

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE MEDICINA
ESCUELA DE POSTGRADO**



**“ESTRATEGIAS DE MIRADA DURANTE LA ADQUISICIÓN SIMULTÁNEA DE
HABILIDADES VISUOMOTORAS”**

JUAN JOSÉ MARIMAN RIVERO

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
CIENCIAS BIOLÓGICAS Y MÉDICAS
MENCIÓN NEUROCIENCIAS**

DIRECTOR DE TESIS: PROF. DR. PEDRO MALDONADO A.

2014

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE MEDICINA
ESCUELA DE POSTGRADO**

INFORME DE APROBACION TESIS DE MAGISTER

Se informa a la Comisión de Grados Académicos de la Facultad de Medicina, que la Tesis de Magister presentada por el candidato

Juan José Mariman Rivero

ha sido aprobada por la Comisión Informante de Tesis como requisito para optar al Grado de Magíster en Ciencias Biológicas y Médicas con mención en Neurociencias el Examen de Defensa de Tesis rendido el día 9 de Mayo de 2014

Prof. Dr. Pedro Maldonado Arbogast

Director de Tesis

COMISION INFORMANTE DE TESIS

Prof. Dr. Pablo Caviedes F.

Prof. Dr. Pablo Venegas F.

Prof. Dr. Adrián Ocampo G.

Presidente Comisión

Este trabajo esta dedicado a nuestra pequeña flor, Rayén.

AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos y aquellas que de alguna manera, directa o indirectamente, me brindaron su apoyo y colaboración durante estos últimos años. En especial a:

Rocío, por todo lo que eres y lo que somos juntos.

A María Inés, Raúl y Sebastián, por acompañarme en cada instante de mi vida, incondicional y amorosamente.

A Pedro, por guiar este trabajo, por su ejemplo como investigador e individuo comprometido con la sociedad.

A Pablo, Daniel, Christ y Enzo, por darme su tiempo y compartir sus conocimientos en momentos críticos de esta investigación.

A Sergio, por mostrarme el rincón escalable de esta facultad.

A cada uno de mis compañeros y compañeras del Laboratorio de Neurosistemas, a los presentes y a los que ya no están, por la fortuna de haberlos conocido.

ÍNDICE

1. Resumen	7
2. Abstract	8
3. Introducción	
3.1. Aprendizaje de modelos de control sensoriomotores	9
3.2. Procesos neurales vinculados al aprendizaje motor	11
3.3. El control de la mirada en ambientes dinámicos	12
3.4. Movimientos oculares como modelo de integración sensoriomotora	13
3.5. Coordinación visuomotora	16
3.6. Pregunta de investigación e hipótesis	20
3.7. Relevancia de la investigación	20
4. Objetivos	21
5. Materiales y método	
5.1. Sujetos	22
5.2. Setup	24
5.3. Tarea	25
5.4. Situación experimental	26
5.5. Identificación de movimientos oculares	27
5.6. Análisis del rendimiento general y la conducta visual en la tarea	28
6. Resultados	
6.1. Rendimiento en la tarea	31
6.2. Aspectos generales del control de la mirada	32
6.3. Preferencia visual en la tarea	41
6.4. Coordinación visuomotora: anticipación y persecución	49

6.5. Relación entre el desempeño en la tarea y la conducta visual	64
7. DISCUSIÓN	67
8. CONCLUSIONES	78
9. BIBLIOGRAFÍA	79
10. ANEXOS	83

1. RESUMEN

Durante el aprendizaje motor se adquieren nuevas relaciones sensoriomotoras representadas por modelos internos de control del movimiento, lo cual permite la predicción de su resultado. Durante tareas visuomotoras, ha sido paralelamente descrito un comportamiento anticipatorio de la mirada frente a cambios en el ambiente como ante el movimiento de los propios segmentos corporales, lo cual da cuenta de su control predictivo. Sin embargo, se desconoce cómo el sistema nervioso resuelve las necesidades sensoriales que demanda la adquisición simultánea de modelos para los movimientos oculares y los segmentos corporales. Catorce sujetos fueron registrados durante la práctica de una tarea tipo videojuego, la cual presento una alteración cinemática en el control del manipulando (cursor). Un sistema de registro de movimientos oculares permitió la evaluación de la conducta visual de los sujetos en el tiempo. El desempeño observado en la tarea se incremento rápidamente en el curso del aprendizaje, acompañado por cambios en la frecuencia y velocidad de los movimientos oculares, especialmente del *smooth pursuit*. Se observó una alta preferencia de visualización por el blanco de la tarea, en comparación con el manipulando, lo cual se acompañó de la anticipación visual del movimiento de ambos componentes. Los cambios en los parámetros de anticipación mostraron una correlación significativa con el incremento en el rendimiento general. De estos resultados se infiere que el sistema nervioso dispone de sus recursos sensoriales preferentemente para la predicción del ambiente. La adquisición simultánea de modelos predictivos fue favorecida por esta estrategia de movimiento ocular, lo cual indicaría una alta interrelación entre ambos procesos. Así, la optimización en el control de la mirada constituye un aspecto fundamental del aprendizaje motor.

2. ABSTRACT

During motor learning new sensorimotor relationships represented by internal models are acquired for the control of movement, which allows the prediction of the outcome. In visuomotor tasks, has been described an anticipatory gaze behavior to both changes in the environment and movements of body segments, which realizes its predictive control; however, it is unknown how the nervous system meets the sensory needs that demand the simultaneous acquisition of models for eye and body movements. Fourteen subjects were recorded during the practice of a game task, which presented a kinematic distortion in the joypad. An eyetracker system allowed the evaluation of the visual behavior of subjects. Performance increased rapidly in the course of learning, accompanied by changes in the frequency and speed of eye movements, especially for *smooth pursuit*. High preference for the visual target was observed, compared with the joypad, which was accompanied by the visual anticipation of both. Changes in the anticipatory parameters showed a significant correlation with the increase in the performance. From these results, we infer that the nervous system gives preference to the prediction of the environment. Simultaneous acquisition of predictive models was favored by this gaze strategy, which would indicate a high interrelation between the two processes. Thus, optimizing the gaze control is a fundamental aspect of motor learning.

3. INTRODUCCIÓN

3.1. Aprendizaje de modelos de control sensoriomotores

¿Qué diferencia a los buenos de los malos jugadores de videojuegos, o qué hace a un operario manual de la construcción más o menos eficiente en el uso de una herramienta? La respuesta puede ser simple, el nivel de habilidad en la actividad, pero ¿Qué significa ser más hábil? Responder esta pregunta nos lleva al ámbito del control motor, donde actualmente se piensa que un aspecto clave, y que caracteriza aquellas conductas o habilidades motoras, radica en la capacidad de anticiparse a los hechos, o sea, en predecir el futuro de nuestras acciones y del mundo que nos rodea (Yarrow et al., 2009).

En situaciones cotidianas, como levantar un vaso desde una mesa, nuestro sistema visual es temporalmente eficaz para informarnos la posición de este objeto y programar un alcance preciso con nuestra mano. En este caso, el retardo en la transmisión de la retroalimentación sensorial es insignificante respecto a la temporalidad de los cambios en el ambiente, que para un objeto estático, no es una variable a considerar. Ahora bien, en situaciones como conducir un vehículo a 50 km/h (13.8 m/s) o enfrentar el saque de tenis de 100 km/h (27.7 m/s), los 100 ms que toma la información visual en llegar a regiones corticales para su procesamiento (Land & Tatler, 2009) nos informan de un obstáculo en la calle que ahora está 1,38 m más cerca, o de la posición del balón que ya ha cambiado 2,77 m. Definitivamente la planificación y ejecución de nuestros movimientos basado solo en la retroalimentación sensorial resultaría imprecisa, y respecto al objetivo de la tarea, incorrecta para los casos señalados. Por este motivo, desde una perspectiva computacional de estudio del movimiento, se plantea que el sistema nervioso central (SNC) genera predicciones de futuros eventos como una forma de complementar, e incluso reemplazar, la información sensorial proveniente del ambiente. Tales predicciones representarían la

relación entre señales sensoriales y los comandos motores vinculados a ellas (Wolpert & Ghahramani, 2000). Si bien tal relación está dada por las consecuencias físicas de nuestros actos, en la forma de retroalimentación sensorial, el SNC realizaría estimaciones sensoriales y motoras previo a la ejecución de los comandos motores (Wolpert & Ghahramani, 2000). Las estimaciones sensoriales constituirían una predicción de la futura consecuencia que tendrá el comando motor seleccionado para la acción en curso. A su vez, las estimaciones motoras generarían el comando motor de tal acción. Tales estimaciones dependen de la experiencia sensoriomotora, por ende, son almacenadas en un tipo de memoria denominado modelo interno. Un modelo interno inverso (“inverso” respecto a la relación sensoriomotora habitual, dado que a partir de la consecuencia sensorial deseada se determina el mejor comando motor para lograr ésta) realizaría las estimaciones motoras del componente cinético (variables de fuerza) y cinemático (variables de posición) del movimiento. En íntima relación, el modelo interno anticipatorio generaría la predicción sensorial del comando motor seleccionado (Lalazar & Vaadia, 2008; Wolpert & Ghahramani, 2000; Wolpert, 1997). Se plantea que cada acto motor simultáneamente es programado y su consecuencia sensorial futura es predicha, por lo tanto, la habilidad en una tarea dependería de ambos modelos internos. A medida que se repite la acción, la evaluación del éxito o fracaso de la misma permitiría corregir el comando motor, así como generar una predicción sensorial más precisa, por ende, la experiencia sensoriomotora modificaría los modelos internos, lo cual constituye un aspecto clave del proceso de aprendizaje motor (Krakauer & Mazzoni, 2011; Lalazar & Vaadia, 2008).

3.2. Procesos neurales vinculados al aprendizaje motor

La especie humana muestra una capacidad destacada de aprender una variedad de habilidades motoras, lo cual involucra ciertos procesos neurales. Primero, los sujetos deben extraer eficientemente la información sensorial relevante para la tarea, deben tomar decisiones y además seleccionar estrategias basadas de esta información. Segundo, a partir de estos elementos se implementan distintos tipos de control sobre los segmentos corporales; y por último, se evalúa el desempeño en curso y se generaliza la habilidad frente a nuevas situaciones a partir de la representación de la misma habilidad almacenada en la memoria motora (Wolpert et al., 2011). El interés de esta investigación se centra en la descripción de la estrategia de control de la mirada utilizada para la extracción de información visual en una tarea particular, junto a sus cambios en el curso de la de la tarea. Al respecto, evidencia conductual refleja diferencias en las estrategias visuales utilizadas por sujetos hábiles versus novatos en la práctica deportiva (Land & McLeod, 2000), lo cual sugiere que el control de la mirada (conceptualmente corresponde al control de los movimientos oculares y la cabeza en el espacio) caracteriza el nivel de habilidad en una tarea. Sabemos que durante el movimiento de la mirada se reconocen instantes de fijación, definido como el movimiento que estabiliza la fovea sobre el punto de interés (Duchowski, 2007), así como de sacadas, definido como aquel movimiento rápido que reposiciona la fovea en un nuevo punto de la escena visual (Duchowski, 2007). La estrategia de mirada esta compuesta por una combinación de fijaciones y sacadas destinadas a lugares específicos de la escena visual, según la tarea en curso. Por ejemplo, en tareas como preparar una taza de té o un sándwich (Land et al., 1999), los sujetos muestran un patrón de fijaciones orientadas casi exclusivamente a objetos relacionados con la tarea, a pesar de que no son éstos los objetos más salientes de la escena. En otras tareas, como conducir un

vehículo, los sujetos muestran patrones de fijaciones hacia puntos relevantes de la ruta, como las intersecciones, lo cual permite una extracción de información de la señalética de tránsito desde los lugares donde probablemente se encontrarán (Shinoda et al., 2001). En tareas particularmente demandantes para el sistema de control de la mirada, como aquellas en que los componentes de la escena visual cambian constantemente y los elementos clave de la tarea muestran rápidos desplazamientos, la mirada muestra una característica aún más llamativa, la de predecir los cambios en variables visuales relevantes del medio externo (Hayhoe et al., 2012).

3.3. El control de la mirada en ambientes dinámicos

Como se mencionó anteriormente, el SNC presenta un retardo significativo en la transmisión de información sensorial y motora, por ende, en muchas ocasiones parece ventajoso planificar los movimientos de manera anticipada respecto a los cambios en el estado del medio externo. Tal es el caso de los movimientos oculares, los cuales muestran características predictivas respecto a, por ejemplo, la futura posición del elemento clave de la tarea. Hayhoe et al. (2012), describieron la estrategia de mirada utilizada por jugadores de squash durante un partido, destacando una estrategia de sacadas y fijaciones orientadas anticipatoriamente a los lugares de la cancha donde la pelota golpearía posteriormente. Tal estrategia fue bastante precisa, la mirada se posicionó a escasa distancia (9 ± 2 grados visuales ($^{\circ}$)) respecto al punto de contacto del balón con la superficie, independiente de la trayectoria del balón. Estudios previos en jugadores de cricket (Land & McLeod, 2000) y en tareas menos complejas, como interceptar objetos en caída libre (Hayhoe et al., 2005) muestran hallazgos similares, lo cual concuerda con la idea de que, para situaciones dinámicas, la mirada sería controlada mediante un mecanismo predictivo (presumiblemente

controlado por un modelo interno) para su posicionamiento preciso en tiempo y espacio; tal mecanismo consideraría la estructura y dinámica de cambio del ambiente (Hayhoe et al., 2012). Por lo tanto, ambientes dinámicos exigirían la adquisición de modelos internos de control que permiten anticipar los cambios en el ambiente y posibiliten un control óptimo de los sensores, en un proceso de percepción activa. Esta idea, sin embargo, tiene su origen en estudios efectuados en ambientes controlados y poco ecológicos, lo cual si bien limita la interpretación de los hallazgos previamente descritos, han brindado evidencia respecto a variables cuantitativas que caracterizan este fenómeno (Freyberg & Ilg, 2008), así como de los mecanismos subyacentes (Krauzlis, 2005), lo cual ratifica la posibilidad de comprender el proceso de integración sensoriomotora a partir del estudio de los movimientos oculares.

3.4. Movimientos oculares como modelo de integración sensoriomotora

Recordando el ejemplo expuesto previamente, alcanzar un vaso desde una mesa requiere conocer la posición del objeto de interés en el espacio. Es quizás esta la primera gran función de los movimientos oculares, la de identificación y localización del blanco visual de la tarea, lo cual es informado a distintas regiones cerebrales en coordenadas oculares. Se piensa que a partir de estas coordenadas es programado el movimiento de alcance de la mano (Crawford et al., 2004), lo cual constituye un primer y claro ejemplo de integración sensoriomotora. Habitualmente la visualización del blanco en la escena requiere la reposición de la mirada mediante una sacada, lo cual permite orientar el centro de la retina sobre el blanco. Estudios en animales (Crapse & Sommer, 2008) han brindado luces respecto a los mecanismos de planificación y ejecución de una sacada; en particular, ahora sabemos que el comando motor sacádico generado hacia los músculos oculares es acompañado de una segunda señal, una copia del comando motor (copia eferente), dirigida

hacia centros superiores del SNC, lo cual permitiría conocer la futura posición del ojo y , consecuentemente, predecir el cambio perceptual tras la ejecución de la sacada. Esto otorgaría la experiencia de continuidad visual de la cual disfrutamos (Sommer & Wurtz, 2006), además de optimizar el control de los segmentos corporales, por ejemplo, al combinar la predicción de la futura posición del blanco con el feedback del mismo posterior a la sacada (Vaziri et al., 2006).

Ahora bien, si el blanco en cuestión despliega un movimiento continuo en el espacio, el sistema oculomotor responde habitualmente mediante un tercer tipo de movimiento, en este caso, de seguimiento o *smooth pursuit*. Este movimiento ocular busca reducir el desplazamiento del blanco sobre la retina, así como mantener la fovea retiniana sobre el blanco, lo cual optimiza su percepción durante su desplazamiento (Barnes, 2008). Clásicamente se ha planteado que el movimiento de *smooth pursuit* esta controlado por un mecanismo mediado por feedback, ya que el desplazamiento del blanco sobre la retina generaría la señal para ajustar la posición del ojo sobre el mismo. De esta manera, el seguimiento del desplazamiento de elementos en una tarea dependería del feedback visual en una manera bottom-up (Rothkopf et al., 2007).

A la luz de las ideas previamente enunciadas, es claro que la generación de un *smooth pursuit* demanda, además, otros procesos cognitivos, lo cual ha impulsado la investigación hacia su caracterización. Atención, selección y toma de decisiones, predicción y aprendizaje son algunos de los procesos detrás de la implementación de un *smooth pursuit* (Barnes, 2008), lo cual sitúa a los paradigmas oculomotores como útiles modelos de investigación, aplicados incluso en el estudio de cuadros neurológicos y psiquiátricos (Sharpe, 2008). En particular, ahora se plantea que tanto la iniciación como la mantención de un *smooth pursuit* involucran mecanismos de predicción. Barnes (2008)

destaca dos ventajas de una conducta predictiva: la primera se refiere a superar el retraso en el procesamiento de la información sensorial; la segunda hace mención a la posibilidad de preprogramar movimientos y así disociarlos de su feedback sensorial. Esto último permitiría la ejecución simultánea de varios comandos motores, por ejemplo, para la interacción visual y manual sobre un mismo elemento de la tarea. Respecto al *smooth pursuit*, su control predictivo se reflejaría en la posibilidad de seguir un objeto por un periodo de tiempo posterior a la desaparición del mismo, y en un menor error de fase del seguimiento de un objeto con trayectoria oscilatoria y periódica, en comparación con aquellos que muestran trayectorias irregulares o randomizadas (Fukushima et al., 2013). Otro aspecto predictivo del *smooth pursuit* dice relación con la posibilidad de preparar una respuesta anticipatoria ante estímulos irregulares. Tal situación permitiría, por ejemplo, tomar un objeto en caída libre, o anticipar la trayectoria de un objeto en el aire. Esta conducta requeriría extraer información del movimiento del objeto (predicción de corto plazo), así como generaría una expectativa basada en experiencias previas (predicción de largo plazo; Barnes, 2008). A partir de la evidencia conductual en primates y humanos (Freyberg & Ilg, 2008; Fukushima et al., 2013), ahora se propone que el movimiento de *smooth pursuit* sería controlado por dos modelos, uno de características reactivas, el cual daría cuenta del seguimiento ocular de objetos con trayectorias variables e irregulares, y otro con características predictivas, que a partir de una memoria temporal del movimiento del objeto, permitiría predecir el inicio del movimiento de éste. ¿Qué relación tendría este modelo para el control de los movimientos oculares con aquellos modelos propuestos para el control de segmentos corporales? Autores como Hayhoe (2012) proponen la existencia de un modelo predictivo común destinado al control de todos los efectores relevantes para una tarea particular, lo cual sustentaría la realización coordinada de tareas visuomotoras.

Otros, como Land (2009), proponen que un controlador inicial, o esquema, actuaría como organizador de un plan general, a partir del cual modelos para el control de la mirada y de los segmentos serían desplegados de manera coordinada. Más allá de la discusión teórica al respecto, la evidencia conductual referida a tareas visuomotoras es contundente en plantear una coordinación necesaria y ventajosa entre sensores y efectores, como los ojos y las manos.

3.5. Coordinación visuomotora

Al respecto existen bastantes estudios que han descrito el control de la mirada y los segmentos corporales durante tareas cotidianas como caminar (Patla & Vickers, 2003), preparar una taza de café (Hayhoe et al., 2005) o aprender a conducir un vehículo en la ciudad (Land, 2006), así como en situación recreadas en laboratorio como trasladar objetos en el espacio (Johansson et al., 2001), observar actos motores realizados por otra persona (Rotman et al., 2006) y durante la realización de tareas de alcance secuencial (Bowman, Johansson, Johannson, & Flanagan, 2009). En todas estas tareas, un hallazgo común y característico de la coordinación visuomotora es que las personas dirigen su mirada anticipadamente al lugar del espacio donde posteriormente el segmento corporal será posicionado (Bowman et al., 2009; Crawford, 2004). Tal estrategia de anticipación visual otorga mayor precisión a los movimientos de la mano, permite monitorear la progresión de la tarea y también contribuye a actualizar las transformaciones sensoriomotoras realizadas por los modelos internos, lo cual genera una mayor capacidad de predicción y una conducta motora más hábil (Flanagan et al., 2006). Recientemente ha sido propuesto un esquema explicativo que daría cuenta de la conducta visuomotora (Lalazar & Vaadia, 2008). En él se vinculan modelos internos para el control de sensores (por ejemplo la mirada) y efectores

(los segmentos corporales), lo cual habré interesantes cuestionamientos. A continuación se presenta este esquema (figura 1) tomado de su publicación:

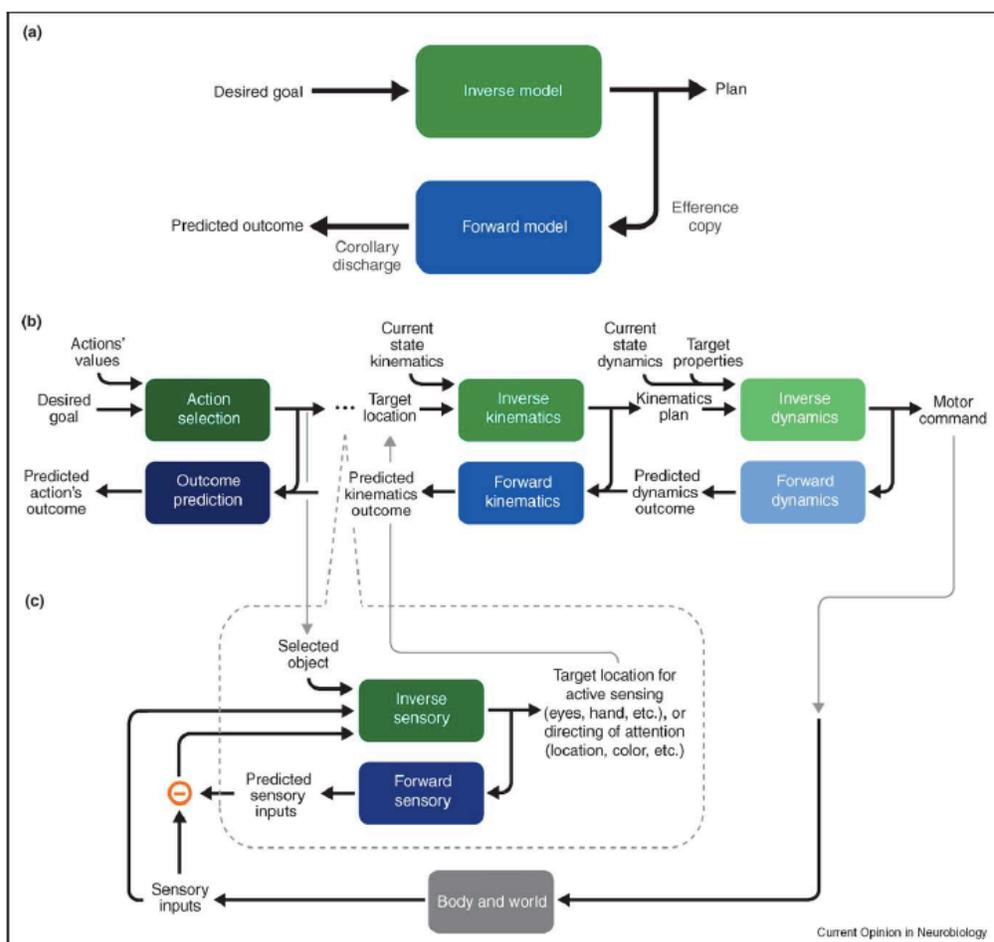


Figura 1. Modelos internos en el procesamiento sensoriomotor. (a) la unidad computacional básica: el modelo inverso y su correspondiente modelo anticipatorio. El modelo inverso transforma el objetivo de la tarea en un plan, dando origen también a una copia eferente de esta señal, la cual es utilizada por el modelo anticipatorio para predecir el resultado del plan, señal llamada descarga corolaria. (b) Serie de transformaciones sensoriomotoras utilizando modelos internos. A partir de un objetivo abstracto, una acción es seleccionada; luego, a través de transformaciones sensoriales, es posible determinar la localización del objetivo, que posteriormente utilizará el modelo inverso cinemático para generar una señal cinemática a partir del estado cinemático actual. Finalmente, y a partir de una estimación del estado cinético, la señal cinemática es transformada por el modelo cinético en un comando motor hacia los músculos. Cada modelo inverso tiene su correspondiente modelo anticipatorio que determina la predicción del resultado de la señal generada en cada fase. (c) Modelos internos en la percepción activa. A partir del objetivo abstracto, se selecciona un objeto que aún no ha sido detectado. El modelo inverso sensorial usa el conocimiento de las características del ambiente para guiar la búsqueda activa del objeto seleccionado (generando movimientos oculares o manuales, así como orientado la atención de manera top-down). Tal proceso genera la localización del objeto deseado, que permite continuar el proceso. Además, el modelo anticipatorio sensorial genera una predicción de la señal sensorial esperada a partir de la señal de búsqueda, lo cual puede ser confrontado con el feedback sensorial para generar un proceso de percepción activa. Traducido de Lalazar et al. (2008).

