

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE PSICOLOGÍA

"SOBRE LA DINÁMICA DE LA RESPUESTA EN UNA TAREA DE MEMORIA DE PROCEDIMIENTO"

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN PSICOLOGÍA

PRESENTA:

JAIME DANIEL CADENA VALENCIA

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Índice

Dedicatoria.....	3
Agradecimientos.....	4
Resumen.....	5
Introducción	6
El movimiento como un problema de información.	10
Conceptos de teoría de la información.	10
Sistema motor y procesamiento de información.	13
Experimento de toque recíproco (Reciprocal Tapping Experiment).....	14
Justificación del uso de una función logarítmica.....	16
Ley de Fitts.	18
Movimientos a través de túneles: Ley de la conducción (Steering Law).	19
Función de Potencia de Adquisición de Habilidades: Características y Propiedades.....	21
Uso de la Función de Potencia y Justificación.	23
Función de potencia de adquisición de habilidades y la función de Fitts: dos caras de la misma moneda.....	24
Equivalencias entre principios.	26
Condiciones Iniciales.....	27
Función de potencia de adquisición de habilidades como una función dependiente de los requisitos relativos de precisión. Propiedades de la función factorizada.....	30
Planteamiento del Problema.....	32
Justificación.....	35
Pregunta de Investigación.....	36
Hipótesis	36
Método.....	37
Resultados.....	40
Discusión y futuras direcciones.	52
Conclusiones.....	55
Anexo	57
Bibliografía.....	62

Dedicatoria

A mis padres y maestros.

Agradecimientos

"La ciencia son hechos; de la misma manera que las casas están hechas de piedras, la ciencia está hecha de hechos; pero un montón de piedras no es una casa y una colección de hechos no es necesariamente ciencia."

Henri Poincaré

Durante mi formación en la universidad, principalmente dentro de los laboratorios de investigación, esta cita es una de las principales motivaciones por las cuales me he acercado a la ciencia y al camino de la investigación.

Agradezco a mis padres por haberme brindado la oportunidad de estudiar una carrera universitaria y ser mis primeros maestros. Su apoyo ha sido invaluable

Agradezco a la Dra. Alejandra E. Ruíz Contreras por creer en mí y haberme acercado a la investigación científica pero sobre todo por haberme enseñado a pensar por mí mismo y a ser autocrítico. También doy gracias al Dr. Florente López por el apoyo a lo largo de todo este proyecto, por orientarme y corregirme en el desarrollo de mis ideas. Asimismo agradezco a la Dra. J. Marina Menez por la guía, reflexiones y orientación acerca de mi desarrollo como psicólogo. Sin duda ahora sé que el camino es más largo y enriquecedor de lo que había imaginado

También agradezco profundamente a mis profesores por la guía y formación que he recibido a lo largo de estos años. Este trabajo es reflejo de la motivación e inspiración resultante de los seminarios y discusiones académicas.

Resumen

La memoria de procedimiento es un tipo de memoria mediante el cual se adquieren distintas destrezas motoras. En este trabajo se abordó formalmente, en particular el proceso de adquisición de una habilidad motora, esto mediante el estudio de la tarea de la figura en el espejo; ésta permite analizar los cambios en el tiempo de ejecución conforme se practica.

Siendo el punto de partida el desarrollo formal en torno al movimiento humano dirigido hacia un objetivo y las funciones que describen curvas de aprendizaje, se obtuvo una función que desglosa la adquisición en términos de magnitudes de información.

Se realizaron experimentos para corroborar el modelo y sus premisas, obteniendo evidencia a favor del modelo.

Se discuten implicaciones y futuras direcciones.

