14,021555
Velocidad (°/seg)			
Promedio:	23,479906	12,313235	12,795595
DS:	7,4137071	4,1403593	6,2313636
Tipo de movimiento			
Rectos:	45	40	35
Curvos:	24	23	41
Horizontales:	33	27	22
Oblicuos:	15	9	23
Verticales:	21	27	31
Progresivos:	2	4	15
Regresivos:	54	50	40
Cambios de dirección:	13	9	21
<b>Fijaciones</b>			
Cantidad			
Total:	68	62	75
Dentro del objeto:	54	36	59
Fuera del objeto:	14	26	16
Duración (seg)			
Total:	12,800013	19,033363	21,583328
Promedio:	0,1882355	0,3069897	0,3069897
DS:	0,1797375	0,2383829	0,3069897

Tabla 3: Resumen de índices

## 5. CONCLUSIONES

Se logró implementar un algoritmo utilizando un criterio adaptativo para detectar las fijaciones de los movimientos en estudio. En función de la comparación con la inspección visual de los datos, se obtuvo un conjunto de parámetros que se ajusta adecuadamente a las características del movimiento. Asimismo, es preciso remarcar la versatilidad que ofrecen los parámetros definidos para modificar la sensibilidad del modelo según el criterio que se necesite evaluar.

Los resultados obtenidos en general muestran una buena adaptación del modelo propuesto para el análisis de los movimientos exploratorios realizados con la mano en una tarea de reconocimiento auditivo de objetos. A partir de este modelo, se pudo efectuar una detallada caracterización de 3 ensayos mostrada a través de los gráficos de los movimientos y diferentes índices numéricos. En función de este primer modelado del comportamiento en análisis, se puede realizar un análisis exhaustivo de la base de datos disponible con el fin de refinar el modelo. Se planea evaluar las categorías de análisis utilizadas y la necesidad de agregar nuevos parámetros al modelo. Con respecto a las categorías de análisis, probablemente sea necesario avanzar sobre una definición de movimientos más amplia y detallada que la considerada aquí, que contemple la complejidad de los movimientos presentes. En futuros trabajos, es posible extender el modelo con el análisis a otros índices de movimiento ocular más complejos, como el análisis de movimientos y fijaciones por regiones.

La aplicación de un método de análisis objetivo de la actividad exploratoria apunta a la obtención de datos válidos que puedan ayudar a explicar cómo es la percepción. Justamente, a partir de trabajos como este se busca obtener resultados precisos sobre las relaciones entre acción, dinámica sensorimotora y percepción, de las que aún hay mucho desconocimiento. Dar cuenta de estas cuestiones resulta muy beneficioso para el fortalecimiento de los modelos teóricos enactivos y su potencial aplicación en programas de intervención psicológica y diseño de robots.

## FINANCIAMIENTO

Este trabajo ha sido financiado a través de los PID UNC N° 05/P130 y PID UTN N° 1711.

## REFERENCIAS

- Aivar P., Gómez L., Maiche A., Moreno A., y Travieso D. Sistemas sensoriales y motores. En *Psicología Fisiológica. E. D. Redolar (coord.) Barcelona: UOC. 2011.*
- Amedi A., Stern W.M., Camprodon J.A., Bermpohl F., Merabet L., Rotman S., Hemond C., Meijer P., y Pascual-Leone A. Shape conveyed by visual-to-auditory sensory substitution activates the lateral occipital complex. *Nat Neurosci*, 10:687–9, 2007. ISSN 1097-6256. doi:10.1038/nn1912.
- Arias C. *Ecolocación humana y efecto precedente*. Phdthesis, Facultad de Psicología, Universidad Nacional de Córdoba., 2009.
- Arias C., Hüg M.X., Bermejo F., Venturelli N., y Rabinovich D. Ecolocación humana: Revisión histórica de un fenómeno particular - Segunda parte. *Interdisciplinaria*, 28:73 – 91, 2011. ISSN 1668-7027.
- Auvray M. y Myin E. Perception with compensatory devices: From sensory substitution to sensorimotor extension. *Cognitive Science*, 2009.
- Bach-y Rita R. y Kerchel S.W. Sensory substitution and the human-machine interface. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(12):541–546, 2003.
- Behrens F., MacKeben M., y Schroder-Preikschat W. An improved algorithm for automatic