Bajo esta perspectiva, aquellas tareas visuomotoras que exigen la manipulación de objetos hacia un punto en el espacio (paradigmas habituales en modelos experimentales de tareas visuomotoras) requieren un proceso perceptual activo que busca predecir los cambios en el ambiente y que es implementado mediante modelos inversos y anticipatorios, por ejemplo, para los movimientos oculares, así como un proceso de ejecución motora controlado también por modelos inversos y anticipatorios para los segmentos corporales. Como mencionamos al comienzo de la introducción, la adquisición de estos modelos internos demanda un proceso de aprendizaje, por ende, ante una nueva tarea visuomotoras, se espera un proceso de aprendizaje para el control de los movimientos oculares (estrategia de exploración visual) y de los segmentos corporales. En ambos procesos la información visual juega un rol relevante, dado que el SN requiere recolectar información respecto a (1) los elementos claves de la tarea para programar el control de los movimientos oculares, así como de (2) las consecuencias del movimiento de los segmentos corporales, para su optimización. Ante esta doble necesidad sensorial, ¿Qué estrategias de búsqueda sensorial activa son ejecutadas en el curso del aprendizaje? Considerando lo propuesto por Lalazar et al. (2008), la demanda sensorial del ambiente es esencial para la control de los movimientos en el espacio, por ende en tareas visuomotoras se espera una estrategia de mirada orientada preferentemente hacia los elementos el ambiente, pero que paralelamente entregue el feedback sensorial de los movimientos de los segmentos, necesidad sensorial que debiera disminuir a medida que el aprendizaje progresa. Evidencia al respecto es escasa, y proviene de estudios donde las condiciones del ambiente son estáticas, por ende, la necesidad de adquirir un modelo interno para controlar los movimientos oculares y que permita anticipar los cambios en el ambiente no existe. Aun así, resulta conveniente una breve discusión de tal información para los fines de esta investigación.

Sailer et al. (2005) estudiaron la coordinación visuomotora durante una tarea en que los individuos debían aprender nuevas relaciones entre los movimientos manuales aplicados a un instrumento y su consecuencia en el movimiento de un cursor en una pantalla. El objetivo era desplazar el cursor hacia distintos puntos de la misma. Los autores determinaron que el aprendizaje observado seguía tres etapas secuenciales caracterizadas por cambios en la conducta ocular y en la precisión de los movimientos del cursor. Un hallazgo significativo de este estudio fue que la mirada persiguió al cursor durante la primera etapa del aprendizaje, para posteriormente anticipar su movimiento. La necesidad de feedback visual de los movimientos manuales aplicados al instrumento explicaría la conducta de persecución. Una vez adquirido el modelo interno para controlar manualmente el instrumento, la mirada localizaba el lugar donde el cursor debía llegar, en este caso el blanco de la tarea, otorgando las coordenadas espaciales para mejorar el desplazamiento del cursor, y consecuentemente, la tasa de acierto. Como ya mencionamos, las condiciones del ambiente no imponían un desafío para el control predictivo de la mirada, por ende, no sabemos cómo el SNC resuelve las necesidades sensoriales para la adquisición de modelos de control de los movimientos oculares y de los segmentos corporales en ambientes dinámicos. Esta última condición es similar a aquellos desafíos que enfrentamos en tareas ecológicas, como la práctica de un deporte o la conducción vehicular.

En el ámbito del aprendizaje visuomotor, utilizando un paradigma de movimientos oculares, nos preguntamos:

¿Cómo el sistema nervioso resuelve las necesidades sensoriales que demanda la adquisición de modelos predictivos del ambiente y de los segmentos corporales en tareas visuomotoras?

Hipótesis: En el aprendizaje visuomotor, el establecimiento de modelos predictivos del ambiente demanda mayor información visual que el aprendizaje de modelos para los segmentos corporales (manos). Consecuentemente, en tareas visuomotoras dinámicas, el sistema nervioso utiliza una estrategia de mirada que otorga preferencia a la detección del blanco visual de la tarea, en comparación con la detección del manipulando (cursor), lo cual permite la predicción de sus cambios.

3.6. Relevancia de la investigación

Nuestros hallazgos contribuyen a la comprensión de los mecanismos subyacentes al aprendizaje de tareas visuomotoras. En particular, evidencia conductual de este tipo corrobora lo expuesto por diversos autores respecto al control predictivo de la mirada en ambientes dinámicos, así como profundiza el conocimiento respecto al rol diferencial de la información sensorial en distintas etapas del aprendizaje sensoriomotor y, por ende, de la temporalidad en la adquisición de modelos internos para el control de los movimientos oculares y de los segmentos corporales. Lo anterior contribuye al diseño de programas de entrenamiento de habilidades visuomotoras, así como a programas de reaprendizaje de habilidades perdidas, por ejemplo, tras lesiones neurológicas.

4. OBJETIVOS

General:

Describir los cambios en las estrategias de mirada durante el curso temporal del aprendizaje de una nueva tarea visuomotora y evaluar su relación con el desempeño en la tarea.

Específicos:

- Evaluar el rendimiento general en la tarea mediante curvas de aprendizaje.
- Parametrizar la conducta ocular para discriminar distintos tipos de movimientos oculares.
- Describir la estrategia de mirada en relación a los cambios en la frecuencia de movimientos oculares durante el aprendizaje.
- Caracterizar temporal y espacialmente la conducta ocular respecto a los movimientos manuales y al blanco de la tarea.
- Evaluar la relación entre el rendimiento general en la tarea y los cambios en la conducta ocular.

5. MATERIALES Y MÉTODO

5.1. Sujetos

Fueron reclutados sujetos jóvenes mediante un muestreo por conveniencia, los cuales fueron informados sobre el propósito, características, beneficios y posibles riesgos de la presente investigación. Posteriormente se solicitó la lectura, aceptación y firma de un documento de consentimiento informado, el cual fue aprobado por el Comité de ética de investigación en seres humanos de la Facultad de Medicina de la Universidad de Chile (ver anexo 1). Se consideraron los siguientes criterios de exclusión:

- Padecer trastornos neurológicos o psiquiátricos.
- Padecer problemas visuales no corregidos .
- Poseer una práctica en videojuegos mayor a una hora diaria por cuatro días a la semana durante los últimos 6 meses, o su equivalente en horas semanales en igual periodo mensual (Green & Bavelier, 2003).

Se realizó una primera etapa piloto en Abril del 2012 con 4 sujetos para ajustar la duración, dificultad y setup de la tarea. Posteriormente se registraron 18 sujetos durante los periodos de Junio-Agosto y Noviembre-Diciembre de 2012. Se solicitó a cada sujeto un descanso durante la noche previa de al menos 6 horas, así como no ingerir bebidas con alto contenido en cafeína antes de registro (esta recomendación buscó evitar un estado de midriasis pupilar que impidiera la calibración del equipo de registro ocular). Las mediciones fueron efectuadas preferentemente en la jornada de la mañana, a modo de evitar un efecto circadiano en el rendimiento de los sujetos.

Tras la medición se evaluó la calidad del registro ocular a fin de identificar posible errores técnicos. Los parámetros de error en el registro fueron:

- Distancia entre la mirada y el blanco durante su seguimiento. Este parámetro

permitió identificar aquellos bloques de juego en que se produjo una descalibración del equipo respecto a la posición de la mirada en la pantalla durante la ejecución de la tarea.

- Tiempo en que la mirada se posicionó fuera de los límites de la pantalla.

Se realizó la estimación de la mediana y el rango intercuartil 25-75 de los parámetros en cada uno de los bloques de juego. Posteriormente se cuatificó el número de bloques en que alguna de estas variables superó los límites inferior o superior de la distribución definidos por:

- Limite superior = percentil75 + 1.5 (percentil75-percentil25).
- Limite inferior = percentil25 - 1.5 (percentil75-percentil25).

Tales bloques de juego fueron considerados erróneos. Se incluyeron en la muestra aquellos registros que tuvieron como mínimo 20 bloques de juego sin errores, lo cual generó una muestra final de 14 sujetos. Las características de los sujetos se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Características generales de los sujetos participantes en el estudio

Número de sujetos	14
Edad (promedio ± DS)	27 ± 3 años
Sexo (masculino)	8
Experiencia con videojuegos (promedio ± DS de horas/día)	0.1 ± 0.3
Preferencia manual para escribir (número de diestros)	12
Cansancio visual (EVA, promedio ± DS)	4 ± 2.3
Concentración en el juego (EVA, promedio ± DS)	8.3 ± 0.8

DS = desviación estándar
EVA = escala verbal análoga

5.2. Setup

Los sujetos fueron instalados cómodamente en un sofá frente a una pantalla de computador (pantalla tipo CRT de 19 pulgadas, con una tasa de refresco de 85 Hz y una resolución de 800 x 600 pixels), cautelando que la línea de visión proyectada desde el nasion craneal coincidiera con el centro de la pantalla, y manteniendo una distancia horizontal de 57 cm entre estos dos puntos. Tal distancia permite una correlación de medidas donde 1 cm de desplazamiento de la mirada sobre la pantalla corresponde a 1°. Se ajustó la frente y el mentón de los sujetos con un dispositivo de fijación que restringió el movimiento cefálico y cervical durante la ejecución de la tarea. Además, se dispuso un dispositivo de apoyo para los codos y muñecas, así como de una cubierta sobre sus manos que evitó observar el movimiento de éstas durante la tarea (figura 2A).

Los movimientos oculares fueron registrados mediante un dispositivo de seguimiento ocular (eye-tracker) video-oculógrafo EyeLink II (©SR-Research), con una tasa de muestreo de 500 Hz y con un ruido de posición menor a 0.01°. Este dispositivo fue instalado sobre la cabeza de los sujetos.

Los sujetos controlaron el movimiento de un cursor en la pantalla mediante un dispositivo tipo joypad (Logitech ®). El control de la palanca derecha fue efectuado con la mano derecha, y permitió el desplazamiento multidireccional del cursor. El joypad fue estabilizado en posición horizontal respecto a su soporte para evitar su desplazamiento durante el juego. La señal análoga del joypad fue adquirida con una tasa de 57 Hz mediante el software Python 2.5 (Copyright © 1990-2013, Python Software Foundation).

La tarea fue programada utilizando Python 2.5 y su librería Pygame 1.9, para posteriormente ser integrada con la librería Pylink, lo cual permitió el control del EyeLink

II. El análisis de resultados fue efectuado con los *softwares* Matlab (© 1994-2011 The MathWorks, Inc.) y Prism 6 (© 1994-2013 GraphPad Software, Inc.).

5.3. Tarea

El experimento recreó una situación lúdica y ecológica en el contexto de un videojuego (figura 2B), donde el objetivo fue capturar un blanco en continuo movimiento (fantasma) con el cursor (pacman) controlado por la palanca derecha del joypad. El blanco fue presentado desde dos posibles posiciones (puertas) de la región superior de la pantalla, y desplegó una trayectoria descendente y sigmoidea, con 3 alternativas de velocidad seleccionada de manera aleatoria (tipo 1: velocidad inicial $7^{\circ}/s$, aceleración promedio $1^{\circ}/s^2$; tipo 2: velocidad inicial $15^{\circ}/s$, aceleración promedio $8.8^{\circ}/s^2$; tipo 3: velocidad inicial $22^{\circ}/s$, aceleración promedio $23.3^{\circ}/s^2$). Esto generó 12 posibles trayectorias para el blanco. Este último desaparecía de la pantalla si era contactado por el cursor o colisionaba con el borde inferior o los bordes laterales dentro de un área demarcada (región cuadrículada que correspondió al cuarto inferior de la pantalla, figura 2B). Respecto al cursor, su movimiento fue restringido a esta área y presentó una alteración cinemática (de dirección de movimiento) de 60° en sentido contrario al reloj.



Figura 2. Representación del setup experimental y de la tarea. A- El registro contempló el uso de soporte para frente y mentón, además de un sistema de soporte elasticado para el Eye-tracker. Los sujetos controlaron el cursor con la palanca derecha de un joypad, el cual nunca fue visualizado por ellos (las manos del sujeto fueron apoyadas bajo la mesa presentada en la imagen). B- Se presenta los elementos de la tarea en color blanco (blanco) y amarillo (cursor). Durante el juego solo fue presentado un blanco en el escenario desde cualquiera de las dos puertas (limite superior de la imagen), siguiendo aleatoriamente uno de los 3 tipos distinto de trayectoria (tipo-1 en azul, tipo-2 en celeste oscuro, tipo-3 en celeste claro) hacia derecha o izquierda de la pantalla (sólo se muestra las trayectorias hacia izquierda). El cursor mostró una distorsión cinemática de 60°, de modo que un movimiento hacia arriba en el joypad (flecha transparente) produjo un movimiento hacia izquierda (flecha blanca).

Tras finalizar cada bloque se informó al sujeto el resultado de la tarea, adjudicando un punto por elemento contactado. Esta cuantificación fue utilizada como feedback de su rendimiento y solo cumplió el objetivo de incentivar al participante durante la tarea.

5.4. Situación experimental

El registro comenzó con la calibración del equipo de Eye-tracker, para lo cual se solicitó mantener una fijación visual en 9 puntos distintos de la pantalla. Posteriormente se realizó la validación de tal calibración utilizando el mismo procedimiento. El registro continuó solo si la diferencia entre la posición de calibración y validación fue menor o igual a 0.5°. Efectuado este procedimiento se inició la tarea, para lo cual se solicitó a los sujetos mantener una fijación visual sobre una cruz presentada en el centro de la pantalla y presionar uno de los botones del joypad.

La tarea fue subdividida en 25 bloques de 90 s, con 20 s de pausa entre bloques. Cada 5 bloques se efectuó una recalibración del equipo, lo cual permitió ajustar los

elementos del setup experimental de ser necesario. La duración total de la tarea fue aproximadamente 55 min. La figura 3 muestra la línea de tiempo de los eventos descritos.

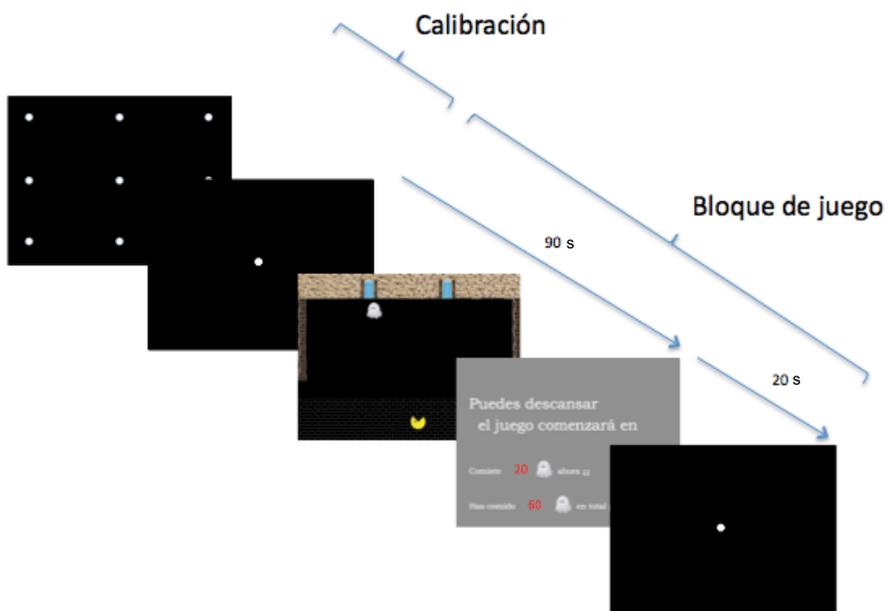


Figura 3. Eventos de la tarea. El experimento comenzó con la calibración de equipo. Tras esto, se presentaron sucesivos bloques de juego, iniciándose con una fijación central por 2 segundos, continuando con 90 segundos de juego y 20 segundos de pausa. Tras 5 bloques se repitió el proceso de calibración. El experimento contempló un total de 25 bloques.

5.5. Identificación de movimientos oculares

Dado que el algoritmo de análisis que provee el sistema de registro ocular no discrimina movimientos de *smooth pursuit*, fue necesario la generación de un algoritmo propio para su identificación. Tras la inspección visual del registro, se identificaron momentos de sacadas, fijaciones y *smooth pursuits* siguiendo las recomendaciones de publicaciones previas (Komogortsev & Karpov, 2013; Salvucci & Goldberg, 2000). La secuencia de análisis fue la siguiente:

- Recolección de datos de la posición de la mirada en la pantalla en los ejes horizontal (X) y vertical (Y).
- Identificación de ventana temporal del pestañeo y reemplazo por posición 0,0.
- Cálculo de la velocidad instantánea, expresada en %/s.

- Filtrado de la señal de velocidad (lowpass Butterworth IIR filter, orden 5, frecuencia de corte 50 hz, Matworks inc.)
- Identificación de ventana temporal de sacadas (periodo de registro que superó el umbral de velocidad (70°/s) y de aceleración calculado como el porcentaje de la distribución acumulada de aceleración equivalente al porcentaje de la distribución acumulada de velocidad para 70°/s), con una duración mínima de 6 ms.
- Eliminación de sacadas inmediatamente antes o después de cada pestañeo.
- Discriminación entre fijación y *smooth pursuit*. Para cada evento (ventana temporal entre dos sacadas sucesivas) se calculó un índice de dispersión (sumatoria de la diferencia entre la máxima y mínima posición en el eje X e Y expresada en °), el vector promedio de desviación (magnitud vectorial a partir de la ubicación promedio en el eje X e Y), y la diferencia entre el ángulo de desviación promedio de la mirada y el movimiento del blanco o el cursor según corresponda. Tras una evaluación visual del registro, se ajustaron los umbrales del índice de dispersión según esta evaluación para conseguir una primera clasificación (fijaciones como aquellos eventos con índice de dispersión menor a 2.1; *smooth pursuit* con índice de dispersión mayor a 2.8). Para los eventos restantes, se considero como *smooth pursuit* aquellos eventos con vector promedio superior al vector promedio de los eventos de *smooth pursuit* clasificados previamente y con diferencia angular menor a 40°. Los restantes eventos fueron clasificados como fijaciones. Para los análisis posteriores, no se consideraron aquellos eventos de fijación o *smooth pursuit* cuya duración fuese menor a 60 ms.

5.6. Análisis del rendimiento general y la conducta visual en la tarea

Dado que la habilidad requerida tenía un componente sensoriomotor mixto (control de la mirada y control manual del joypad), se consideró como variable general de aprendizaje al porcentaje de aciertos o captura del blanco en cada bloque de juego, respecto al total de blanco posibles de capturar. Se cuantifico el porcentaje de aciertos en el bloque completo y según el tipo de trayectoria del blanco, por ende, se obtuvieron 2 tipos de

variables de desempeño.

Para describir la conducta ocular general durante la tarea, se determinó la frecuencia de sacadas, fijaciones y *smooth pursuits* por bloque de juego, para la tarea completa y según el tipo de trayectoria del blanco. Además se determinó la duración, distancia y velocidad de cada uno de estos movimientos oculares (cada parámetro se expresó con la mediana de cada sujeto y el promedio del grupo). Con el fin de caracterizar la estrategia de mirada empleada por los sujetos, se consideraron variables de preferencia visual respecto a los elementos clave del juego (blanco y cursor). Se calculó entonces la preferencia de fijación y *smooth pursuit* hacia el blanco y el cursor, junto con el tiempo en que la mirada se posicionó sobre cada uno de estos elementos. Se consideró que estos elementos fueron visualizados funcionalmente (fovea retiniana posicionada sobre el elemento) cuando la distancia entre el centro de la mirada y el centro de alguno de los elementos fuese menor a 3° visuales (Johansson et al., 2001; Terao et al., 2002), tanto para los eventos de fijación como *smooth pursuit*.