Palabras Clave:

Memoria de procedimiento
Modelación matemática
Control motor

Tesis apoyada por el proyecto

DGAPA IN304211

Sobre la dinámica de la respuesta en una tarea de memoria de procedimiento

Introducción

Diferentes resultados y preparaciones experimentales muestran que la memoria no es un fenómeno unitario. Se identifican diferentes tipos de memoria que pueden clasificarse según el tipo de información y cómo se procesa. Acorde a lo anterior, la memoria declarativa es aquella capacidad de recolección consciente de hechos y eventos, que permite que la información sea comparada y contrastada con información previamente adquirida (Squire, 2004). Este tipo de memoria se ve afectada en la amnesia. En cambio la memoria no declarativa es disposicional; es decir implica el orden y estructura de la ejecución y no la recolección de eventos o sucesos (Squire, 2004). Este tipo de memoria se forma mediante modificaciones dentro de un sistema de ejecución especializado, en conjunto con la habilidad de extraer elementos comunes de una serie de eventos separados.

Entre los distintos tipos de memoria no declarativa encontramos la memoria de procedimiento; es aquella relacionada con las habilidades y destrezas motoras.

Se ha detectado una serie de regularidades en el estudio de la memoria de procedimiento. En la adquisición de habilidades motoras se observa que conforme se practica una tarea particular, el tiempo para realizarla disminuye siguiendo un patrón característico, denominado curva de aprendizaje. Este patrón se puede describir por medio de la denominada función de potencia (Newell & Rosenbloom, 1981) En las curvas de aprendizaje se grafica el número de ensayos o repeticiones de una tarea determinada en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas la variable dependiente que describe la ejecución, por ejemplo el tiempo para completar una tarea.

La función de potencia de adquisición de habilidades no solo predice que el tiempo de ejecución de una tarea motora disminuirá en función del número de ensayos que el participante realice sino que los cambios en la variable dependiente con

respecto a los ensayos serán cada vez menores conforme los ensayos aumenten. Esto quiere decir que se observarán cambios abruptos en los primeros ensayos, pero posteriormente los cambios de ensayo a ensayo serán cada vez menores.

La función de potencia tiene la siguiente forma:

$$T_m = c + T_o * N^{-\alpha} \quad (1)$$

Donde T_m es el tiempo que toma ejecutar la conducta de interés, T_o es el tiempo de ejecución en el primer ensayo (condición inicial), N es el número de ensayos o repeticiones realizadas, α es la razón a la cual disminuirán la variable dependiente (tiempo de ejecución) y c es la asíntota, es decir es el valor al que tenderán los datos a largo plazo.

Entre los diversos experimentos donde se ha ajustado exitosamente la función de potencia está el de dibujo a través del espejo (Snoddy, 1926; Milner, Corkin, & Teuber, 1968). En este experimento se pone al participante frente a un dispositivo que impide la visión de la mano. La única manera de ver la mano es a través de un espejo colocado frente al participante. En estas condiciones al participante se le pone una hoja de papel con una figura geométrica definida por 2 contornos oscuros en un fondo blanco (ver figura 1).

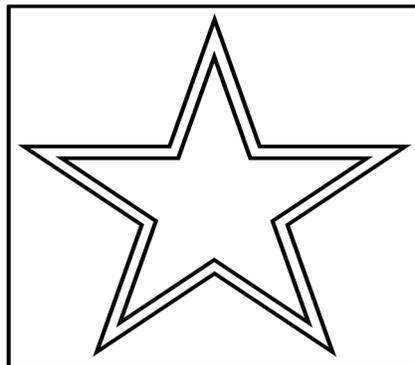


Figura 1
Ejemplo de la figura empleada
en la tarea de la figura en el
espejo.

La consigna del participante es realizar un trazo por en medio de la figura, rápidamente y sin tocar ninguno de los bordes. La dificultad de la tarea reside en que al no poder ver la mano directamente y valerse de la retroalimentación del espejo, ciertos movimientos se encontrarán invertidos; los movimientos horizontales no tendrán mayor dificultad, pero los verticales estarán invertidos.

En los primeros ensayos el participante tiene dificultades para realizar la tarea, teniendo como consecuencia tiempos de ejecución (el tiempo que le toma realizar un trazo por la figura) elevados en comparación con el tiempo que le tomaría si pudiera ver su mano directamente. Sin embargo conforme se realiza práctica el tiempo tenderá a reducirse.