- detection of saccades in eye movement data and for calculating saccade parameters. *Behavior Research Methods*, 42:701–708, 2010. doi:10.3758/BRM.42.3.701.
- Buhrmann T., Di Paolo E.A., y Barandiaran X. A dynamical systems account of sensorimotor contingencies. *Frontiers in Psychology*, 4(285), 2013. doi:10.3389/fpsyg.2013.00285.
- Burden R.L. y Faires D.J. *Análisis numérico/Numerical Analysis (Spanish Edition)*. I.T.P. Latin America, 2001. ISBN 9706861343.
- Duchowski A.T. *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice*. Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA, 2007. ISBN 1846286085.
- Gapenne O. Kinesthesia and the construction of perceptual objects. En J. Stewart, O. Gapenne, y E. Di Paolo, editores, *Enaction : A new paradigm for cognitive science*, páginas 183–218. MIT Press, Cambridge, 2010.
- García F.V. *de Cuerpo Presente (Spanish Edition)*. Gedisa Editorial, 1997. ISBN 847432419X.
- Gibson J.J. *The ecological approach to visual perception*. 1979. Houghton Mifflin.
- Kowler E. Eye movements: the past 25 years. *Vision Res*, 51(13):1457–83, 2011. ISSN 1878-5646.
- Lenay C., Gapenne O., Hannequin S., Marque C., y Genouëlle C. Sensory substitution: Limits and perspectives. En *Touching for Knowing, Cognitive psychology of haptic manual perception*, página 275–292. John Benjamins Publishing Company, Amsterdam/Philadelphia, y Hatwell, A. Streri et al. Gentaz (eds.) edición, 2003. ISBN 90 272 5185 1.
- McGann M. Perceptual Modalities: Modes of presentation or modes of interaction? *Journal of Consciousness Studies*, 17(1-2):72–94, 2010. ISSN 1355-8250.
- Neuweiler G. Auditory adaptations for prey capture in echolocating bats. *Physiological Reviews*, 70(3):615–641, 1990. ISSN 0031-9333. PMID: 2194220.
- Noë A. *Action in Perception*. The MIT Press, 2005. ISBN 0262140888.
- Noë A. y Thompson E.T. *Vision and Mind: Selected Readings in the Philosophy of Perception*. The MIT Press, first edición, 2002. ISBN 0262640473.
- O'Regan J.K. y Noë A. A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5):939–973, 2001. ISSN 0140-525X.
- Perrott D.R., Ambarsoom H., y Tucker J. Changes in head position as a measure of auditory localization performance: Auditory psychomotor coordination under monaural and binaural listening conditions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 82(5):1637–1645, 1987. doi:10.1121/1.395155.
- Polhemus. Patriot: User manual. 2012.
- Poole A. y Ball L.J. Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Current Status and Future Prospects. En C. Ghaoui, editor, *Encyclopedia of Human Computer Interaction*. IGI Global, 2005.
- Populin L.C. y Yin T.C.T. Behavioral studies of sound localization in the cat. *The Journal of Neuroscience*, 18(6):2147–2160, 1998.
- Ramos O.A., Arias C., Tommasini F.C., Ortiz Skarp A.H., Novillo D., Bermejo F., Hüg M.X., y Lunati V. Movimientos de cabeza en una prueba de ecolocación. *Mecánica Computacional*, XXVIII:123–135, 2009.
- Schütz A.C., Braun D.I., y Gegenfurtner K.R. Eye movements and perception: a selective review. *Journal of vision*, 11(5), 2011. ISSN 1534-7362. doi:10.1167/11.5.9.
- Stone L.S., Miles F.A., y Banks M.S. Linking eye movements and perception. *Journal of Vision*, 3(11), 2003. doi:10.1167/3.11.i.
- Varela F.J., Thompson E., y Rosch E. *De Cuerpo Presente: Las Ciencias Cognitivas y la Experiencia Humana*. Editorial Gedisa, S.A., 1992. ISBN 9788474324198.