Se entiende como coordinación visuomotora a la covariación de la mirada y el cursor o el blanco en tiempo y espacio. Tal coordinación puede tener características predictivas (anticipación de la futura posición del elemento por parte de la mirada) o reactivas (persecución o seguimiento del elemento). Para caracterizar la coordinación visuomotora, se describió separadamente la relación de la mirada con el cursor o con el blanco. Se considero como *trial* a la ventana de tiempo desde la aparición hasta la desaparición o captura del blanco en la escena.

Respecto al análisis estadístico, se aplicaron test paramétricos si la variable mostró una distribución normal en todos los bloques de juego; caso contrario se aplicaron test no paramétricos. Para el análisis en el tiempo se aplicaron comparaciones múltiples mediante

Repeated Measures ANOVA (RM ANOVA) con un análisis post hoc de Tukey, o Friedman test con análisis post hoc de Dunn. Tal análisis busco determinar el bloque en el cual ocurrió un cambio significativo en la variable en comparación con el bloque inicial. Cuando fue atingente, se determinó el bloque en el cual la variable alcanzó un valor estable, esto es, sin diferencia significativa en comparación con los bloques sucesivos. Para el análisis entre dos variables en un mismo bloque se aplicó T-test pareado o Wilcoxon signed rank test. Para el análisis de más variables, se aplicó ANOVA o Friedman test. El resultado de cada test se considero estadísticamente significativo si su probabilidad de falso positivo fue < 0.05 .

6. RESULTADOS

6.1. Rendimiento en la tarea

Los sujetos presentaron un rendimiento inicial de acierto de $51,1 \pm 3\%$ (promedio \pm error estándar, en lo sucesivo corresponderán a la medida de tendencia central y dispersión utilizadas, a menos que se indique lo contrario), el cual progresó hasta lograr un $83,5 \pm 2,6\%$ en el bloque 25 (RM ANOVA, $F_{(7,3, 95.6)} = 19.3$, $p < 0.0001$, figura 4A). Su rendimiento mostró un rápido incremento desde el tercer bloque de juego (Tukey test, $p = 0.04$), alcanzando el máximo a partir del octavo bloque ($p > 0.99$). El análisis del rendimiento según la trayectoria del blanco, factor que determinaba distintos niveles de dificultad en la tarea, exhibió una tendencia similar. Para la trayectoria tipo 1 (velocidad baja), los sujetos mostraron un rendimiento inicial ($82.1 \pm 2.5\%$) y final ($98.5 \pm 0.7\%$) alto (Friedman test, $p < 0.0001$), incrementándose desde el sexto bloque (Dunn test, $p = 0.03$), excepto para los bloques 7, 9 y 11. Para la trayectoria tipo 2, se observó un rendimiento inicial de $52.3 \pm 5\%$, el cual alcanzó un $93 \pm 2.1\%$ de acierto en el bloque 25 (Friedman test, $p < 0.0001$). El rendimiento aumentó desde el octavo bloque (Dunn test, $p = 0.002$), excepto para el noveno bloque. Para la trayectoria tipo 3 (velocidad alta), se observó un incremento evidente desde $17.1 \pm 3\%$ hasta $59.6 \pm 5.4\%$ (RM ANOVA, $F_{(8,2, 107.3)} = 10.5$, $p < 0.0001$), el cual fue significativo desde el sexto bloque (Tukey test, $p = 0.03$), excepto para el séptimo bloque. Al comparar el rendimiento inicial entre trayectorias, se evidenció un rendimiento mayor en la trayectoria de menor velocidad (tipo1), a su vez, la trayectoria de mayor velocidad (tipo 3) mostró el menor rendimiento (ANOVA con Tukey test, $F_{(2,39)} = 39.3$, $p = 0.0001$). Sin embargo, al finalizar la tarea, el rendimiento entre las trayectorias 1 y 2 fue similar (Friedman con Dunn test, $p = 0.5$), pero distinto respecto a la trayectoria 3

(tipo 1 v/s 3 $p < 0.0001$; tipo 2 v/s 3 $p < 0.001$).

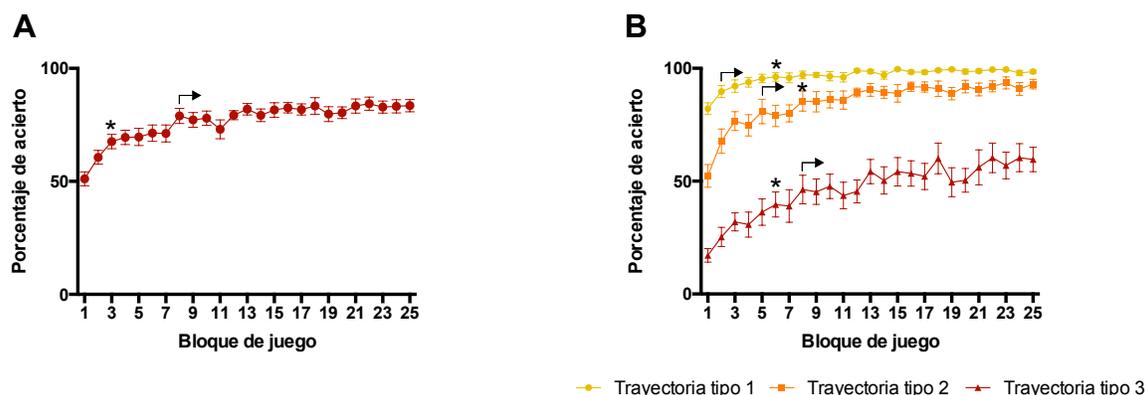


Figura 4. Rendimiento en la tarea. Se presenta el promedio \pm error estándar de la media del rendimiento de los sujetos. **A-** se presenta el rendimiento en la tarea según bloque de juego. Se observa un incremento significativo en el rendimiento desde el tercer bloque (*), el cual aumentó en los sucesivos bloques hasta alcanzar un máximo en el octavo bloque (\rightarrow). **B-** Se observa el rendimiento según el tipo de trayectoria desplegada por el blanco, el cual aumentó desde el 6° u 8° bloque según trayectoria (*), alcanzando el máximo rendimiento tempranamente en el juego (\rightarrow).

6.2. Aspectos generales del control de la mirada

Para entregar una descripción general de los cambios en la conducta visual observados en la tarea, se utilizó cuatro parámetros para cada uno de los tipos de movimiento ocular: frecuencia (número de eventos/s), distancia recorrida, duración y velocidad. Respecto a la frecuencia de movimientos oculares (figura 5A), la frecuencia de fijaciones (0.8 ± 0.1 eventos/s) y *smooth pursuits* (1.1 ± 0.04 eventos/s) fue similar en el primer bloque (Friedman con Dunn test, $p = 0.39$), y menor a la frecuencia de sacadas (2 ± 0.1 eventos/s; respecto a fijaciones $p = < 0.0001$; respecto a *smooth pursuit* $p = 0.002$), lo cual es un hallazgo esperado dado que la secuencia de movimientos oculares siempre contempla el reposicionamiento de la mirada (sacada) entre cada fijación o *smooth pursuit*. Durante el aprendizaje de la tarea, tanto sacadas como fijaciones exhibieron una disminución en el tiempo, la cual solo fue significativa para fijaciones (Friedman test, $p < 0.0001$) a partir del

17° bloque de juego (Dunn test, $p = 0.03$). La frecuencia de *smooth pursuit* mostró una tendencia incremental no significativa en el tiempo (RM ANOVA, $F_{(5.1, 67)} = 1.1$, $p = 0.36$), cambio que fue inverso al observado en la frecuencia de fijaciones, lo cual es evidente en la diferencia observada en el bloque 25 (Wilcoxon test, $p = 0.0001$).

Respecto a la distancia recorrida por la mirada (figura 5B), se observó una magnitud similar tanto durante el *smooth pursuit* ($5.5 \pm 0.4^\circ$ en bloque 1, $6.9 \pm 0.5^\circ$ en bloque 25) como durante sacadas ($5.5 \pm 0.3^\circ$ en bloque 1, $6.2 \pm 0.5^\circ$ en bloque 25; comparación con Friedman y Dunn test, $p > 0.9$ para los bloques 1 y 25), y mayor a la observada durante fijaciones ($2 \pm 0.05^\circ$ en bloque 1, $1.8 \pm 0.05^\circ$ en bloque 25, respecto a *smooth pursuit* y sacadas la diferencia observada tiene un $p < 0.001$). Si bien se observó un incremento en la distancia recorrida por la mirada durante sacadas y *smooth pursuits* en el tiempo, este no fue significativo para sacadas (Friedman test, $p = 0.06$). Para *smooth pursuits* se observó una diferencia general significativa (RM ANOVA, $F_{(5.6, 73.7)} = 2.5$, $p = 0.03$). La distancia recorrida por fijaciones no aumentó en el tiempo, lo cual es consistente y esperable dado los parámetros del algoritmo de análisis.

Respecto a la duración de los movimientos oculares (figura 5C), la menor magnitud se observó en sacadas (0.04 ± 0.001 s en bloque 1), lo cual es similar a lo reportado en estudios previos. Las fijaciones presentaron una duración de 0.2 ± 0.009 s y el *smooth pursuit* 0.5 ± 0.03 s en el bloque 1. Ninguno de estos parámetros mostró cambios significativos en el tiempo para el análisis posterior de comparaciones múltiples, sin embargo la duración de sacadas mostró un incremento global marginal (RM ANOVA, $F_{(5.6, 73.1)} = 2.6$, $p = 0.02$ para sacadas; $F_{(4.7, 62)} = 2.3$, $p = 0.057$ para fijaciones; $F_{(6.3, 82)} = 2.1$, $p = 0.055$ para *smooth pursuits*).

En relación a la velocidad de movimientos oculares (figura 5D), nuevamente se observaron velocidades esperadas para sacadas (132.5 ± 6.1 %/s. en bloque 1), parámetro que se mantiene constante en el tiempo (RM ANOVA, $F_{(5.4, 70)} = 1.1$, $p = 0.36$). De manera sorpresiva, la velocidad de fijaciones fue solo levemente inferior a la de *smooth pursuit*, tanto al inicio de la tarea (8.5 ± 0.4 %/s para fijaciones, 11.4 ± 0.6 %/s. para *smooth pursuit*; T-test pareado, $p < 0.0001$) como al final de la misma (9.8 ± 0.4 %/s., 13.6 ± 0.7 %/s. respectivamente, T-test pareado, $p < 0.0001$). Ambos movimientos mostraron un incremento significativo durante el tiempo, desde el 18° bloque para fijaciones (Friedman con Dunn test, $p = 0.02$; tal diferencia se observa solo en los bloques 18, 20 y 22) y desde el 15° bloque para *smooth pursuit* (Friedman con Dunn test, $p = 0.01$, tal diferencia se observa en los bloques 15, 18, 20, 23 y 25).

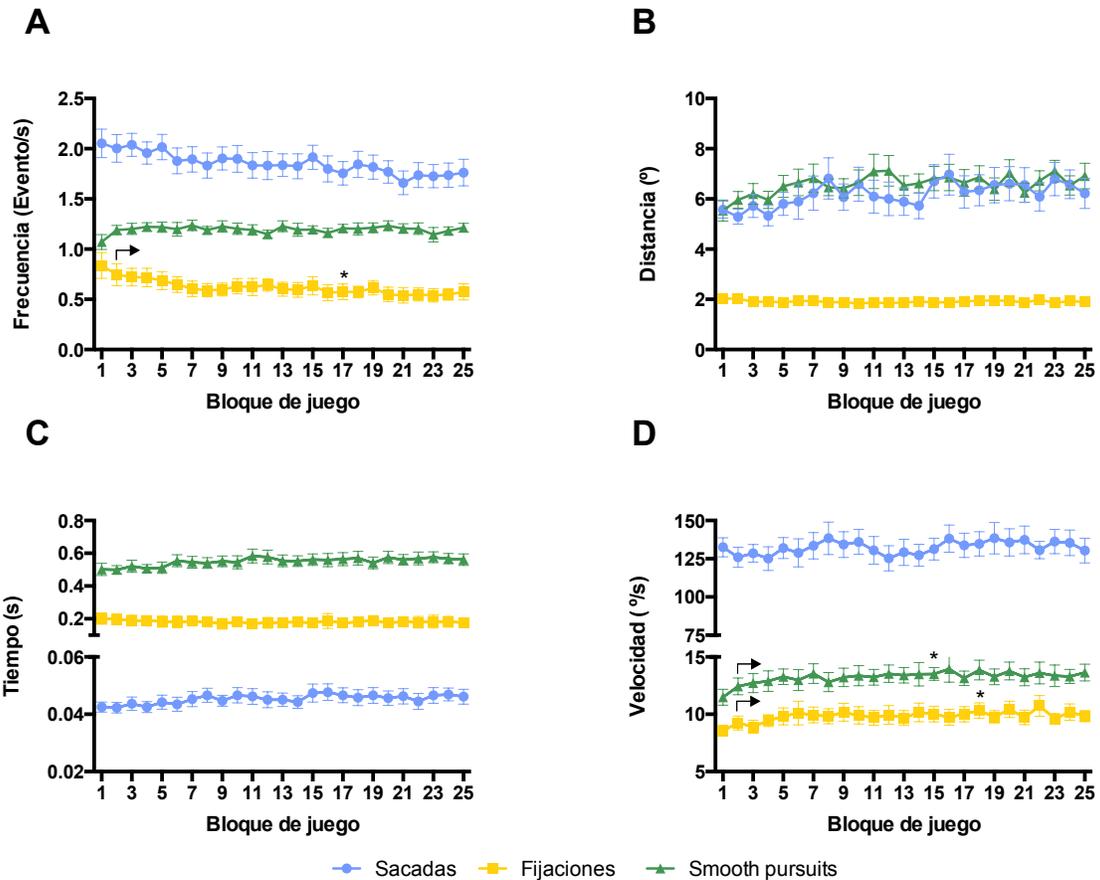


Figura 5. Caracterización general de movimientos oculares. Se presenta el promedio \pm error estándar de la mediana por sujeto de cada tipo de movimiento ocular (sacadas en color celeste, fijaciones en color amarillo, *smooth pursuit* en color verde) evaluado en el tiempo según cuatro parámetros: frecuencia (A) como número de eventos por segundo de juego en el bloque, distancia recorrida (B), duración (C) y velocidad (D). Cada parámetro fue evaluado en el tiempo respecto al bloque 1, indicando aquel bloque desde el cual existe una diferencia significativa (*). En estos casos, se indica también el bloque desde el cual el cambio ya no fue significativamente distinto a los sucesivos bloques (\rightarrow). Todo cambio indicado tiene una $p < 0.05$.

Tanto la dirección como la velocidad del blanco diferenciaron a cada tipo de trayectoria, lo cual implicó que la mirada mostrara rasgos distintivos en los parámetros escogidos según la trayectoria del blanco. Este fue uno de los aspectos centrales de nuestra investigación, ya que refleja la influencia de la variabilidad del ambiente en la conducta visual. Este aspecto se expresa indirectamente en los resultados expuestos, por ende, a continuación se describirán los parámetros de frecuencia, distancia, duración y velocidad de movimientos oculares según la trayectoria del blanco.

La frecuencia de movimientos oculares (figura 6) fue significativamente determinada por el tipo de trayectoria que mostró el blanco, evidenciándose una mayor frecuencia de movimientos cuando los sujetos enfrentaron la trayectoria más rápida (tipo 3). Esto se refleja en la frecuencia de sacadas (1.8 ± 0.1 eventos/s durante la trayectoria tipo 1, 2.4 ± 0.16 eventos/s durante la trayectoria tipo 3, Friedman con Dunn test, $p < 0.0001$) y *smooth pursuit* (0.8 ± 0.07 eventos/s durante la trayectoria tipo 1, 1.4 ± 0.12 eventos/s durante la trayectoria tipo 3, RM ANOVA con Tukey test, $F_{(1.7, 22)} = 29.4$, $p < 0.0001$) observada en el bloque inicial de juego, hallazgo que se mantiene en la frecuencia de *smooth pursuit* durante el bloque final. Los cambios en el tiempo descrito previamente también se observaron en este caso dependiendo del tipo de trayectoria del blanco, evidenciándose una disminución en la frecuencia de sacadas durante la trayectoria 2 (0.4 eventos/s (mediana de las diferencias), Wilcoxon test, $p = 0.003$) como durante la trayectoria 3 (0.5 ± 0.2 eventos/s, T-test pareado, $p = 0.02$). El mismo hallazgo fue observado en la frecuencia de fijaciones para la trayectoria 2 (0.3 eventos/s (mediana de las diferencias), Wilcoxon test, $p < 0.001$) y la trayectoria 3 (0.5 eventos/s (mediana de las diferencias), Wilcoxon test, $p < 0.001$). Durante la trayectoria 1 solo se observó un incremento significativo menor en la frecuencia de *smooth pursuit* (0.2 ± 0.07 eventos/s, T-test pareado, $p = 0.01$).

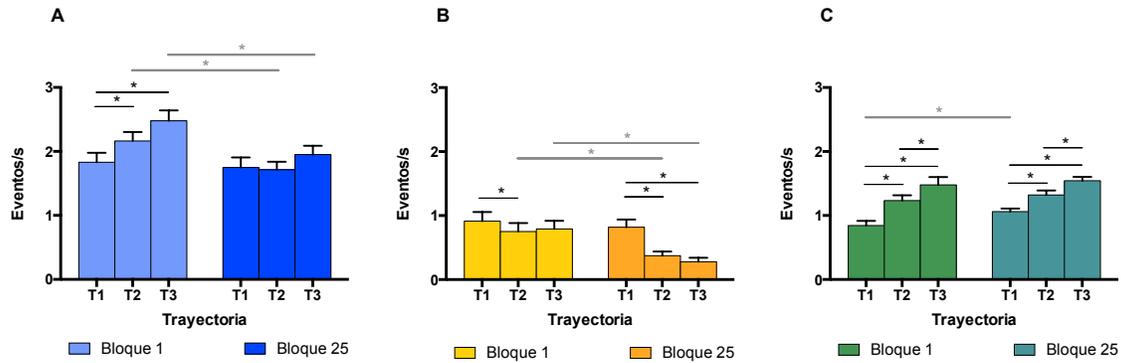


Figura 6. Frecuencia de movimientos oculares según trayectoria del blanco. Se presenta el promedio \pm error estándar de la mediana de la frecuencia de sacadas (A), fijaciones (B) y *smooth pursuits* (C) según el tipo de trayectoria (tipo 1 (T1), tipo 2 (T2) y tipo 3 (T3)), evaluados en el bloque inicial (1) y final (25). Se indican dos tipos de comparaciones, entre trayectorias durante un mismo bloque (*), y para una misma trayectoria en el tiempo (*). Toda diferencia indicada tiene una $p < 0.05$.

El análisis de la distancia recorrida por la mirada (figura 7), mostró cambios en función del tipo de trayectoria durante sacadas como *smooth pursuit*, aunque solo en este último movimiento los cambios fueron significativos, evidenciándose una mayor distancia recorrida cuando la trayectoria del blanco fue más rápida. Durante el bloque 1, la distancia recorrida por sacadas fue menor en la trayectoria tipo 1 ($5.3 \pm 0.4^\circ$), en comparación a la distancia frente a la trayectoria tipo 3 ($6.4 \pm 0.4^\circ$, Friedman con Dunn test, $p = 0.3$), aún cuando no fue significativo. Durante el bloque 25, esta diferencia se mantiene (para la trayectoria tipo 1, la distancia recorrida fue $5.8 \pm 0.5^\circ$, para la trayectoria tipo 3 fue $7.6 \pm 1^\circ$, $p = 0.8$), y si bien existe un incremento en la distancia, este no fue significativo. Durante el *smooth pursuit* del blanco, la mirada recorrió inicialmente $5.5 \pm 0.4^\circ$ frente a la trayectoria tipo 1, $6.2 \pm 0.7^\circ$ frente a la trayectoria tipo 2 y $7.1 \pm 1.3^\circ$ frente a la trayectoria 3 (Friedman test, $p = 0.6$). Tales diferencias se incrementaron cuando analizamos esta variable en el bloque 25, lo cual reflejó un cambio en la estrategia de seguimiento del blanco (RM ANOVA con Tukey test, $F_{(1.8, 24)} = 26.1$, $p < 0.001$), mostrando una distancia de $4.8 \pm 0.3^\circ$

para la trayectoria tipo 1, lo cual fue significativamente menor a los $8.8 \pm 0.9^\circ$ para la trayectoria tipo 2, lo cual a su vez fue menor a los $12.1 \pm 1.2^\circ$ para la trayectoria tipo 3. El cambio observado respecto al bloque 1 fue significativo durante la trayectoria tipo 2 (Wilcoxon test, $p = 0.04$) y tipo 3 ($p = 0.008$). Las fijaciones solo mostraron una disminución marginal en la distancia recorrida durante la trayectoria tipo 2 (en bloque 1 fue $2 \pm 0.07^\circ$, en bloque 25 fue $1.8 \pm 0.07^\circ$, T-test pareado, $p = 0.01$).

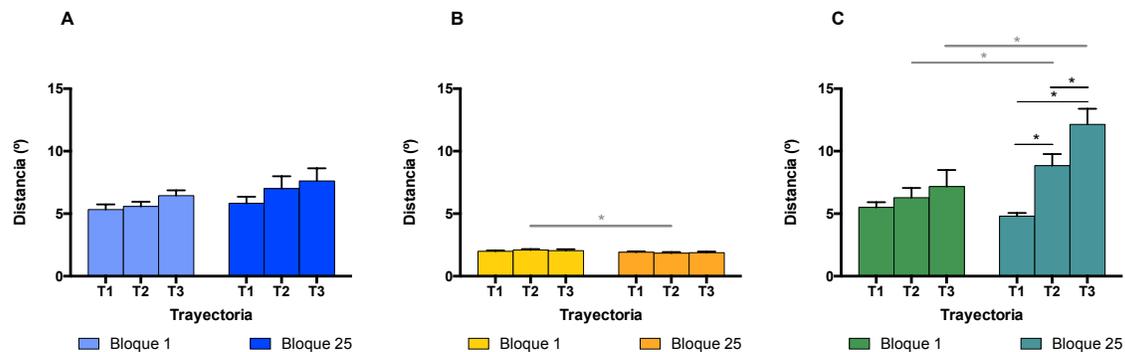


Figura 7. Distancia recorrida por cada tipo de movimiento ocular según trayectoria del blanco. Se presenta el promedio \pm error estándar de la mediana de la distancia de sacadas (A), fijaciones (B) y *smooth pursuits* (C) según el tipo de trayectoria (tipo 1 (T1), tipo 2 (T2) y tipo 3 (T3)), evaluados en el bloque inicial (1) y final (25). Se indican dos tipos de comparaciones, entre trayectorias durante un mismo bloque (*), y para una misma trayectoria en el tiempo (*). Toda diferencia indicada tiene una $p < 0.05$.