Esta tarea se ha empleado para evaluar la memoria de procedimiento, ya que permite estudiar los cambios en el tiempo de ejecución conforme se realizan ensayos y en consecuencia inferir un proceso de adquisición de una habilidad. A través del estudio de los cambios del tiempo de ejecución, empleando, por ejemplo, la función de potencia, se obtiene información acerca del proceso de adquisición.

Esto último es de resaltar ya que no podemos tener observaciones directas de un proceso psicológico (e.g. aprendizaje) sin embargo mediante el estudio de los cambios en la conducta podemos realizar inferencias con respecto a un proceso determinado.

El propósito de esta disertación es abordar y describir formalmente propiedades de la memoria de procedimiento, particularmente el cómo es el proceso de adquisición de una respuesta motora, estudiando el caso particular de la tarea de la figura en el espejo. Es evidente que en la tarea se solicita la ejecución de un movimiento particular, con restricciones inherentes a la tarea. Entonces para abordar el proceso de adquisición se revisarán regularidades empíricas asociadas a los movimientos orientados a objetivos, es decir regularidades que han surgido del estudio del movimiento de los organismos cuando se quiere realizar un

objetivo o clase de movimiento particular (e.g. alcanzar una pluma colocada al alcance de su mano). La revisión de estos principios implica abordar la parte de la memoria de procedimiento en la cual se ha adquirido toda la pericia posible en una habilidad específica, lo cual se detallará en secciones posteriores. Luego se revisarán los principios relacionados con la adquisición de habilidades (e.g. función de potencia de adquisición de habilidades) en las cuales el aprendizaje de una habilidad está ocurriendo. Teniendo como premisas las formalizaciones revisadas, se plantearán hipótesis con respecto a la posible interacción entre las expresiones teóricas bajo estudio, permitiendo así contrastarse empíricamente.

La motivación de este trabajo es que hay poca información disponible con respecto a las propiedades inherentes a la etapa de adquisición en la memoria procedimental en una tarea motora. Si bien se han descrito algunas propiedades mediante el ajuste de funciones (e.g. pendiente de la curva) de las curvas de aprendizaje generadas en la fase de adquisición, no hay desarrollos teóricos que den cuenta del significado de los parámetros obtenidos ni estructuras que permitan elaborar teorías formales (es decir teorías que partan de un grupo de premisas para derivar distintos fenómenos y regularidades, coherentes con el fenómeno bajo estudio). Entonces se propone abordar el fenómeno de adquisición mediante el empleo del conocimiento en regularidades empíricas que han sido estudiadas con mayor profundidad, además de someter a corroboración los corolarios o consecuencias de los razonamientos expuestos.

En los apartados siguientes se revisarán los trabajos teóricos y experimentales con respecto al control motor y movimientos dirigidos a objetivos. Trabajo previo (Fitts, 1992) muestra que el problema del tiempo de ejecución de un movimiento específico es un problema de cantidades de información necesarias para realizar tal movimiento, por esta razón se revisarán conceptos básicos de la teoría matemática de la información. Luego se revisarán los desarrollos en materia de curvas de aprendizaje y sus propiedades. Tomando en cuenta las características del proceso de interés, las condiciones de estudio y las propuestas teóricas, se abordará el fenómeno empleando un grupo de supuestos básicos, de manera que

la estrategia empleada sea inductiva, asimismo se buscará verificar empíricamente algunas conclusiones. Finalmente, en la discusión se estudiarán las consecuencias lógicas del modelo propuesto y los contrastes con la realidad empírica.

El movimiento como un problema de información.

Son indudables los progresos alcanzados en la psicología empleando como medida elemental la conducta de los organismos. Definimos conducta como el conjunto de acciones de un ser vivo ante una situación. El objetivo principal de esta tesis abordar formalmente el fenómeno de adquisición de una habilidad motora, lo cual implica el cómo se organiza la conducta ante una situación muy específica: el aprendizaje de una habilidad motora simple. Sin embargo para poder alcanzar este objetivo es indispensable conocer cómo se organizan conductas elementales dirigidas hacia un objetivo, debido a que la preparación experimental que se pretende estudiar implica principalmente movimientos con una intencionalidad y ejecución particular. Aplicaciones de teoría de la información a la conducta, concretamente el trabajo del psicólogo Paul Fitts han dado como resultado la propuesta de modelos teóricos que pueden dar cuenta de cómo se organiza la conducta de movimientos dirigidos a un objetivo en función de la cantidad necesaria de información para efectuarlo. Por tanto es necesario revisar conceptos básicos de teoría de la información.