Respecto a la duración de cada movimiento ocular (figura 8), se observó inicialmente que este parámetro fue modulado por el tipo de trayectoria solo para el *smooth pursuit*, con una mayor duración durante la trayectoria tipo 1 (0.65 ± 0.05 s) en comparación con la trayectoria tipo 3 (0.43 ± 0.04 s, Friedman con Dunn test, $p = 0.001$); esta situación cambió durante el aprendizaje, observándose una disminución de la duración del *smooth pursuit* en el bloque 25 frente a la trayectoria 1 (0.52 ± 0.03 s, T-test pareado, $p = 0.002$), y un aumento en este parámetro durante la trayectoria 3 (0.58 ± 0.04 s), lo cual produjo que la duración del *smooth pursuit* en el bloque final fuera similar, independiente

del tipo de trayectoria del blanco. Para los restantes movimientos oculares, solo las fijaciones mostraron una leve disminución en su duración durante la trayectoria tipo 2 (bloque 1, duración de 0.2 ± 0.01 s; bloque 25, duración de 0.15 ± 0.007 s, T-test pareado, $p < 0.001$).

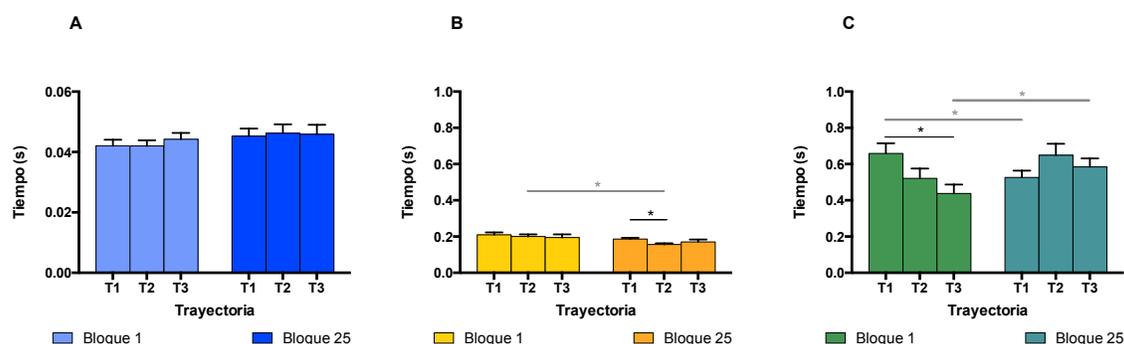


Figura 8. Duración de cada movimiento ocular según trayectoria del blanco. Se presenta el promedio \pm error estándar de la mediana de la duración de sacadas (A), fijaciones (B) y *smooth pursuits* (C) según el tipo de trayectoria (tipo 1 (T1), tipo 2 (T2) y tipo 3 (T3)), evaluados en el bloque inicial (1) y final (25). Se indican dos tipos de comparaciones, entre trayectorias durante un mismo bloque (*), y para una misma trayectoria en el tiempo (*). Toda diferencia indicada tiene una $p < 0.05$.

Finalmente, respecto a la velocidad de los movimientos oculares (figura 9), este parámetro fue significativamente modulado por la velocidad del blanco para cada tipo de movimiento, mostrando una mayor velocidad de sacadas, fijaciones y *smooth pursuit* cuando la velocidad del blanco fue mayor. Así, la velocidad de sacadas durante la trayectoria tipo 1 fue 127 ± 7.0 %/s, significativamente menor a los 147 ± 6.6 %/s durante la trayectoria tipo 3 (RM ANOVA con Tukey test, $F_{(1,6, 21)} = 5.8$, $p = 0.04$). Tal velocidades corresponden a la conducta visual durante el bloque inicial, lo cual mostró una rápida modulación del ambiente sobre la conducta de los individuos. Estas diferencias se mantuvieron en el tiempo, no mostrando diferencias significativas en comparación a las velocidades en el bloque 25 según tipo de trayectoria. Respecto a la velocidad de fijaciones, un parámetro poco explorado en la literatura, se observaron diferencias significativas

durante la trayectoria tipo 1 (7.9 ± 0.4 %/s) en comparación con la trayectoria tipo 2 (9.7 ± 0.5 %/s, RM ANOVA con Tukey test, $F_{(1, 14)} = 50.5$, $p < 0.001$) y tipo 3 (9.3 ± 0.6 %/s, $p < 0.001$) en el bloque inicial. Tales diferencias se observaron durante el bloque 25 pero sin diferencia significativa, lo cual puede explicarse por la dispersión de la muestra, especialmente en la trayectoria tipo 3 (12.6 ± 1.7 %/s). Por último, la velocidad de *smooth pursuit* exhibió una significativa modulación según la trayectoria del blanco, tanto en el bloque inicial (8.7 ± 0.4 %/s en trayectoria tipo 1, 12.7 ± 0.7 %/s en trayectoria tipo 2 y 15.7 ± 1.2 %/s en trayectoria tipo 3, RM ANOVA, $F_{(1, 14)} = 50.5$, $p < 0.001$) como en el final (9.3 ± 0.4 %/s en trayectoria tipo 1, 14.7 ± 0.7 en trayectoria tipo 2 y 21.2 ± 1.4 %/s en trayectoria tipo 3, RM ANOVA, $F_{(1, 14)} = 97.2$, $p < 0.0001$). El incremento observado en la velocidad del *smooth pursuit* en el tiempo, fue significativo en todos los casos (T-test pareado, $p = 0.02$ en trayectoria tipo 1, $p < 0.001$ en tipo 2 y 3), lo cual refleja además una modulación de la conducta visual como parte del aprendizaje, para conseguir la visualización del blanco en movimiento mediante el *smooth pursuit*. Esta modulación se observó también en todos los parámetros previamente descritos para el *smooth pursuit*, lo cual indica que este movimiento ocular es especialmente optimizado en el tiempo para conseguir el objetivo sensorial de la tarea en curso.

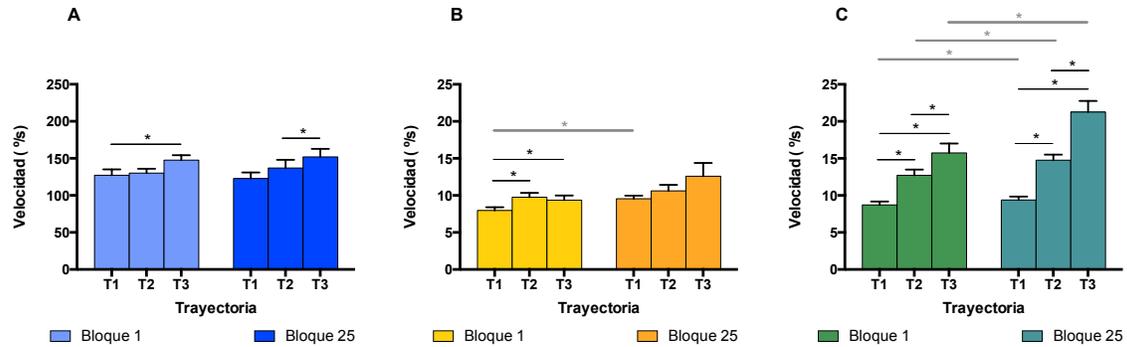


Figura 8. Velocidad de cada movimiento ocular según trayectoria del blanco. Se presenta el promedio \pm error estándar de la mediana de la velocidad de sacadas (A), fijaciones (B) y *smooth pursuits* (C) según el tipo de trayectoria (tipo 1 (T1), tipo 2 (T2) y tipo 3 (T3)), evaluados en el bloque inicial (1) y final (25). Se indican dos tipos de comparaciones, entre trayectorias durante un mismo bloque (*), y para una misma trayectoria en el tiempo (*). Toda diferencia indicada tiene una $p < 0.05$.

Como será descrito a continuación, es preferentemente mediante el *smooth pursuit* que los sujetos visualizaron los elementos claves de la tarea (el blanco y el cursor), en contraste a la estrategia visual descrita comúnmente en estudios visuomotores, a saber, una combinación de fijaciones y sacadas. Para describir entonces este aspecto específico de la estrategia de mirada, se presentaran distintos parámetros de preferencia visual por el blanco o el cursor contrastando el componente de fijación con el de *smooth pursuit*.

6.3. Preferencia visual en la tarea

La mirada mostró una clara preferencia de visualización por el blanco de la tarea en comparación con el cursor. Este hallazgo fue cuantificado utilizando dos parámetros: la frecuencia de movimientos oculares y el tiempo de permanencia de la mirada sobre los elementos mencionados. A continuación se describirá la preferencia de movimientos oculares.

Una primera aproximación (figura 9) muestra que la frecuencia de movimientos oculares (considerando tanto a fijaciones como *smooth pursuits*) dirigidos hacia el blanco

en el bloque inicial de juego fue 0.96 ± 0.1 eventos/s, lo cual fue significativamente mayor a la frecuencia de movimientos dirigidos hacia el cursor (0.62 ± 0.06 eventos/s, T-test pareado, $p = 0.024$). Esta tendencia se mantuvo en el tiempo, mostrando además un incremento no significativo en la frecuencia de movimientos hacia el blanco, alcanzando 1.33 ± 0.07 eventos/s en el bloque 25 de juego (Friedman test, $p = 0.26$). La frecuencia de movimientos hacia el cursor fue 0.62 ± 0.05 eventos/s en este último bloque, sin cambios significativos en el tiempo (Friedman test, $p = 0.89$). La diferencia observada en este último bloque entre la frecuencia hacia el blanco y el cursor también fue significativa (Paired, t test, $p < 0.0001$).

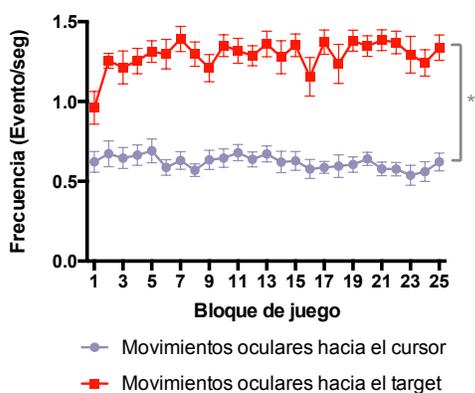


Figura 9. Preferencia de movimientos oculares hacia el blanco v/s cursor. Se presenta el promedio \pm error estándar de la media de movimientos oculares por sujeto dirigidos hacia el blanco o el cursor de la tarea. Solo se considero los movimientos de fijación o *smooth pursuit*. Cada variable fue evaluada en el tiempo respecto al bloque 1, indicando aquel bloque específico en el cual existe una diferencia significativa (*). Además se realizó la comparación entre variables en un mismo bloque (*). En este caso, la diferencia observada fue significativa en todos los bloques de juego (solo se indica en el bloque 25 por motivos de imagen). Todo cambio indicado tiene un $p < 0.05$.

Cuando se analizó el componente de movimiento ocular que explicó esta clara preferencia visual, se determinó que los sujetos visualizaron tanto el blanco como el cursor de la tarea mediante su seguimiento, no su fijación. Así, la frecuencia inicial de *smooth pursuit* hacia el blanco (figura 10A) fue 0.77 ± 0.08 eventos/s, lo cual fue

significativamente mayor a la frecuencia inicial de fijaciones hacia el blanco (0.18 ± 0.03 eventos/s, T-test pareado, $p < 0.0001$); esta diferencia se incrementó en el tiempo, mostrando una frecuencia de *smooth pursuit* en el bloque 25 de 1.2 ± 0.005 eventos/s, y de fijaciones de 0.17 ± 0.02 eventos/s (T-test pareado, $p < 0.0001$). El incremento en la frecuencia de *smooth pursuit* en el tiempo fue significativo para el bloque 7 (Friedman con Dunn test, $p = 0.02$), lo cual no fue evidenciado en el caso de fijaciones (Friedman test, $p = 0.8$).

En el análisis de este parámetro respecto al tipo de trayectoria del blanco (similar a lo descrito previamente para las variables generales, figura 10B), nuevamente se observó que la frecuencia de *smooth pursuit* hacia el blanco fue significativamente mayor, tanto en bloque inicial como final, respecto a la frecuencia de fijaciones. Tal observación fue válida para la conducta visual frente a los tres tipos de trayectoria. El análisis de la conducta en el tiempo, esta vez comparando la frecuencia de movimientos para el bloque 1 y 25, arrojó diferencias significativas para la frecuencia de *smooth pursuit* en los tres casos (T-test pareado, $p = 0.0006$ en trayectoria tipo 1, $p = 0.011$ en trayectoria tipo 2, $p = 0.011$ en trayectoria tipo 3); no así para la frecuencia de fijaciones, donde no se observaron diferencias significativas.

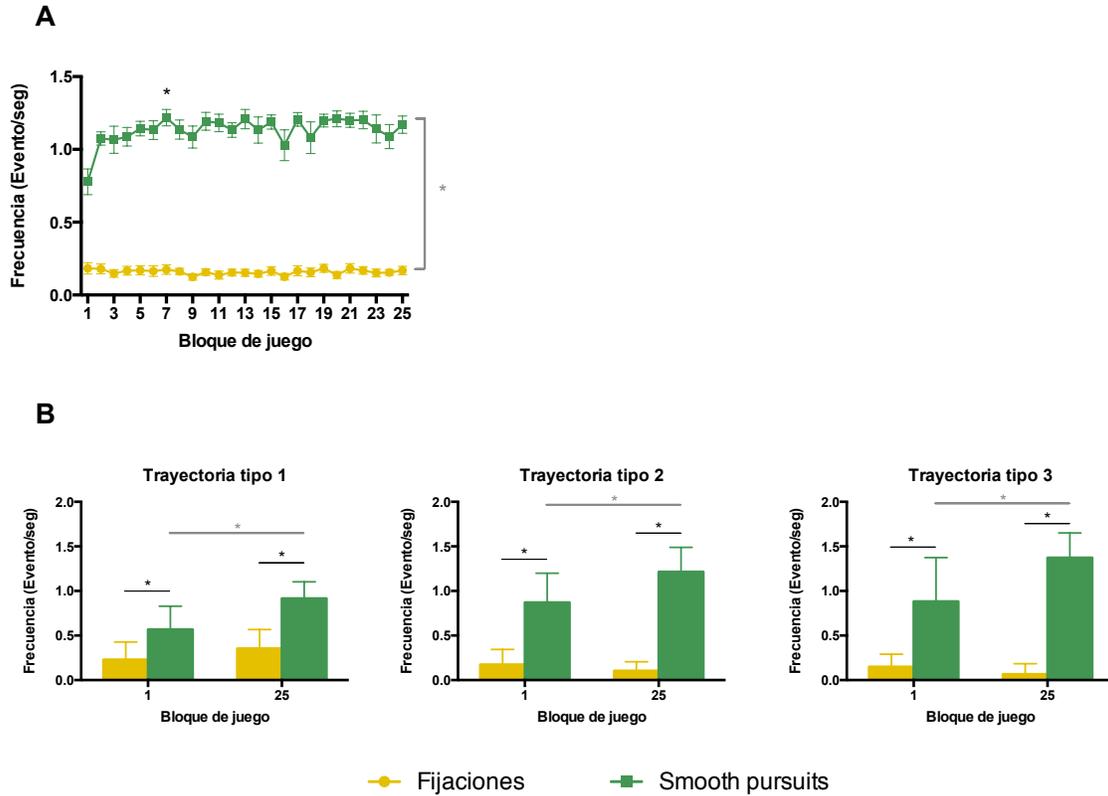


Figura 10. Preferencia de movimientos oculares hacia el blanco. **A-** Se presenta el promedio \pm error estándar de la media de fijaciones y *smooth pursuit* por sujeto dirigidos hacia el blanco de la tarea. Cada variable fue evaluada en el tiempo respecto al bloque 1, indicando aquel bloque específico en el cual existe una diferencia significativa (*). La diferencia entre variables en cada bloque de juego (*) fue significativa en todos los casos (solo señalado en el bloque 25). **B-** Se presentan ambas variables, ahora descritas respecto al tipo de trayectoria del blanco que la mirada enfrentó. En este caso se grafica el promedio \pm desviación estándar de la media de fijaciones y *smooth pursuit*, con el fin de presentar la dispersión entre sujetos. Se observaron diferencias significativas para ambas variables en el tiempo (*) y entre ellas en el bloque inicial y final (*). Toda diferencia indicada tiene una $p < 0.05$.

Respecto a la frecuencia de movimientos oculares hacia el cursor (Figura 11A), nuevamente se observó que los sujetos visualizaron el cursor mediante el seguimiento de su movimiento. Así, la frecuencia de *smooth pursuit* en el bloque inicial (0.39 ± 0.03 eventos/s) fue mayor a la de fijaciones hacia el cursor (0.22 ± 0.05 , Wilcoxon test, $p = 0.02$), tendencia que se mantuvo en el tiempo. La frecuencia de *smooth pursuit* mostró un leve incremento, no significativo en el análisis de repeticiones múltiples (RM ANOVA, $F_{(6.7,87)} = 0.93$, $p = 0.47$), a diferencia de lo observado en la frecuencia de fijaciones, la cual

disminuyó en el tiempo de manera significativa en los bloques 8, 17, 18 y desde el 21 en adelante (Friedman con Dunn test, $p < 0.02$ en todos los casos). Esta observación, junto con el aumento en la frecuencia de *smooth pursuit* hacia el blanco (figura 10), muestra una clara optimización en la estrategia de movimientos oculares, empleando movimientos de seguimiento de los elementos de la tarea, lo cual permite su visualización continua en el tiempo.

La disminución en la frecuencia de fijaciones hacia el cursor fue evidente, también, en el análisis según tipo de trayectoria del blanco para los tres casos (figura 11B, Wilcoxon test, $p = 0.04$ en trayectoria tipo 1, $p = 0.0001$ en tipo 2, $p = 0.0002$ en tipo 3), al igual que la mayor frecuencia de *smooth pursuit* en comparación con la de fijaciones, tanto al inicio como al final de la tarea (Wilcoxon test, $p < 0.01$ en todos los casos). Esta última observación no fue válida solo en el bloque 1 frente a la trayectoria tipo 1 (Wilcoxon test, $p = 0.26$), en la condición inicial y de menor dificultad del juego.

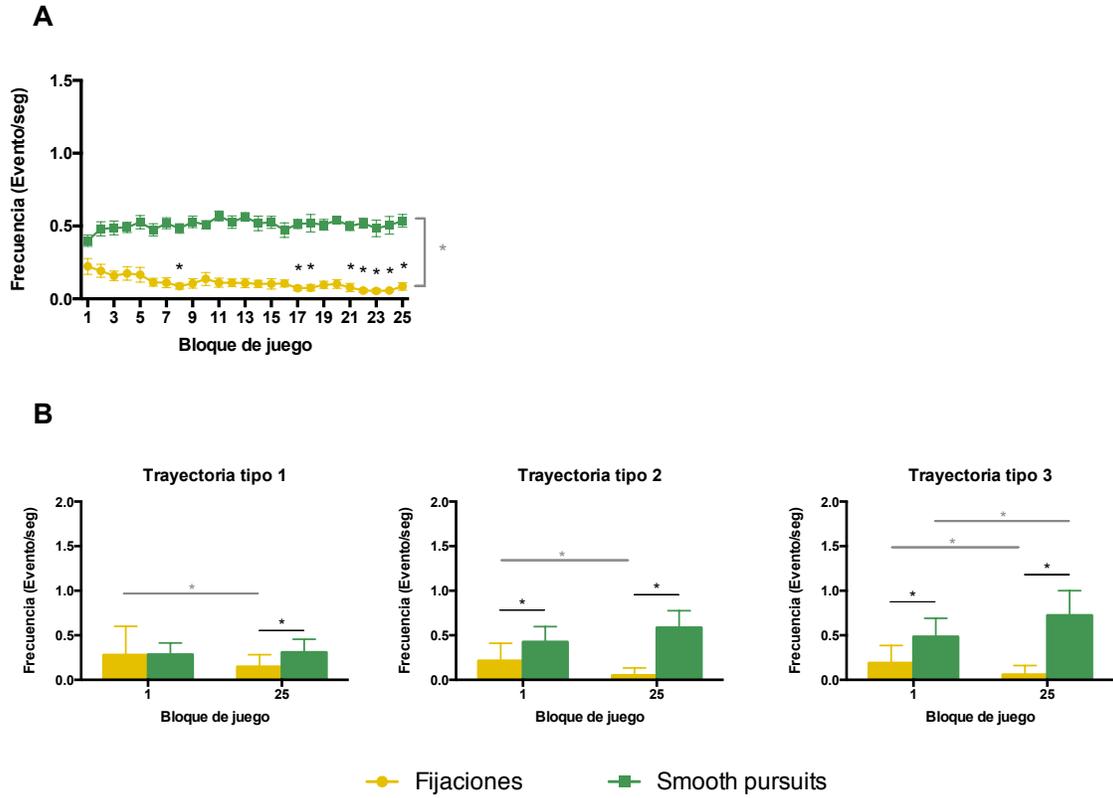


Figura 11. Preferencia de movimientos oculares hacia el cursor. **A-** Se presenta el promedio \pm error estándar de la media de fijaciones y *smooth pursuit* por sujeto dirigidos hacia el blanco de la tarea. Cada variable fue evaluada en el tiempo respecto al bloque 1, indicando aquel bloque específico en el cual existe una diferencia significativa (*). La diferencia entre variables en cada bloque de juego (*) fue significativa en todos los casos (solo señalado en el bloque 25). **B-** Se presentan ambas variables, ahora descritas respecto al tipo de trayectoria del blanco que la mirada enfrentó. En este caso se grafica el promedio \pm desviación estándar de la media de fijaciones y *smooth pursuit*, con el fin de presentar la dispersión entre sujetos. Se observaron diferencias significativas para ambas variables en el tiempo (*) y entre ellas en el bloque inicial y final (*). Toda diferencia indicada tiene una $p < 0.05$.

Como fue mencionado anteriormente, se utilizó un segundo parámetro para caracterizar la preferencia de visualización de los sujetos en la tarea. En este caso se cuantificó el tiempo de permanencia de la mirada (mediante fijación y *smooth pursuit* en conjunto) sobre el blanco o el cursor. La figura 12 muestra el resultado de este análisis, donde se reitera la clara preferencia por el blanco a lo largo de la tarea. El porcentaje de tiempo de la mirada sobre el blanco en el bloque inicial fue 34 ± 5.1 % (respecto al tiempo total del bloque), lo cual fue significativamente mayor al porcentaje de tiempo sobre el

cursor ($15 \pm 1.8 \%$, T-test pareado , $p = 0.004$). Esta diferencia se incrementó a medida que progresó la tarea, alcanzando un $59 \pm 3.1 \%$ sobre el blanco y un $15 \pm 1.9 \%$ sobre el cursor en el bloque final (Wilcoxon test, $p < 0.001$). El incremento en la preferencia por el blanco fue significativo a partir del 7º bloque de juego (Friedman con Dunn test, $p < 0.02$ para todos los bloques señalados, excepto en los bloques 9, 11, 12 y 14), a diferencia de los descrito previamente para la frecuencia de movimientos hacia el blanco, lo cual hace que este parámetro temporal sea un indicador de cambio en la conducta visual más preciso para describir el aprendizaje.

La figura 12B muestra la preferencia temporal según el tipo de trayectoria presentada por el blanco. En ella se observa nuevamente que el tiempo de la mirada sobre el blanco fue mayor que sobre el cursor, independiente del tipo de trayectoria que el blanco desplegó, excepto para el bloque 1 frente a la trayectoria tipo 3 (T-test pareado o Wilcoxon test, $p < 0.005$ en todos los casos señalados). Esto refleja la mayor necesidad de feedback visual por el blanco respecto al cursor. En este sentido, vale la pena destacar que el tiempo sobre el cursor no cambió significativamente en las tres condiciones señaladas (T-test pareado, $p > 0.36$ en los tres casos), lo cual también refleja que el control del cursor demandó una mínima y constante información visual de su movimiento o la posición del mismo. Se observa además que, inicialmente, el tiempo sobre el blanco fue modulado por la velocidad de la trayectoria del mismo (a recordar, la trayectoria tipo 1 presentó una velocidad menor a la trayectoria tipo 2, y ésta a su vez menor a la trayectoria tipo 3), presentando un mayor porcentaje de tiempo sobre el blanco en la trayectoria tipo 1, y el menor porcentaje en el caso de la trayectoria tipo 3 (RM ANOVA, $F_{(1.4, 18)} p < 0.0001$, diferencia no indicada en la figura). Esta situación cambió con el curso del aprendizaje,

mostrando un mayor porcentaje de tiempo en el bloque final para las tres condiciones (T-test pareado o Wilcoxon test, $p < 0.002$ en todos los casos), lo cual puede explicarse por una optimización del seguimiento del blanco respecto a su velocidad y la mayor frecuencia de *smooth pursuit* (ver figura 10B). A esto se agrega que el porcentaje de tiempo de la mirada sobre el blanco en el bloque 25 no fue significativamente distinto frente a las trayectorias 1 y 2 (no indicado en la figura), a pesar de la diferencia de velocidad del blanco en estos casos (Friedman con Dunn test, $p > 0.9$).

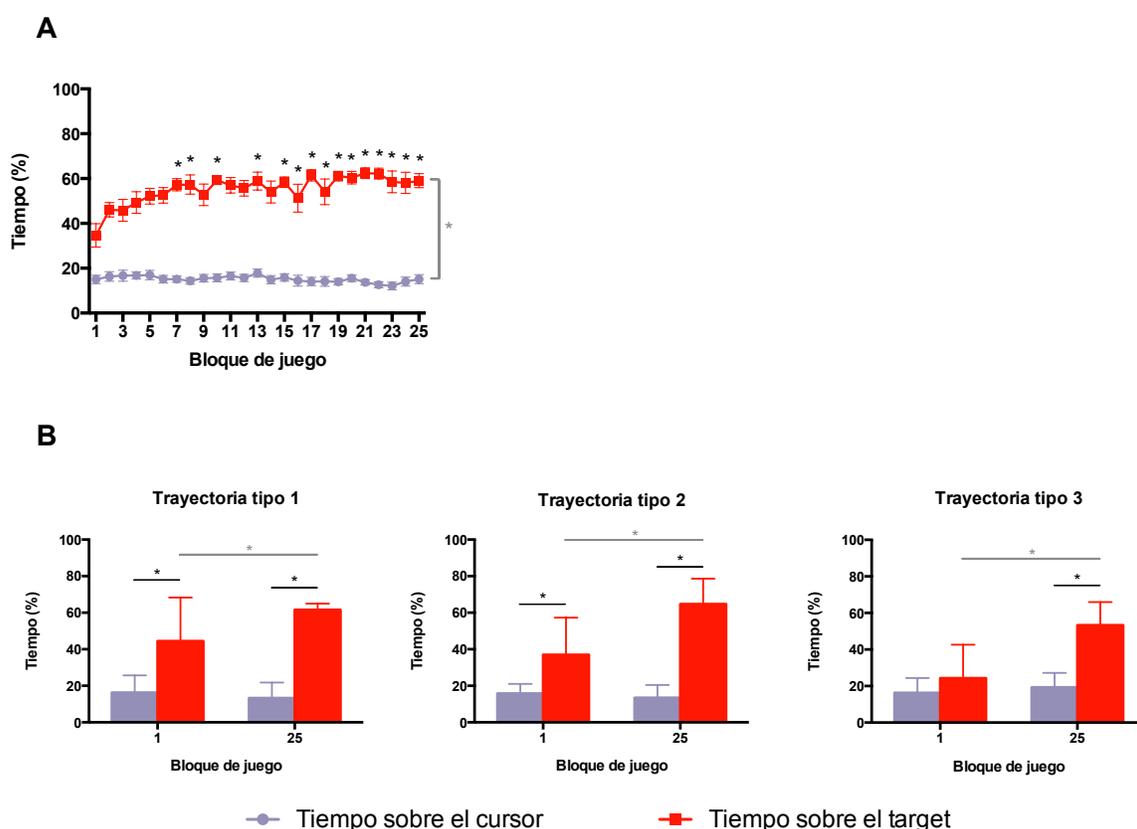


Figura 12. Preferencia temporal de la mirada por el blanco v/s cursor. **A-** Se presenta el promedio \pm error estándar de la media del porcentaje de tiempo de la mirada sobre el blanco o el cursor. Cada variable fue evaluada en el tiempo respecto al bloque 1, indicando aquellos bloques en los cuales existe una diferencia significativa (*). La diferencia entre variables en cada bloque de juego (*) fue significativa en todos los casos (solo señalado en el bloque 25). **B-** Se presentan ambas variables, ahora descritas respecto al tipo de trayectoria del blanco que la mirada enfrentó. En este caso se grafica el promedio \pm desviación estándar de la media del porcentaje de tiempo, con el fin de presentar la dispersión entre sujetos. Se observan diferencias significativas para ambas variables en el tiempo (*) y entre ellas en el bloque inicial y final (*). Toda diferencia indicada tiene una $p < 0.05$.

Finalmente, debe observarse que en las tres condiciones expuestas se evidencia una importante dispersión intra-grupo, reflejada en la desviación estándar de cada parámetro respecto al promedio del grupo (figura 10B). Esta situación merece consideración, ya que refleja la particularidad del proceso de aprendizaje para cada sujeto, hecho que sin embargo aún permite apreciar el cambio en la conducta visual como parte del proceso de aprendizaje.

De lo expuesto hasta el momento se concluye que la mirada mostró una clara y significativa preferencia de visualización por el blanco de la tarea. Esta preferencia cambió en el curso del aprendizaje, especialmente mediante la modulación del *smooth pursuit* según el tipo de trayectoria. Sin embargo, aún no se ha abordado un aspecto central de esta investigación, relacionado con la capacidad de los sujetos de predecir los cambios en la tarea. Por ende, a continuación se describirán los cambios en la coordinación visuomotora observados durante el aprendizaje de la tarea.

6.4. Coordinación visuomotora: anticipación y persecución

La tarea motora utilizada en esta investigación requirió el control del cursor en el espacio, lo cual demandó información visual de su movimiento (como feedback visual del comando motor). Además, fue necesario conocer o estimar la posición del blanco en el espacio, para programar su captura con el cursor. Esto implicó que la mirada mostrara una relación temporo-espacial específica, tanto con el cursor como con el blanco, para resolver la tarea. Esta habilidad de coordinación visuomotora puede ser descrita respecto a la anticipación o persecución del cambio de posición del blanco o el cursor, entendiendo que la anticipación refleja un mayor nivel de habilidad. A continuación se describirán los cambios observados en la mirada respecto al cursor.

La anticipación o persecución del movimiento del cursor fue determinada respecto a un área en el espacio en relación a la posición instantánea del blanco en la pantalla (figura 13). De este modo, se consideró como evento de anticipación cuando la mirada se posicionó sobre esta región antes que el cursor; a su vez, se consideró como persecución cuando el cursor se posicionó en la región antes que la mirada. Este parámetro fue calculado respecto a (1) la primera sacada dirigida hacia el blanco en el *trial* (debe recordarse que fue definido como *trial* la ventana temporal comprendida entre la aparición y desaparición del blanco en la escena, por ende, cada bloque de juego comprendió entre 45 y 50 *trials*), comparando los tiempos de llegada de la mirada y el cursor a la región, y (2) todo aquel evento en que el cursor ingresó en el área (para esta variable se compararon los tiempos de inicio del movimiento que condujeron tanto a la mirada como al cursor a la región de interés). Esto permitió la caracterización de la relación mirada-cursor con dos variables. La figura 14A muestra la tasa de eventos de anticipación y persecución para la primera variable referida a la sacada. Se observa claramente que la mirada anticipó al cursor en la mayoría de los eventos desde el inicio del juego: en bloque 1 el promedio \pm error estándar de la tasa de anticipación fue 0.57 ± 0.04 , la de persecución fue 0.17 ± 0.02 (T-test pareado, $p < 0.0001$); en bloque 25 la tasa de anticipación fue 0.77 ± 0.02 , la de persecución fue 0.12 ± 0.07 (T-test pareado, $p < 0.0001$). Además se observó un incremento significativo en la tasa de anticipación de la mirada respecto al cursor desde el 8° bloque (Friedman con Dunn test, $p < 0.04$ en todos los bloques señalados). La tasa de persecución mostró una leve disminución significativa (Friedman test, $p = 0.014$), pero que en el análisis posterior no se obtuvieron diferencias entre bloques particulares. Cuando se analizó la magnitud de anticipación o persecución (figura 14B), destaca la diferencia

temporal de ambos eventos: la anticipación de la mirada en el bloque 1 fue de 536 ± 39 ms respecto a la llegada del cursor a la región de interés, la persecución de la mirada tardó tan solo 229 ± 37 ms en alcanzar al cursor (Wilcoxon test, $p = 0.0006$); en el bloque 25 ambas diferencias de tiempo se redujeron, exhibiendo 421 ± 30 ms para la anticipación y 147 ± 15 ms para la persecución (T-test pareado, $p < 0.0001$); en el caso de la anticipación, la diferencia observada fue significativa (Friedman test, $p = 0.0002$). La reducción en el tiempo de anticipación y persecución refleja un cambio en la coordinación temporal de los movimientos que presumiblemente se explique por la optimización de la extracción de información visual para la planificación o corrección del movimiento del cursor, así como el mejor control cinemático del mismo.

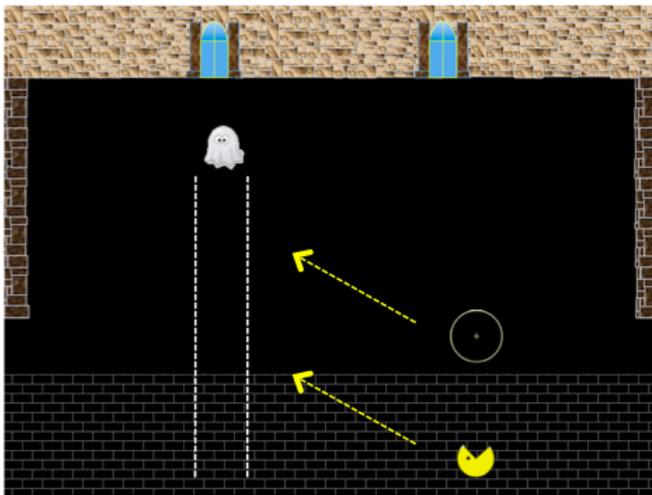


Figura 13. Esquema del análisis de las variables de coordinación mirada-cursor. Se presenta el blanco (fantasma, figura blanca), la representación de la mirada (círculo amarillo) y el cursor (pacman, figura amarilla inferior). Para el cálculo de las variables se determinó una región de interés, delimitada por las líneas verticales blancas, cuyo ancho fue 3° visuales. La primera variable de coordinación considero el instante en que tanto el centro de la mirada y el cursor se posicionaron en la región, independiente de su posición en el eje vertical, solo para el evento tras la primera sacada hacia la región en el *trial*. La segunda variable considero el instante en que se inició el movimiento que condujo a la mirada y el cursor sobre la región, para todo evento en que el cursor ingresó al área. En los eventos de anticipación, la mirada se posicionó (para la primera métrica) o inició (para la segunda métrica) antes que el cursor su desplazamiento. Lo contrario fue considerado para los eventos de persecución.

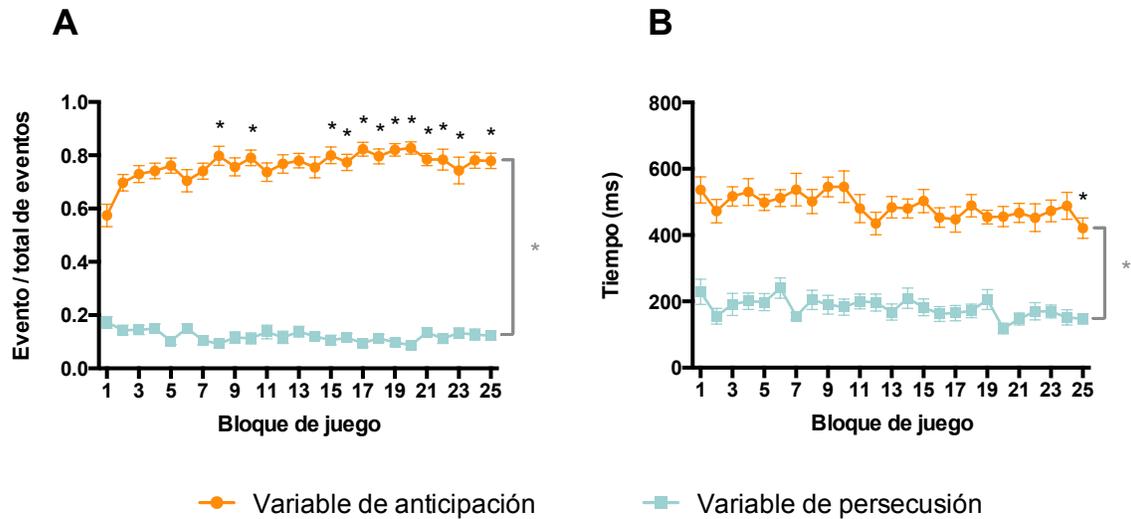


Figura 14. Relación temporo-espacial entre la mirada y el cursor tras la primera sacada hacia el blanco. Se presenta el promedio \pm error estándar de la tasa de anticipación y persecución (A) y de la mediana de la magnitud de estas variables (B). Cada variable fue evaluada en el tiempo respecto al bloque 1, indicando aquellos bloques en los cuales existe una diferencia significativa (*). La diferencia entre variables en cada bloque de juego (*) fue significativa en todos los casos (solo señalado en el bloque 25). Toda diferencia indicada tiene una $p < 0.05$.

El análisis descrito anteriormente está condicionado por un factor relevante, la diferencia de velocidad entre la mirada (alrededor de 130 °/s) y el cursor (alrededor de 50 °/s). Para ratificar el resultado anterior, despejando el factor de velocidad, realizamos el mismo análisis pero considerando ahora el tiempo de inicio del movimiento del cursor y la mirada (por ende, la velocidad de desplazamiento ya no fue relevante), para todo evento que condujera al cursor sobre la región de interés. La figura 15A muestra el resultado de este segundo análisis, observándose nuevamente un predominio de los eventos de anticipación, tanto en el bloque 1 (0.66 ± 0.03 para la tasa de anticipación, 0.32 ± 0.03 para la tasa de persecución, T-test pareado = 0.0007), como en el bloque 25 (0.79 ± 0.02 para anticipación, 0.19 ± 0.02 para persecución, T-test pareado, $p < 0.0001$). Además, el incremento en la tasa de anticipación fue significativo en el tiempo (Friedman test, $p = 0.004$).

A diferencia de lo observado para la primera variable de coordinación mirada-cursor (figura 14B), en este caso las magnitudes de anticipación y persecución fueron similares en el bloque inicial (296 ± 37 ms para anticipación, 261 ± 32 ms para persecución, T-test pareado, $p = 0.48$), y en el caso de la anticipación, fue considerablemente menor a lo observado el caso anterior. Cuando se observa su variación en el tiempo, se constata una disminución en la magnitud de persecución (RM ANOVA, $F_{(5,6, 73)} = 3$, $p = 0.001$), con 166 ± 16 ms en el bloque 25, lo cual fue significativamente menor a los 251 ± 26 ms de magnitud de anticipación (T-test pareado, $p = 0.002$, figura 15B). Así, los resultados expuesto confirman el componente predominante de anticipación de la mirada respecto al movimiento del cursor, tanto en el momento de su iniciación como en su arribo a la región proyectada por el blanco. Además, en el curso del aprendizaje se observan cambios tanto en la tasa como en la magnitud de anticipación, lo cual demuestra una optimización en la coordinación mirada-cursor como parte de la habilidad visuomotora entrenada.

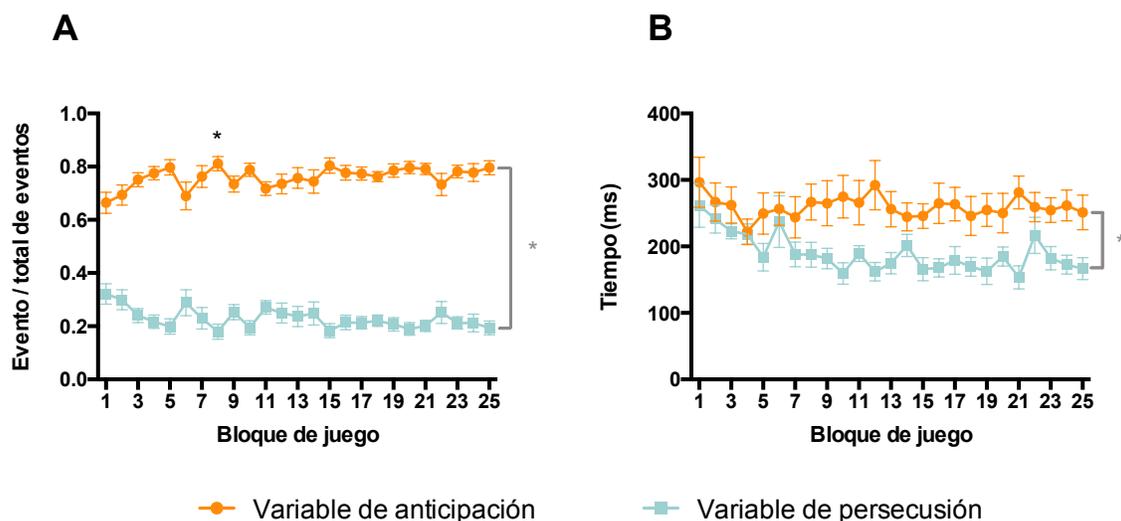


Figura 15. Relación temporo-espacial entre la mirada y el cursor respecto a los movimientos del cursor. Se presenta el promedio \pm error estándar de la tasa de anticipación y persecución (**A**) y de la mediana de la magnitud de estas variables (**B**). Cada variable fue evaluada en el tiempo respecto al bloque 1, indicando aquellos bloques en los cuales existe una diferencia significativa (*). La diferencia entre variables en cada bloque de juego (*) fue significativa en todos los casos para la comparación de tasas (**A**). En el caso de la magnitud (**B**), solo es válido para el bloque 25. Toda diferencia indicada tiene una $p < 0.05$.

A continuación se describirá la coordinación entre la mirada y el blanco buscando caracterizar la anticipación y persecución de la posición del blanco en dos momentos distintos de la tarea: primero, inmediatamente después de la primera sacada *catch-up* hacia el blanco en el *trial* (similar a lo realizado respecto al cursor, figura 14) y segundo, durante su seguimiento mediante el *smooth pursuit*. La figura 16 describe la métrica utilizada en este caso para la determinación de anticipación y persecución. Respecto al evento de sacada *catch-up*, se determinó la distancia entre el centro de la mirada y el blanco en el eje Y, así como el tiempo transcurrido para que el blanco alcanzara la posición de la mirada en el eje Y (debe considerarse que la trayectoria del blanco fue siempre descendente) o viceversa, y el tiempo o latencia para el inicio de esta sacada respecto al inicio del *trial*. Para los eventos de seguimiento del blanco, se determinó la distancia y el tiempo entre la mirada y el blanco (similar a lo ya descrito) cuando el blanco se localizó en el 50% del eje vertical de la pantalla (posición 0.5) o en el 75% del mismo eje (posición 0.75; se consideró como 0% la posición del borde superior de la pantalla y 100% la posición del borde inferior). En la posición 0.5, el blanco mostraba una trayectoria preferentemente vertical, a diferencia de lo ocurrido en la posición 0.75, donde se agregó un componente horizontal acelerante, por ende, la elección de ambas posiciones busca describir la posibilidad de anticipación durante el *smooth pursuit* ante dos direcciones de desplazamiento parcialmente distintas. Para ambos eventos de coordinación se consideró como anticipación cuando la mirada se localizó bajo la posición del blanco, tras la sacada *catch-up* o durante el *smooth pursuit*.

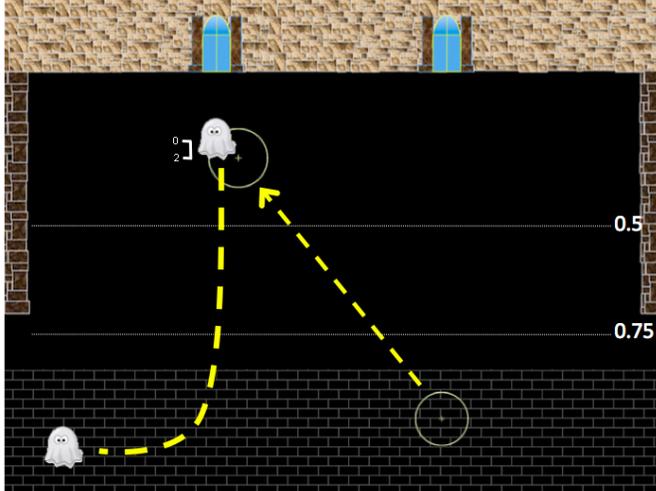


Figura 16. Esquema del análisis de las variables de coordinación mirada-blanco. Se presenta el blanco (fantasma, figura blanca) y la representación de la mirada (circulo amarillo). Para el cálculo de las variables se determinó la distancia entre el centro del blanco y la mirada, posterior a la primera sacada *catch-up* representada por la línea amarilla ascendente (esta sacada posicionó la mirada sobre el blanco y habitualmente se inició desde el área inferior cuadrículada de la pantalla) y durante el seguimiento del blanco representado por la línea curva amarilla. Se calculó además el tiempo transcurrido para que el blanco o la mirada alcancen la posición de su contraparte que se localizó más abajo en el eje vertical. Para el primer evento de coordinación, la posición considerada fue la de la mirada o el blanco inmediatamente posterior a la sacada. Para el segundo evento, fue la posición 0.5 o 0.75 en el eje vertical, indicadas por las líneas discontinuas blancas. Adyacente al blanco se indica una referencia de distancia de 2° visuales medidos desde su centro, a escala según el tamaño de la imagen.

Respecto al primer evento de coordinación, la mirada se posicionó bajo el blanco desde el inicio de la tarea (figura 17A), anticipando su posición. La distancia vertical entre el centro del blanco y la mirada fue $1.4 \pm 0.27^\circ$ en el bloque 1, la cual no mostró cambios significativos en el tiempo, alcanzando $1.2 \pm 0.35^\circ$ en el bloque 25 (RM ANOVA, $F_{(8.5, 111)} = 0.6$, $p = 0.7$). Dado que la velocidad del blanco fue distinta en cada trayectoria, se analizó la conducta visual según este factor, observándose resultados similares (figura 17B). La distancia de la mirada bajo el blanco frente a la trayectoria 1 fue $1.7 \pm 0.28^\circ$, frente a la trayectoria 2 fue $1.6 \pm 0.34^\circ$ y frente a la trayectoria 3 fue $1.1 \pm 0.28^\circ$. En ninguno de estos casos se obtuvieron cambios significativos (RM ANOVA, $F_{(8.2, 107)} = 1.2$, $p = 0.2$ para la trayectoria 1, $F_{(8.9, 115)} = 0.6$, $p = 0.7$ en trayectoria 2, $F_{(8.2, 107)} = 0.7$, $p = 0.6$ en trayectoria 3).

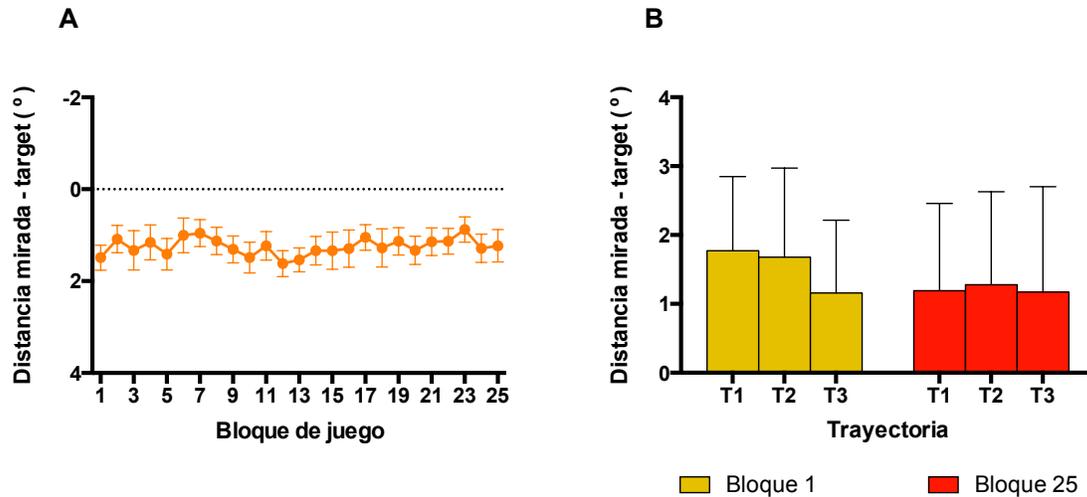


Figura 17. Distancia entre la mirada y el blanco tras la primera sacada *catch-up*. Se presenta el promedio \pm error estándar de la mediana de la distancia (A) y el promedio \pm desviación estándar de la mediana según trayectoria (B). No se observaron cambios significativos en las variables descritas.

El tiempo transcurrido para que el blanco se posicionara en la ubicación de la mirada reflejó el efecto de la anticipación de la mirada (figura 18). Así, cuando observamos el promedio del tiempo transcurrido, sin diferenciar el tipo de trayectoria (figura 18A), este fue de 103 ± 17 ms, variable que no presentó variaciones significativas en el curso de la tarea (RM ANOVA, $F_{(8,9, 116)} = 0.7$, $p = 0.6$). Sin embargo, su análisis según el tipo de trayectoria (figura 18B) arrojó que frente a la trayectoria tipo 1, el tiempo transcurrido fue 239 ± 39 ms, significativamente superior al tiempo transcurrido frente a la trayectoria tipo 2 (107 ± 18 ms) y tipo 3 (30 ± 13 m.; RM ANOVA con Tukey test, $p = 0.03$ para trayectoria 1 v/s 2, $p = 0.008$ para trayectoria 1 v/s 3, $p = 0.02$ para trayectoria 2 v/s 3). Estas diferencias pueden ser fácilmente atribuibles a la diferencia de velocidades que el blanco presentó en cada tipo de trayectoria, como fue mencionado previamente. Los tiempos observados en este bloque inicial no mostraron diferencias significativas en comparación al bloque 25 (T-test pareado, $p > 0.1$ en todos los casos).

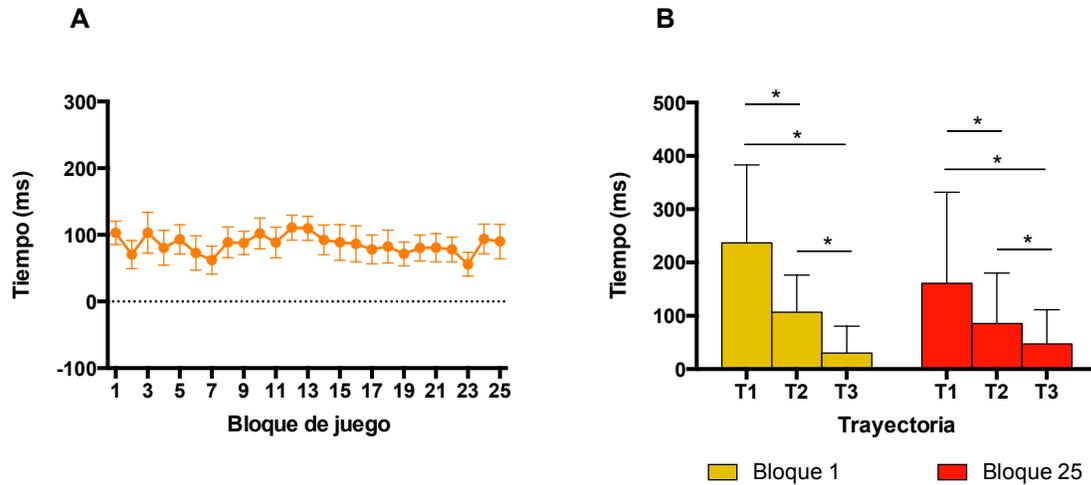


Figura 18. Tiempo de anticipación del blanco posterior a la sacada *catch-up*. Se presenta el promedio \pm error estándar de la mediana del tiempo transcurrido (magnitud positiva representa anticipación) para que el blanco alcanzara la posición de la mirada (A), y el promedio \pm desviación estándar de la mediana según tipo de trayectoria (B). Se indican diferencias significativas (*) para la comparación entre trayectorias. Toda diferencia observada tiene una $p < 0.05$.

Respecto a este evento de coordinación, se calculó además el tiempo de latencia transcurrido para la ejecución de la sacada *catch-up*. Tal variable refleja la predicción temporal de la aparición del blanco en el *trial*, así como la decisión de su visualización inmediata. Se observó una latencia inicial en la tarea de 560 ± 63 ms lo cual mostró una significativa disminución en el tiempo hasta alcanzar 336 ± 20 ms en el bloque 25 (Friedman con Dunn test, $p < 0.02$ en todos los bloques señalados, figura 19A). El análisis de latencia según el tipo de trayectoria (figura 19B) arrojó resultados similares, con 555 ± 60 ms frente a la trayectoria tipo 1, 622 ± 89 ms frente a la trayectoria tipo 2 y 533 ± 67 ms frente a la trayectoria tipo 3. La diferencia en la latencia inicial observada en estos casos no fue significativa (Friedman test, $p = 0.22$); sin embargo, en los tres casos se observó una disminución significativa en el tiempo, hasta alcanzar 335 ± 20 ms frente a la trayectoria 1 (T-test pareado, $p = 0.002$), 357 ± 27 ms frente a la trayectoria tipo 2 (Wilcoxon test, $p = 0.0001$), y 323 ± 23 ms frente a la trayectoria tipo 3 (Wilcoxon test, $p = 0.0004$). De este

modo, la programación de la primera sacada en el *trial*, la cual mostró características predictivas respecto a la posición del blanco (figura 17A), fue además optimizada en el tiempo para localizar tempranamente el blanco en la pantalla, lo cual muestra un aspecto más de la conducta de anticipación general hasta el momento descrita.

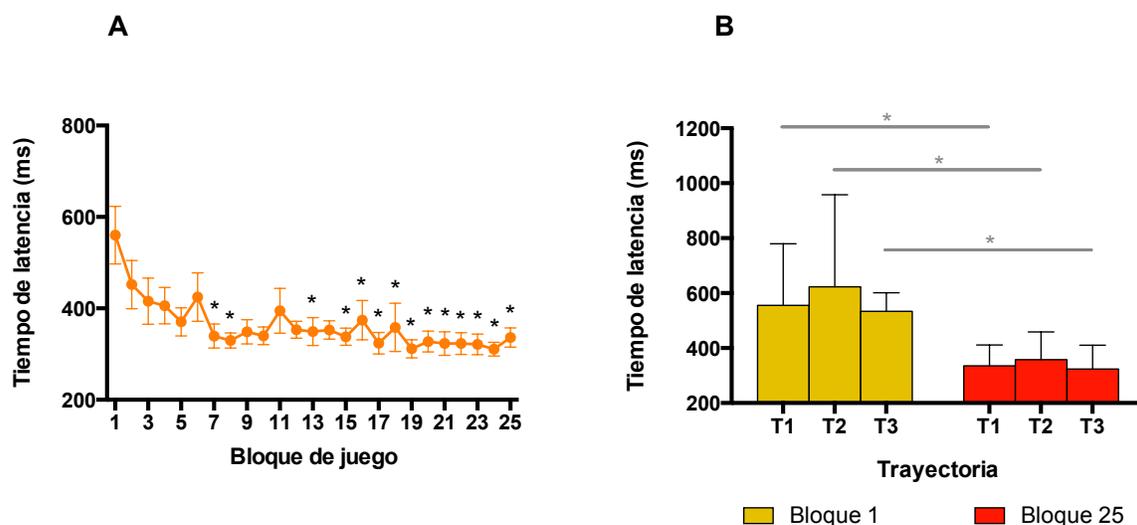


Figura 19. Tiempo de latencia de la sacada *catch-up*. Se presenta el promedio \pm error estándar de la mediana del tiempo transcurrido desde el inicio del *trial* para la ejecución de la sacada (A), y el promedio \pm desviación estándar de la mediana según tipo de trayectoria (B). Se indican diferencias significativas (*) respecto al bloque 1, y en la comparación entre el bloque inicial y final (*). Toda diferencia observada tiene una $p < 0.05$.

Para concluir el análisis de coordinación mirada-blanco, se describirán aspectos relacionados con el *smooth pursuit* del blanco. En esta oportunidad se consideró pertinente analizar la conducta visual frente a cada trayectoria solamente, ya que este factor determinó el seguimiento visual. Como fue ya mencionado, se calculó la distancia entre el centro del blanco y la mirada en dos momentos distintos del seguimiento: cuando el blanco alcanzó la posición 0.5 o la posición 0.75 del eje vertical de la pantalla (figura 20). Respecto a la posición 0.5, se observó que la mirada se posicionó levemente inferior al centro del blanco,

tanto en la trayectoria tipo 1 ($0.7 \pm 0.4^\circ$), tipo 2 ($1.2 \pm 0.29^\circ$) y tipo 3 ($0.9 \pm 0.34^\circ$). Esto representa un componente de coordinación alto entre el desplazamiento del blanco y el movimiento ocular, para lo cual se requiere la estimación de la futura posición del blanco en la pantalla, o sea, su anticipación. En las tres trayectorias se observa un cambio no significativo en el tiempo, reduciéndose levemente la distancia entre el blanco y la mirada en el bloque 25 ($0.55 \pm 0.2^\circ$ durante la trayectoria tipo 1, $0.58 \pm 0.3^\circ$ en la tipo 2, $0.44 \pm 0.3^\circ$ en la tipo 3, Friedman test, $p > 0.9$ en los tres casos). Cuando analizamos esta relación para la posición 0.75 de la pantalla, se aprecia que la distancia en cuestión fue cercana a 0, lo cual significa que en este punto de la pantalla la mirada y el blanco se posicionaron prácticamente en el mismo lugar respecto al eje Y. Así, durante la trayectoria tipo 1 la distancia fue $0.36 \pm 0.3^\circ$, en la trayectoria tipo 2 fue $0.3 \pm 0.3^\circ$, y en la trayectoria tipo 3 fue $-0.22 \pm 0.45^\circ$. El cambio observado en el tiempo para estas variables no fue significativo (RM ANOVA, $p > 0.1$ para los tres casos), presentando la misma tendencia que en la posición 0.5, o sea, la mirada se localizó levemente sobre el centro del blanco ($-0.11 \pm 0.2^\circ$ en la trayectoria 1, $-0.24 \pm 0.2^\circ$ en la trayectoria tipo 2 y -0.4 ± 0.26) en el bloque 25. Cabe destacar que en esta posición el blanco mostró un cambio acelerante en la velocidad, lo cual explica la leve posición de persecución en que la mirada se ubicó respecto al blanco. Finalmente, las diferencias observadas entre trayectorias para los bloques 1 o 25 solo fueron significativas para la posición 0.75 entre la trayectoria 1 y 3 en el bloque 1 (RM ANOVA con Tukey test, $p = 0.01$).

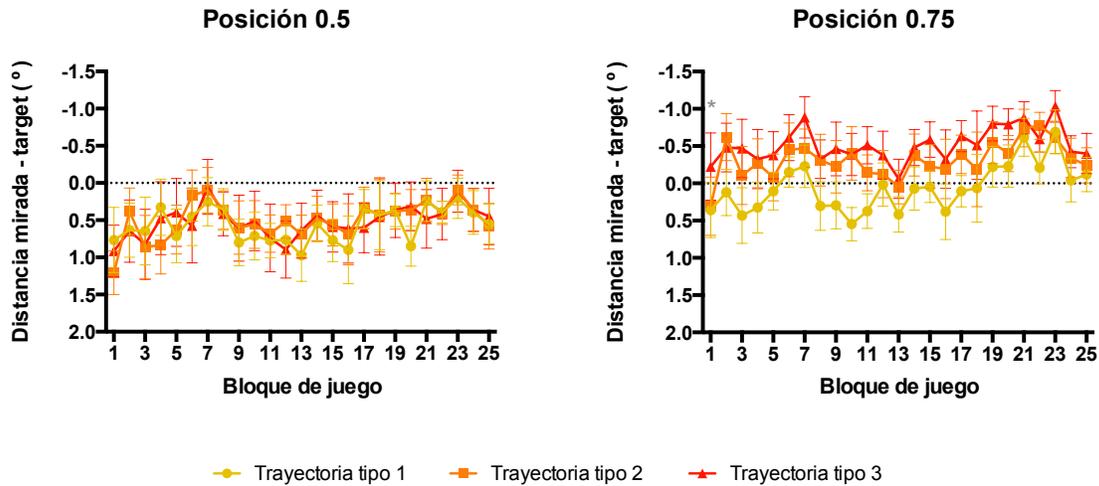


Figura 20. Distancia entre el centro del blanco y la mirada cuando el blanco se localizó en la posición 0.5 o 0.75 de la pantalla durante el *smooth pursuit*. Se presenta el promedio \pm error estándar de la mediana de la distancia observada en la trayectoria tipo 1, 2 o 3. La magnitud positiva significa que la mirada se localizó bajo el blanco, lo contrario representa la magnitud negativa. Se indica diferencias significativas entre trayectorias para el bloque identificado (*, revisar texto para identificar aquellas diferencias significativas). Toda diferencia observada tiene una $p < 0.05$.

Complementando el análisis anterior, calculamos el tiempo transcurrido para la mirada respecto al momento en que el blanco se localizó en las posiciones 0.5 o 0.75. En el caso de anticipación, la mirada presenta un tiempo menor al blanco, por ende, la diferencia de tiempo resulta positiva; lo contrario ocurre en el caso de la persecución. Así, para la posición 0.5 durante el bloque 1 de la tarea (figura 21), la mirada anticipó al blanco en 90 ± 53 ms durante la trayectoria 1, en 67 ± 19 ms durante la trayectoria 2 y en 25 ± 14 ms durante la trayectoria 3. Las diferencias observadas fueron significativas para el tiempo durante la trayectoria 2 v/s 3 (RM ANOVA con Tukey test, $p = 0.01$). En los tres casos se observa una disminución, no significativa, en la diferencia de tiempo, alcanzando 67 ± 31 ms durante la trayectoria 1, 35 ± 19 ms en la trayectoria 2 y 11 ± 15 ms en la trayectoria 3 en el bloque 25. En este último bloque la diferencia observada entre la trayectoria 1 y 3 fue significativa (RM ANOVA con Tukey test, $p = 0.04$). Revisando los

resultados para la posición 0.75, de manera similar a los descritos para la distancia, se observó un componente de persecución reflejado en una diferencia negativa de tiempo. En el bloque inicial la mirada anticipó en 7.1 ± 40 ms al blanco en su trayectoria 1 y en la trayectoria 2 la diferencia de tiempo fue 3.2 ± 16 ms; sin embargo, en la trayectoria 3 la mirada se posicionó 39 ± 12 ms después del blanco en la posición 0.75. La diferencia observada en el tiempo durante la trayectoria 2 y 3 fue significativa (RM ANOVA con Tukey test, $p = 0.0008$). En los tres casos no se observaron cambios significativos en el tiempo, sin embargo, en el bloque 25 el blanco adelantó a la mirada en 5.2 ± 23 ms durante la trayectoria 1, en 14 ± 9 ms durante la trayectoria 2 y en 22 ± 5 ms durante la trayectoria 3.

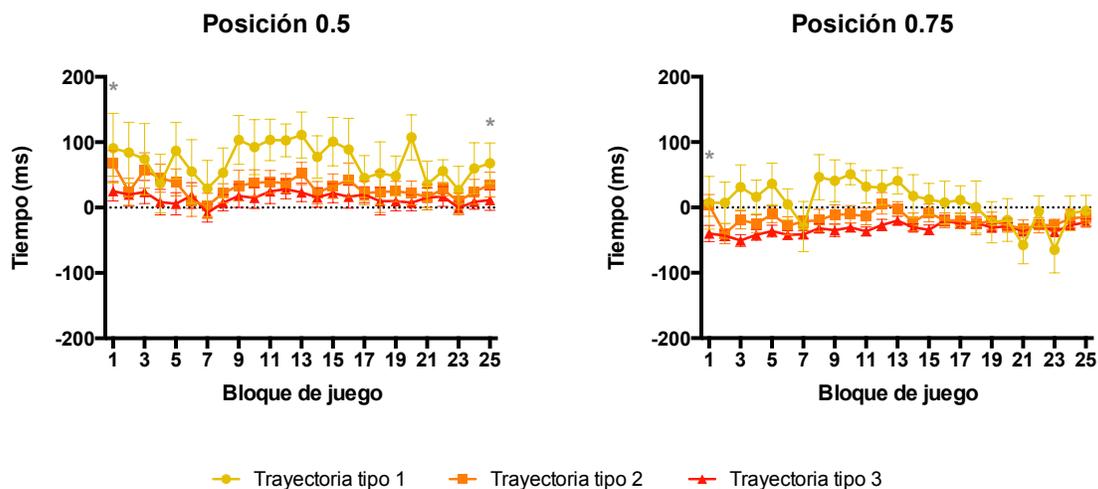


Figura 21. Tiempo transcurrido desde que la mirada se posicionó antes o después del blanco en la posición 0.5 o 0.75 de la pantalla durante el *smooth pursuit*. Se presenta el promedio \pm error estándar de la mediana del tiempo de anticipación (diferencia positiva) o persecución (diferencia negativa) de la mirada respecto al blanco, observada en la trayectoria tipo 1, 2 o 3. Se indica diferencias significativas entre trayectorias para los bloques identificados (*, revisar texto para identificar aquellas diferencias significativas). Toda diferencia observada tiene una $p < 0.05$.

Finalmente, se exploró el cambio en el perfil de velocidad de la mirada respecto a la velocidad del blanco a medida que el aprendizaje progresó. La figura 22 muestra el resultado del análisis, donde se expone la ganancia de velocidad, calculada como la razón

entre la velocidad instantánea de la mirada y el blanco en diferentes posiciones de la pantalla, desde 0.5 a 0.85. En las últimas posiciones, el blanco no solamente se desplazó en sentido vertical, sino también horizontal, por ende, mostró un cambio acelerante en el perfil de velocidad, lo cual es graficado junto con el perfil de la mirada en cada uno de los subgráficos, según tipo de trayectoria. En todas las trayectorias se observa una disminución en este índice a medida que el blanco se localizó en las posiciones inferiores de la pantalla, o sea, a medida que aceleró en su desplazamiento, lo cual refleja la dificultad de programar un *smooth pursuit* acelerante (esto se ratifica al observar el perfil de velocidad de la mirada en cada uno de los subgráficos). Cuando analizamos la conducta visual en el bloque 1 de juego frente a la trayectoria 1, en la posición 0.5 la mirada presentó un índice de velocidad de 0.87 (0.8-1; mediana y percentiles 25-75), disminuyendo a 0.72 (0.54 – 0.93) en la posición 0.85. En el caso de la trayectoria 2, el cambio fue de 0.8 (0.59 – 0.92) a 0.54 (0.43 – 0.7) frente a la posición 0.5 y 0.85, respectivamente. En el caso de la trayectoria 3, el índice fue de 0.51 (0.45 – 0.76) en la posición 0.5, y de 0.37 (0.29 – 0.52) en la posición 0.85. La disminución observada en los índices se debe fundamentalmente al cambio acelerante del blanco en la posición 0.85, frente a lo cual la mirada no exhibió una adaptación en este bloque inicial de la tarea. Ahora bien, si se observa el desempeño en el bloque final de juego, para las tres trayectorias resulta evidente una optimización en la ejecución del *smooth pursuit*, aumentando la velocidad del mismo y mejorando su ganancia respecto a la velocidad del blanco. Lo anterior es significativo principalmente para la conducta visual frente a las trayectorias 2 y 3, lo cual refleja un cambio, producto del aprendizaje, en un aspecto fundamental de la exploración visual para la tarea particular, referente a la visualización del blanco. Por último, si se observa la tendencia de este índice en el bloque 25, se constatará su disminución en las posiciones finales, similar a lo

observado en el bloque 1, lo cual da cuenta nuevamente la dificultad para aumentar la velocidad del *smooth pursuit* online, es decir, a medida que se está ejecutando.

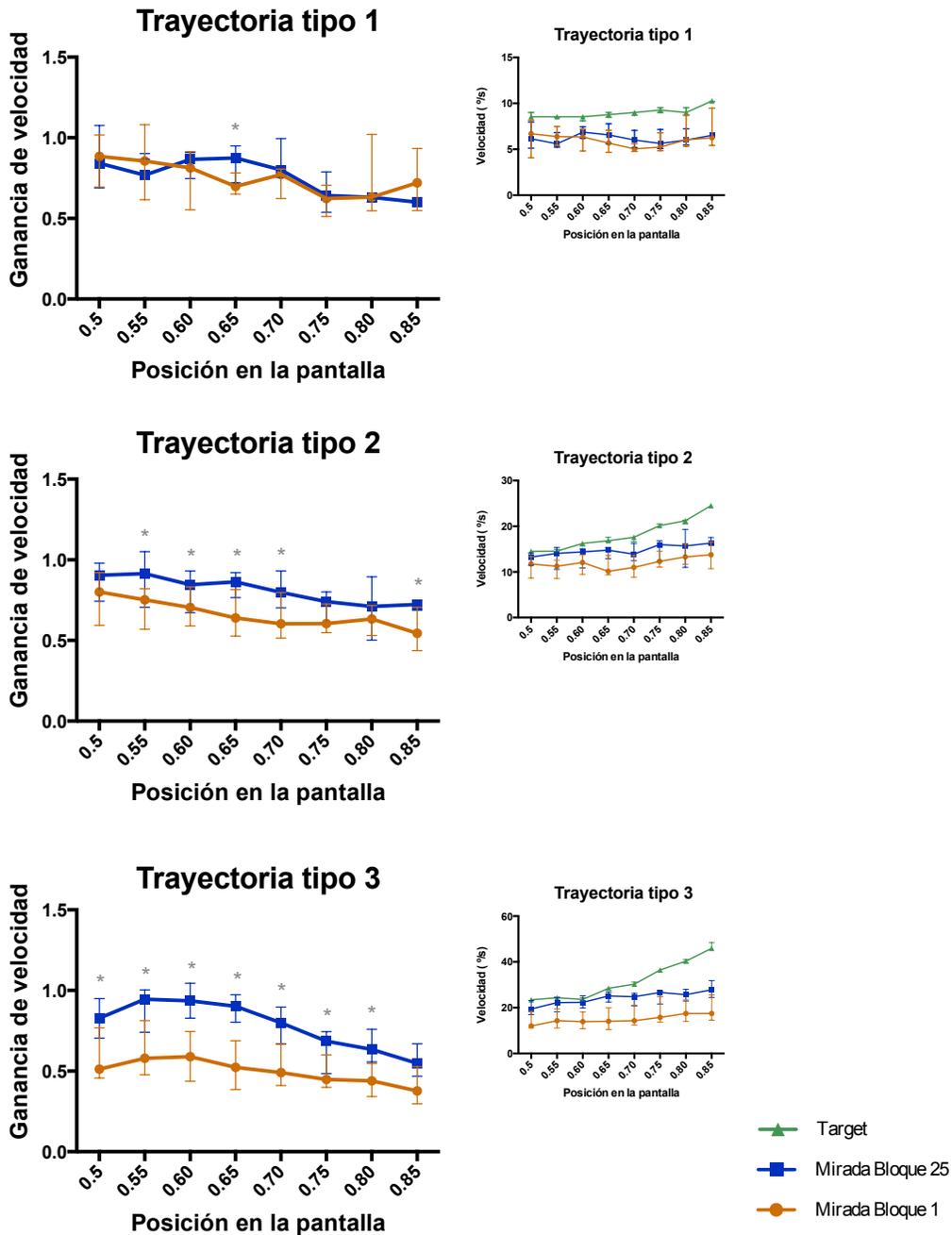


Figura 22. Índice y perfil de velocidad de la mirada en distintas posiciones de la pantalla durante el *smooth pursuit*. Se presenta la mediana y los percentiles 25-75 de la mediana del índice de velocidad (grafico central) y del perfil de velocidad (subgráfico) según el tipo de trayectoria del blanco. Además se presenta el perfil de velocidad del blanco en línea celeste (subgráfico). Solo se indica aquellas diferencias significativas observadas en distintas posiciones entre los bloques 1 y 25, para cada trayectoria (*). Toda diferencia observada tiene una $p < 0.05$.

Relación entre el desempeño en la tarea y la conducta visual.

A continuación se expondrá la contribución de distintos aspectos de la estrategia de mirada al rendimiento general en la tarea. Primero se correlacionó el rendimiento del grupo en cada bloque de juego (desde el nº 1 al 25) con aquellas variables que dieron cuenta de la preferencia visual y de distintos aspectos de la habilidad anticipatoria de la mirada. Tal relación involucró el efecto del aprendizaje en ambas variables correlacionadas. Luego, para explorar la misma relación, pero descartando el efecto del aprendizaje, se correlacionaron estas mismas variables considerando el rendimiento de cada sujeto en el tiempo, ahora desde el bloque de juego en que no se observaron cambios significativos en el rendimiento general (octavo bloque). Así, la figura 23A muestra una correlación positiva entre el tiempo de permanencia de la mirada sobre el blanco y el rendimiento general, para el grupo en el tiempo (Spearman test, $r = 0.70$, $p < 0.0001$) y por sujeto (Spearman test, $r = 0.35$, $p < 0.0001$). Mostró también una correlación positiva la tasa de anticipación de la mirada respecto al cursor con el rendimiento general, para el grupo en el tiempo (Pearson test, $r = 0.64$, $p = 0.0004$) y por sujeto (Spearman test, $r = 0.63$, $p < 0.0001$, figura 23B). Además se correlacionó negativamente el tiempo de latencia de la sacada *catch-up* hacia el blanco y el rendimiento (figura 23C), para el grupo en el tiempo (Spearman test, $r = -0.69$, $p = 0.0001$) y por sujeto (Spearman test, $r = -0.34$, $p < 0.0001$). Por último, mostró una correlación positiva el índice de velocidad del *smooth pursuit* en la posición 0.5 frente a la trayectoria tipo 3 y el rendimiento general (figura 23D), para el grupo en el tiempo (Spearman test, $r = 0.81$, $p < 0.0001$) y por sujeto (Spearman test, $r = 0.2$, $p = 0.001$).

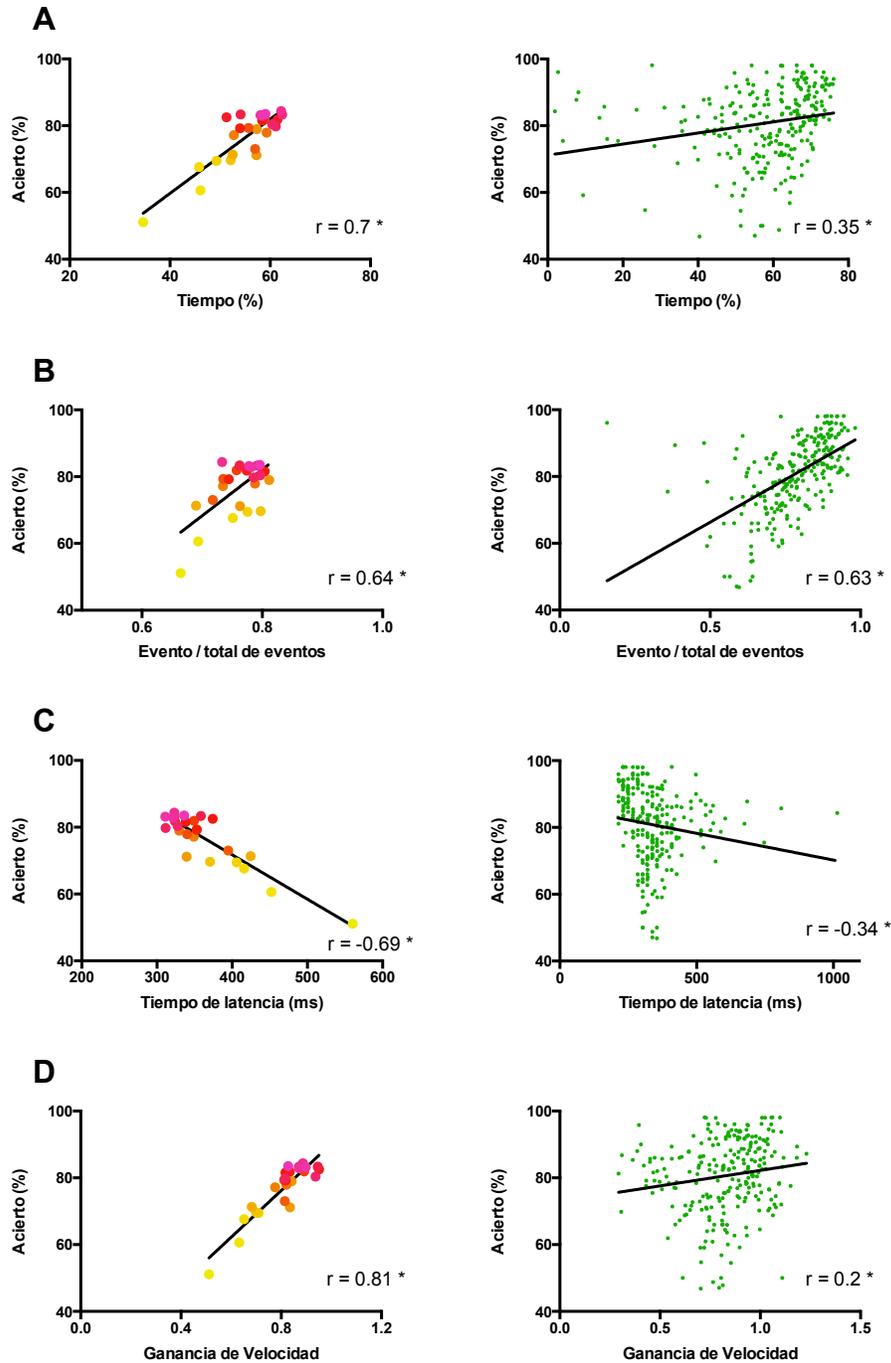


Figura 23. Correlaciones entre variables de preferencia y anticipación de la mirada y el rendimiento general en la tarea. Se presenta la preferencia por el objeto (A), la tasa de anticipación de la mirada respecto al cursor (B), el tiempo de latencia de la sacada *catch-up* (C) y el índice de velocidad en la posición 0.5 para la trayectoria 3 (D) en relación al rendimiento general del grupo en la tarea (figuras en posición izquierda). Además, para cada variable se presenta el desempeño de cada sujeto desde el octavo bloque de juego en relación a su rendimiento particular (figuras en posición derecha). Se indica (*) cuando el valor de correlación fue significativo ($p < 0.05$).

Como se observa en la figura 23, tanto la preferencia temporal por el blanco, como distintos parámetros de anticipación para sacadas y *smooth pursuit* presentan correlaciones significativas con el cambio conductual general en la tarea. Esto permite afirmar que la conducta visual fue uno de los aspectos modulados por la práctica de la tarea, y que contribuye al mejor desempeño del grupo en su conjunto, como al de los sujetos individualmente. Además, una mayor preferencia por el ambiente, así como un mayor componente anticipatorio de los eventos relevantes de la tarea parece determinar un mayor rendimiento en la tarea general, lo cual indica que estos aspectos del control de la mirada son críticos para el desarrollo de la habilidad visuomotora requerida en una tarea de alta variabilidad contextual.

7. DISCUSIÓN

El aprendizaje motor es una capacidad cognitiva que permite al individuo modificar su conducta, adquiriendo mayores y mejores habilidades en diversas tareas. Esta capacidad involucra diversos procesos, desde la determinación de estrategias sensoriales y motoras hasta la generación de representaciones neurales o memorias motoras. El objetivo de esta investigación fue describir la estrategia visual empleada por el SN durante la adquisición simultánea de memorias sensorio-motoras, primero para el control de los segmentos corporales (en particular para los movimientos manuales), lo cual permite la predicción de su consecuencia sensorial y segundo, para el control de la mirada (en particular los movimientos oculares), lo cual permite la predicción del ambiente. Los resultados obtenidos permiten concluir interesantes aspectos de la estrategia de movimientos oculares desplegada durante una tarea visuomotora, lo cual refleja las necesidades sensoriales involucradas en los procesos cognitivos tras el aprendizaje de la misma. El primer aspecto a comentar es el cambio de la conducta general y en la estrategia de movimientos oculares (figuras 4 y 5). La práctica continua de la tarea condujo a una mejora en la habilidad general de captura del blanco de la misma, reflejada en el porcentaje de acierto. La curva de aprendizaje muestra cambios significativos en diferentes momentos, lo cual permite identificar tres fases en el aprendizaje de la tarea. En la primera fase se observa un rápido incremento en el rendimiento, desde el primero hasta el tercer bloque, en el cual distintos autores describen cambios en la exploración sensorial, reconociendo las condiciones de la tarea, así como en los efectores respecto a las condiciones cinéticas y cinemáticas (Sailer et al., 2005; Schmidt & Lee, 2011). Esta última condición fue intencionadamente modificada en esta investigación para imponer un desafío de aprendizaje manual, por tanto, los sujetos en esta etapa debieron reconocer tal alteración. En la segunda etapa, desde el tercer al

octavo bloque, se postula que los sujetos prueban distintas estrategias de control, en este caso para los movimientos manuales y oculares. La selección de la mejor estrategia, según los resultados obtenidos, es empleada en la tercera etapa de aprendizaje, en la cual se obtiene un rendimiento estable en la tarea, como puede observarse tanto en el rendimiento general como en el rendimiento diferenciado según la dificultad impuesta por la trayectoria del blanco.

En las diferentes etapas de aprendizaje al menos dos componentes de la habilidad son paralelamente desarrollados. El primer componente tiene relación con el control manual del cursor, el cual permitió su posicionamiento en el espacio y tiempo de manera precisa, para contactar el blanco en movimiento. La mejora en este componente es indirectamente reflejada por el porcentaje de acierto, por ende, podemos establecer que los sujetos mostraron un control efectivo del cursor cuando la trayectoria del blanco mostró la velocidad más lenta (trayectoria tipo 1), a diferencia de lo observado frente a la trayectoria más rápida (tipo 3), donde el rendimiento alcanzó un 60%. En este último caso, los sujetos mostraron una meseta en su rendimiento a partir del sexto bloque, aún cuando se observa un incremento en su rendimiento posteriormente, lo cual no permite descartar que un mayor tiempo de práctica en el juego hubiera incrementado significativamente su rendimiento.

Un segundo componente de la habilidad visuomotora, y que constituyó el aspecto central de esta investigación, fue la estrategia de movimientos oculares empleada para la visualización de la tarea. Como se observa en los resultados, la estrategia ocular fue caracterizada mediante distintos aspectos, siendo el tipo de movimiento ocular el primero de ellos descrito. La estrategia inicial (figura 5) involucró una combinación de sacadas, fijaciones y *smooth pursuit*, la cual fue optimizada, fundamentalmente, mediante una combinación de sacadas y *smooth pursuit* en el curso del aprendizaje. La selección del

smooth pursuit, o sea, del seguimiento permanente de los elementos relevantes de la escena visual (blanco y cursor), en desmedro de su fijación puntual, parece responder a las características dinámicas impuesta por la tarea. Recientes estudios ecológicos que emplean tareas similares, muestran una similar combinación de movimientos oculares, describiendo un *smooth pursuit* para el seguimiento de la trayectoria de objetos en el ambiente (Diaz & Hayhoe, 2013; Hayhoe et al., 2012). Este hecho refleja el efecto modulador del ambiente en la conducta del individuo, lo cual concuerda con las actuales interpretaciones de la conducta motora planteadas por las teorías dinámica de sistemas y ecológica (Shumway Cook & Woollacott, 2012). Revisando los distintos parámetros descriptivos de los movimientos oculares según el tipo de trayectoria del blanco, la observación anterior es ratificada, evidenciándose una modulación de los movimientos oculares en el curso del aprendizaje, especialmente sobre la frecuencia y velocidad del *smooth pursuit*. Esto sin duda responde a las distintas velocidades que presentó el blanco según su trayectoria, lo cual es similar a lo revisado por Barnes y cols. (2008), quienes describen una determinación de la velocidad del *smooth pursuit* a partir de la velocidad del blanco. En aquellas publicaciones, el rango de velocidad utilizado (0-10°/s) fue inferior al empleado en esta investigación (7 – 45°/s), por tanto, los hallazgos aquí descritos amplían el conocimiento respecto a la conducta visual de seguimiento, particularmente frente al contexto ecológico de la tarea. Un aspecto importante a destacar es el cambio en el tiempo observado en las variables mencionadas del *smooth pursuit*. Así, el *smooth pursuit* parece reflejar un componente de la conducta motora general especialmente susceptible de ser modificado en el tiempo según las necesidades de los individuos, lo cual es consistente con la complejidad de estructuras y redes involucradas en su control, donde destaca el rol central del cerebelo, tanto en el control como en el aprendizaje de nuevas conductas motoras (Fukushima et al.,

2013; Ito, 2008; Sharpe, 2008).

La utilización de una estrategia de movimientos oculares particular para la tarea respondió a las necesidades específicas de control que los sujetos debieron resolver. En ese sentido, la demanda sensorial visual tuvo un primer origen en la alteración cinemática impuesta al *joypad*, lo cual requirió la adaptación del modelo de control del mismo. Paralelamente, la característica dinámica del blanco ya comentada demandó también su localización continua en la escena, para lo cual diversos autores plantean la necesidad de un modelo predictivo de sus cambios (Barnes, 2008; Diaz & Hayhoe, 2013; M. M. Hayhoe et al., 2012; Lalazar & Vaadia, 2008). La clara preferencia inicial que la mirada mostró por el blanco de la tarea, reflejada tanto en la frecuencia de movimientos oculares como en el tiempo de visualización (figura 9 y 12), permite inferir que la detección de este elemento de la tarea fue prioritario. Esta evidencia debe ser examinada cuidadosamente, dado que una primera aproximación, comparativa entre los procesos predictivos del movimiento manual y del ambiente, no parece coherente con el conocimiento actual y con las limitaciones metodológicas de la investigación. Mas bien, la complementariedad de ambos procesos nos permite una mejor aproximación explicativa a partir de los planteamientos teóricos revisados (Lalazar & Vaadia, 2008; Wolpert & Ghahramani, 2000). La generación de un modelo de control ocular para la predicción del ambiente evidentemente demanda su visualización continua, considerando especialmente el cambio en la aceleración y dirección que el blanco presentó. Parece necesario entonces la detección precisa en tiempo y espacio del objetivo de la tarea, dada las características dinámicas descritas. Este primera función del sistema visual permite, a su vez, la programación de los movimientos manuales necesarios para el control del cursor (mediado por modelos inversos), al entregar una referencia externa para la determinación de las coordenadas de movimiento (Crawford et

al., 2004). De esta forma, la detección del blanco de la tarea contribuye a la adquisición de los modelos de control sobre el manipulando.

El incremento en la preferencia por el blanco, observado en el tiempo, se explica por la optimización del modelo ocular predictivo, lo cual permitió su localización continua. Como se observa en la figura 10, la estrategia utilizada fue su seguimiento mediante el *smooth pursuit*, independiente de la velocidad del blanco. Este movimiento ocular, clásicamente entendido como un movimiento controlado de manera reactiva (Kowler, 2011), ha sido reinterpretado en los últimos años a la luz de la evidencia descrita, tanto en tareas controladas (Becker & Fuchs, 1985; Fukushima et al., 2013), como ecológicas (Hayhoe et al., 2012; Hayhoe et al., 2005). Es así como actualmente se entiende que el *smooth pursuit* no solo puede ser explicado por el movimiento retiniano del estímulo, sino también por una memoria interna a partir de estimaciones de corto y largo plazo del movimiento del estímulo (Barnes, 2008; Diaz & Hayhoe, 2013). La generación de un modelo predictivo de la posición futura del blanco permitiría la implementación de un *smooth pursuit* anticipatorio, lo cual se refleja en los resultados presentados para la posición de la mirada respecto al blanco (figura 20 y 21, posición 0.5) y la modulación de la velocidad del seguimiento (figura 22). Debe considerarse que la relación espacial entre la mirada y el blanco mostró un componente anticipatorio desde el inicio de la tarea, independiente de la velocidad de desplazamiento del blanco. Esto refleja la capacidad de rápida adaptación de la mirada a las condiciones del ambiente, las cuales, en esta tarea, cambiaban *trial a trial*. El componente anticipatorio de posición descrito fue observado mientras el blanco exhibió una velocidad relativamente constante, a diferencia de lo ocurrido cuando el blanco aumentó su velocidad. Esta segunda situación caracterizó la trayectoria del blanco cuando recorrió la mitad inferior de la escena, reflejado en la

posición 0.75 (figura 20 y 21). En esta posición, la mirada mostró un retraso en su relación con el blanco, lo cual confirma la imposibilidad de reprogramar la velocidad del seguimiento de manera online para el sistema de control de la mirada (Kowler, 2011). Una reprogramación de largo plazo si parece factible, basado en la generación de una memoria motora para su control, lo cual se refleja en el cambio de ganancia de la velocidad observado en el curso del aprendizaje (figura 22).

Un segundo componente predictivo de la mirada fue observado durante la ejecución de sacadas *catch-up*, desde la región inferior de la escena hacia el blanco (figuras 17 a 19). Este componente permitió una temprana detección del blanco en el *trial*, lo cual entregaría ventajas para la programación posterior del *smooth pursuit*. Resultados previos han descrito esta estrategia de anticipación bajo condiciones similares a utilizadas en esta investigación, donde la velocidad del blanco parece constituir la variable determinante de la tarea (Hayhoe et al., 2012; Land & McLeod, 2000). En estos casos, la mirada fue localizada cerca de la futura posición del balón 150 a 300 ms antes de su impacto, lo que permitiría el estimación de su velocidad, facilitando su seguimiento o fijación posterior. Según los resultados expuestos acá, la mirada fue posicionada bajo el centro del blanco a una distancia relativamente constante ($\pm 1.4^\circ$), independiente de la posición del blanco en la escena y de su trayectoria. Esto refleja el alto grado de precisión en el control de la mirada y de predicción de la posición del blanco que los sujetos mostraron desde el inicio del juego, considerando que la distancia recorrida por cada sacada *catch-up* fue, al menos, 15° , lo cual significa que el blanco solo podría haber sido visualizado por la retina periférica.

En la mayoría de los casos, la sacada *catch-up* fue continuada por un *smooth pursuit*, el cual fue favorecido en su programación por la posición inferior de la mirada respecto al blanco, situación que permitió la estimación de su velocidad en su trayectoria

descendente. Si bien la relación espacial de la mirada y el blanco fue relativamente constante en el curso del aprendizaje, se observó una notable disminución en el tiempo de latencia para esta primera sacada desde el inicio del *trial*, registrándose ± 300 ms en el último bloque de juego. Si se considera que el tiempo necesario para la programación y ejecución de una sacada reactiva es de 200 ms (Duchowski, 2007), los sujetos mostraron una alta coordinación temporal respecto al inicio de cada *trial*, planificando cada sacada *catch-up* inmediatamente iniciado el *trial*. Esto ejemplifica la consolidación de una estrategia de exploración visual en el tiempo, donde la detección temprana del blanco fue el primer objetivo de la misma.

Analizando la relación entre la mirada y el cursor, el primer hallazgo destacable fue el escaso tiempo de visualización que los sujetos emplearon para la detección del mismo en la escena (figura 12). La alteración cinemática impuesta al movimiento del cursor presumía la necesidad constante de la retroalimentación visual del movimiento aplicado al joystick, especialmente en los primeros bloques de juego. Publicaciones anteriores han descrito este aspecto particular del control del manipulando (Sailer et al., 2005), especialmente cuando el control del mismo requirió la adquisición de nuevas reglas de movimiento producto, por ejemplo, de alteraciones cinemáticas. La necesidad de la retroalimentación visual en la primera fase del aprendizaje, descrita por estos autores, ha sido interpretada como una clara evidencia del proceso de adquisición de memorias sensorio-motoras en la forma de un modelo interno de control. En el caso de esta investigación, las condiciones impuestas al movimiento del cursor exigían un proceso similar, por tanto el resultado antes descrito permite reinterpretar los hallazgos previos. En ese sentido, es probable que la menor preferencia visual por la detección del cursor indique dos aspectos del proceso de aprendizaje visuomotor no explorados previamente: primero, cuando se adquiere

simultáneamente un modelo predictivo del ambiente y de los movimientos corporales, la mayor demanda sensorial la impone el ambiente. Como mencionamos anteriormente, el movimiento constante del blanco necesariamente debe ser conocido, dado que resulta esencial para programar los movimientos manuales. Por tanto, en virtud de lograr el objetivo de la tarea, la detección del blanco parece prioritario. En segundo lugar, es probable que la alteración cinemática del movimiento del cursor exigiera solo la actualización de la memoria motora de los sujetos, construida previamente a la realización de la tarea, dada la experiencia visuomotora que la mayoría de las personas, en el rango de edad seleccionado, ya poseen. En ese sentido, más que la adquisición de un nuevo modelo de control, esta tarea exigió la adaptación de un modelo previamente adquirido. Por tanto, la actualización de un modelo demandaría menores recursos visuales, lo cual explica también que la estrategia de visualización no fuera de persecución del cursor, sino más bien de anticipación, tanto al inicio del movimiento del cursor (figura 15), como al finalizar (figura 14). La posibilidad de predecir el movimiento del cursor desde el inicio de la tarea, puede haber sido facilitada por la contribución somatosensorial (tanto táctil como propioceptiva) al ejecutar el movimiento del *joypad*, dado que, por una parte, no existió alteración dinámica alguna al *joypad*, por tanto la consecuencia sensorial de la fuerza aplicada al mismo podría haber sido fácilmente predicha por los sujetos sin necesidad de la retroalimentación visual directa. Además, no debe descartarse la contribución de la retina periférica en la detección del movimiento del cursor, cuando la mirada fue posicionada más allá de 3° visuales del centro del mismo. Si bien, esta porción de la retina entrega menor precisión, permite reconocer el desplazamiento en el espacio de objeto, por tanto, su contribución es factible ante la necesidad de disponer de la fovea visual en otro lugar de la escena. Estos dos aspectos sensoriales descritos no pueden ser analizados en esta

investigación, dada las restricciones en su diseño metodológico.

Un último aspecto a discutir es la relevancia de los cambios en la estrategia de mirada observados en el tiempo respecto a la habilidad visuomotora general. Si se considera que el objetivo de la tarea fue capturar el blanco, el logro del mismo fue determinado por el control del *joypad*, pero también por la estrategia de mirada. Así, fue explorada la relación entre el rendimiento y la conducta visual, observándose correlaciones significativas para diferentes parámetros de la mirada (figura 23), lo que en conjunto indica que una estrategia anticipatoria en la visualización de la escena se vincula con un mayor éxito en la tarea. El cambio en el tiempo observado para estos parámetros se acompañó de un mayor porcentaje de acierto, lo cual confirma el primer, y quizás más relevante supuesto de esta investigación, respecto a la adquisición de una estrategia de exploración sensorial predictiva como un componente fundamental del aprendizaje visuomotor en ambientes dinámicos. Esto se ve ratificado por la relación significativa observada entre el rendimiento particular de cada sujeto, una vez alcanzada la meseta del mismo, y su estrategia de mirada (subgráficos de la figura 23), lo cual indica que el establecimiento de estrategias anticipatorias confiere ventajas en la realización de esta tarea y se relaciona con un mayor rendimiento.

Respecto a la hipótesis de esta investigación, se concluye que ésta fue cierta. La tarea exigió la implementación de una estrategia de movimientos oculares que anticipó el desplazamiento del cursor como del blanco. Tal estrategia fue optimizada en el tiempo, dado que mostró cambios asociados a la práctica de la tarea, lo cual cumple con la característica esencial de una conducta aprendida. Ante ese escenario, la mirada mostró una clara preferencia de visualización por los cambios en el ambiente frente al movimiento manual. Considerando los planteamientos teóricos actuales respecto a la necesidad de

desarrollar modelos predictivos para el control de efectores del SN, es posible proponer que frente a tareas visuomotoras en ambientes dinámicos, el SN desarrolla estrategias de búsqueda sensorial activa que responden a las necesidades sensoriales y a la variabilidad del ambiente. La práctica continua de la tarea permite optimizar el control de los movimientos oculares, estableciendo una relación preferentemente anticipatoria, tanto en el espacio como en el tiempo, con el medio externo. De esta forma, es probable que la adquisición de un modelo de control para los efectores sensoriales (respecto al movimiento activo de la retina en el espacio) facilite la adquisición de modelos de control para los segmentos corporales, lo cual podría responder a una necesaria secuencialidad en ambos procesos, en concordancia con lo propuesto teóricamente por autores revisados previamente (Lalazar & Vaadia, 2008).

Los hallazgos expuestos aquí amplían nuestro conocimiento respecto a los procesos cognitivos tras el aprendizaje de tareas visuomotoras. En particular, permite comprender cuales son las necesidades sensoriales y su prioridad para el SNC frente a tareas ecológicas que demandan la adquisición de memorias sensorio-motoras para el control de los efectores. Además, aporta a la discusión teórica al respecto, entregando evidencia para la evaluación de lo planteado por distintos autores respecto a los modelos de control del movimiento. En un contexto aplicado, se contribuye a la comprensión del proceso de aprendizaje de habilidades sensoriomotoras, a la valoración del ambiente como condicionante de las estrategias de movimiento de los sujetos, y a la planificación de estrategias de búsqueda sensorial activa dirigidas hacia determinantes externos de la tarea, lo cual puede optimizar la enseñanza de la práctica deportiva, de la utilización de instrumentos que requieren un control manual de alto nivel (por ejemplo, en el instrumental quirúrgico), así como el reentrenamiento de habilidades sensoriomotoras en la

rehabilitación neurológica. Este último aspecto es de especial interés, ya que las actuales tendencias terapéuticas enfatizan el rol del ambiente en el desempeño motor de sujetos con secuelas neurológicas, pero carecen de una determinación específica respecto a las estrategias de entrenamiento. En ese sentido, parece igualmente relevante la disposición de recursos sensoriales hacia efectores, por ejemplo, las extremidades inferiores durante la marcha, o un utensilio doméstico durante la alimentación, como a las condiciones del medio en el cual se desarrolla la tarea. Así, la planificación de estrategias perceptuales activas constituye un aspecto más de la planificación terapéutica a considerar. Esto abre un nuevo desafío a la práctica clínica.

8. CONCLUSIONES

- Tareas visuomotoras exigen la adquisición de estrategias de control para los segmentos corporales, así como para el control de los movimientos oculares, lo cual explica la particular exploración visual que caracteriza a los sujetos frente a este tipo de tareas.
- Ante a ambientes dinámicos, la estrategia de exploración visual muestra características predictivas de los cambios en el ambiente, lo cual confiere mayor habilidad en el desempeño de la tarea.
- Tal estrategia de mirada se optimiza en el curso del aprendizaje, lo cual constituye un aspecto trascendental de la práctica de la tarea.
- Estrategias de búsqueda sensorial activa constituyen un aspecto necesario de incorporar al entrenamiento de conductas motoras.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Barnes, G. R. "Cognitive processes involved in smooth pursuit eye movements". *Brain and Cognition*. 68(3): 309–26, 2008.
- Becker, W., & Fuchs, A. F. "Prediction in the oculomotor system: smooth pursuit during transient disappearance of a visual target". *Experimental Brain Research*. 57: 562–575, 1985.
- Bowman, M. C., Johansson, R. S., Johansson, R. S., & Flanagan, J. R. "Eye-hand coordination in a sequential target contact task". *Experimental Brain Research*. 195(2): 273–83, 2009.
- Crapse, T. B., & Sommer, M. "Corollary discharge across the animal kingdom". *Nature Reviews Neuroscience*. 9(8): 587–600, 2008.
- Crawford, J. D., Medendorp, W. P., & Marotta, J. J. "Spatial transformations for eye-hand coordination". *Journal of Neurophysiology*. 92(1): 10–9, 2004.
- Diaz, G., Cooper, J., Hayhoe, M. "Memory and prediction in natural gaze control". *Philosophical transactions of the royal society Biological sciences*. 368: 20130064, 2013.
- Duchowski, A. T. "Eye tracking methodology". *Vasa (second., p. 336)*. Springer, 2007.
- Flanagan, J. R., Bowman, M. C., & Johansson, R. S. "Control strategies in object manipulation tasks". *Current Opinion in Neurobiology*. 16(6): 650–9, 2006.
- Freyberg, S., & Ilg, U. J. "Anticipatory smooth-pursuit eye movements in man and monkey". *Experimental Brain Research*. 186(2): 203–14, 2008.
- Fukushima, K., Fukushima, J., Warabi, T., & Barnes, G. R. "Cognitive processes involved in smooth pursuit eye movements: behavioral evidence, neural substrate and clinical correlation". *Frontiers in Systems Neuroscience*. 7(4): 1-27, 2013.

- Green, C. S., & Bavelier, D. "Action video game modifies visual selective attention". *Nature*. 423(6939): 534–7, 2003.
- Hayhoe, M. M., McKinney, T., Chajka, K., & Pelz, J. B. "Predictive eye movements in natural vision". *Experimental Brain Research*. 217(1): 125–36, 2012.
- Hayhoe, M., Mennie, N., Sullivan, B., & Gorgos, K. "The Role of Internal Models and Prediction in Catching Balls". American Association for Artificial Intelligence, 2005.
- Ito, M. "Control of mental activities by internal models in the cerebellum". *Nature Reviews Neuroscience*. 9(4): 304–13, 2008.
- Johansson, R. S., Westling, G., Bäckström, a, & Flanagan, J. R. "Eye-hand coordination in object manipulation". *The Journal of Neuroscience*. 21(17): 6917–32, 2001.
- Komogortsev, O. V, & Karpov, A. "Automated classification and scoring of smooth pursuit eye movements in the presence of fixations and saccades". *Behavior Research Methods*. 45(1): 203–15, 2013.
- Kowler, E. "Eye movements: the past 25 years". *Vision Research*. 51(13): 1457–83, 2011.
- Krakauer, J. W., & Mazzoni, P. "Human sensorimotor learning: adaptation, skill, and beyond". *Current Opinion in Neurobiology*. 21(4): 636–44, 2011.
- Krauzlis, R. J. "The control of voluntary eye movements: new perspective". *The Neuroscientist*. 11(2): 124–37, 2005.
- Lalazar, H., & Vaadia, E. "Neural basis of sensorimotor learning: modifying internal models". *Current Opinion in Neurobiology*. 18(6): 573–81, 2008.
- Land, M. F. "Eye movements and the control of actions in everyday life". *Progress in Retinal and Eye Research*. 25(3): 296–324, 2006.

- Land, M. F., & McLeod, P. "From eye movements to actions: how batsmen hit the ball". *Nature Neuroscience*. 3(12): 1340–5, 2000.
- Land, M. F., & Tatler, B. W. "Looking and Acting" (first., p. 269). Oxford University Press, 2009.
- Land, M., Mennie, N., & Rusted, J. "The roles of vision and eye movements in the control of activities of daily living". *Perception*. 28(11): 1311–1328, 1999.
- Patla, A. E., & Vickers, J. N. "How far ahead do we look when required to step on specific locations in the travel path during locomotion?". *Experimental Brain Research*. 148(1): 133–8, 2003.
- Rothkopf, C. A., Ballard, D. H., Hayhoe, M. M., & Regan, O. "Task and context determine where you look". *Journal of vision*. 7: 1–20, 2007.
- Rotman, G., Troje, N. F., Johansson, R. S., & Flanagan, J. R. "Eye Movements When Observing Predictable and Unpredictable Actions". *Journal of neurophysiology*. 96: 1358–1369, 2006.
- Sailer, U., Flanagan, J. R., & Johansson, R. S. "Eye-hand coordination during learning of a novel visuomotor task". *The Journal of Neuroscience*, 25(39): 8833–42, 2005.
- Salvucci, D. D., & Goldberg, J. H. "Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols". *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research & Applications*. 71–78, 2000.
- Schmidt, R., & Lee, T. "Motor control and learning" (Fifth edit., pp. 1–582). Human Kinetics, 2011.
- Sharpe, J. a. "Neurophysiology and neuroanatomy of smooth pursuit: lesion studies". *Brain and Cognition*. 68(3): 241–54, 2008.

- Shinoda, H., Hayhoe, M. M., & Shrivastava, A. "What controls attention in natural environments?". *Vision Research*. 41(25-26): 3535–45, 2001.
- Shumway Cook, A., & Woollacott, M. "Motor control: translating research into clinical practice" (p. 631). Lippincott Williams & Wilkins, 2012.
- Sommer, M. a., & Wurtz, R. H. "Influence of the thalamus on spatial visual processing in frontal cortex". *Nature*. 444(7117): 374–7, 2006.
- Terao, Y., Andersson, N. E. M., Flanagan, J. R., & Johansson, R. S. "Engagement of Gaze in Capturing Targets for Future Sequential Manual Actions". *Journal of Neurophysiology*. 88: 1716–1725, 2012.
- Vaziri, S., Diedrichsen, J., & Shadmehr, R. "Why does the brain predict sensory consequences of oculomotor commands? Optimal integration of the predicted and the actual sensory feedback". *The Journal of Neuroscience*. 26(16): 4188–97, 2006.
- Wolpert, D. M. "Computational approach to motor control". *Trends in Cognitive Sciences*. 1(6): 209–216, 1997.
- Wolpert, D. M., Diedrichsen, J., & Flanagan, J. R. "Principles of sensorimotor learning". *Nature Reviews. Neuroscience*. 12(12): 739–51, 2011.
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. "Computational principles of movement neuroscience". *Nature Neuroscience*. 3: 1212–1217, 2000.
- Yarrow, K., Brown, P., & Krakauer, J. W. "Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports". *Nature Reviews Neuroscience*. 10(8): 585–96, 2009.

10. ANEXOS

n° 1

CONSENTIMIENTO INFORMADO

Estrategias de mirada durante el aprendizaje de modelos internos en una tarea visuomotora

Nombre del Investigador principal: Dr. Pedro Maldonado A.

Nombre del segundo Investigador: Klgo. Juan José Mariman R.

Institución: Programa de Fisiología y Biofísica, ICBM, Facultad de Medicina, Universidad de Chile.

Teléfono: 9786035

Invitación a participar: Tenemos el agrado de invitarlo a participar en el proyecto de investigación "Adquisición secuencial de modelos internos en tareas de aprendizaje visuomotor". Si luego de finalizada la lectura de este documento algo no le ha quedado completamente claro, no dude en consultar al investigador responsable.

Objetivos: Esta investigación tiene por objetivo evaluar el proceso de aprendizaje de habilidades visuales y motoras que permitan desarrollar una tarea en computador.

Procedimientos: Si Ud. acepta participar será conducido al laboratorio de neurosistemas de la facultad para realizar el procedimiento experimental. Se instalará un dispositivo de registro de seguimiento ocular montado en un arnés sobre su cabeza, lo cual nos dará un registro en video del movimiento de sus ojos. Este procedimiento es absolutamente externo y no invasivo. Además se le solicitará manipular un comando tipo joystick para registrar su habilidad manual. La tarea consistirá en mover un cursor para contactar un elemento que se desplazará en la pantalla. El tiempo de la tarea será 60 min aprox., y el tiempo total del procedimiento, incluyendo el montaje y calibración, no debiese superar los 90 min. Dada las características de la investigación, solo necesitamos un día de registro en un horario a consensuar mutuamente.

Riesgos: El registro de seguimiento ocular no han mostrado efectos adversos para los sujetos. Por otro lado, la estimulación visual por medio de un monitor no ha mostrado efectos nocivos y no produce efectos diferentes a los que se obtienen al trabajar por el mismo periodo en un computador. A pesar de que no hay evidencia científica de que estos procedimientos causen problemas a la salud, el periodo de registro pudiera llegar a producir cansancio. Por motivos de seguridad y metodológico, se llenará una ficha con sus datos, en los cuales se incluirá información relacionada a enfermedades psiquiátricas, neurológicas y uso de drogas. Si se declara el padecimiento de alguno de los problemas descritos anteriormente, usted no será seleccionado para este estudio.

Costos: Los procedimientos realizados en este proyecto no tendrán ningún costo para Ud.

Beneficios: Un beneficio directo de este estudio es el contribuir a implementar una nueva línea de investigación en nuestro país, además de constituir un aporte a la comprensión de los mecanismos de aprendizaje motor y sus modelos teóricos.

Alternativas: Si Ud. decide no participar en esta investigación, solo tiene que informarlo a los investigadores. Esto no significará ningún perjuicio para Ud.

Confidencialidad: Toda la información derivada de su participación en este estudio será conservada en estricta confidencialidad, lo que incluye el acceso de los investigadores o agencias supervisoras de la investigación. Cualquier publicación o comunicación científica de los resultados de la investigación será completamente anónima.

Información adicional: Ud. será informado si durante el desarrollo de este estudio surgen nuevos conocimientos o complicaciones que puedan afectar su voluntad de continuar participando en la investigación.

Voluntariedad: Su participación en esta investigación es totalmente voluntaria y se puede retirar en cualquier momento comunicándolo al investigador. De igual manera el investigador podrá determinar su retiro del estudio si considera que esa decisión va en su beneficio del proyecto.

Complicaciones: En el improbable caso de que Ud. presente complicaciones directamente dependientes de la aplicación de las técnicas utilizadas en este estudio, Ud. recibirá el tratamiento médico completo de dicha complicación, financiado por el proyecto al cual se asocia este estudio, y sin costo alguno para Ud. o su sistema previsional.

Derechos del participante: Si Ud. requiere cualquier otra información sobre su participación en este estudio puede llamar a:
Investigador: Juan José Mariman Rivero, fono: 81928168
Autoridad de la Institución: Dr. Pedro Maldonado A. fono: 9786035

Conclusión:
Después de haber recibido y comprendido la información de este documento y de haber podido aclarar todas mis dudas, otorgo mi consentimiento para participar en el proyecto "Adquisición secuencial de modelos internos en tareas de aprendizaje visuomotor".

_____ Nombre del sujeto	_____ Firma	_____ Fecha
_____ Nombre del informante	_____ Firma	_____ Fecha
_____ Nombre del investigador	_____ Firma	_____ Fecha