Conceptos de teoría de la información.

El estudio de la conducta se ha caracterizado por el escrutinio de las asociaciones entre los estímulos presentados y la respuesta obtenida. Generalmente los estímulos se describen en términos de magnitudes físicas. Sin embargo los estímulos empleados en diversas preparaciones experimentales son algo más que estimulación a los receptores sensoriales; también representan información (Blanco, 1996).

Ejemplo de lo anterior es que la frase: “un cometa colisionará con la tierra” contiene la misma información tanto si se escucha como si se lee. Por tanto la información que un organismo interpreta del medio trasciende la dimensión física (Blanco, 1996; Coombs, 1981). Lo anterior tiene una gran similitud con una teoría llamada teoría matemática de la comunicación (Shannon, 1948; Pierce, 1980) la cual ha sido aplicada en diversos campos, entre ellos la psicología, particularmente en los campos de psicofísica y memoria (Blanco, 1996).

La teoría matemática de la información trata esencialmente acerca de la transmisión de un mensaje dadas ciertas condiciones, como son que el medio o canal a través del cual se está transmitiendo un mensaje tenga ruido, también la cantidad máxima o límite de información que el canal puede transmitir (Pierce, 1980), siendo esta última idea la que esencialmente se ha aplicado en el campo de la psicología (Blanco, 1996; Coombs, 1981).

A continuación se muestra un cuadro enunciando algunos de los conceptos clave de la teoría matemática de la información y su similitud con un diagrama básico del modelo psicofísico (Blanco, 1996).

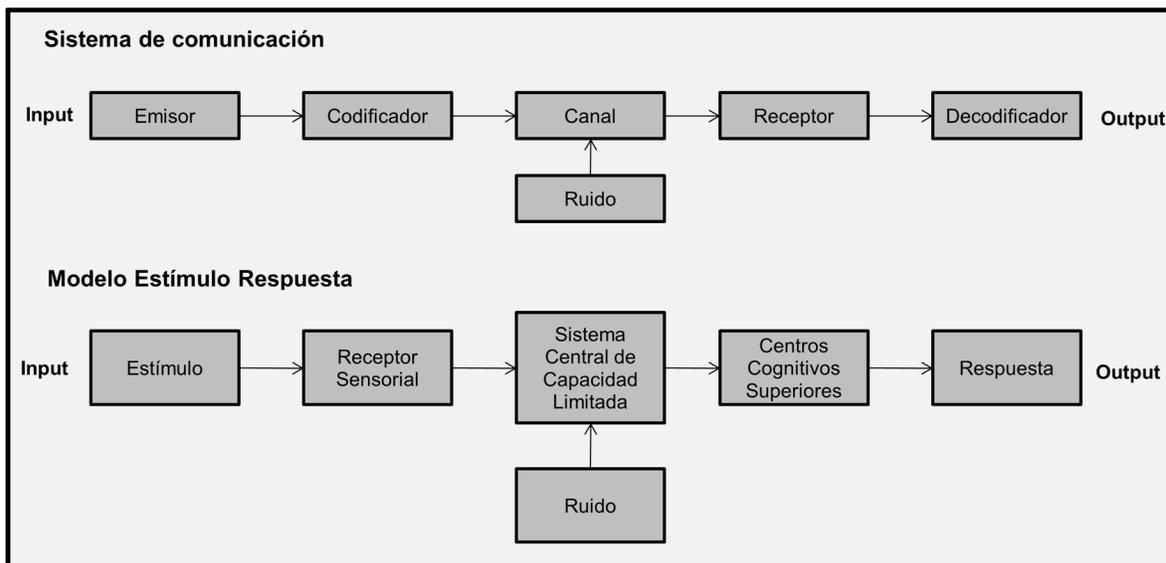


Figura 2

Similitudes entre un sistema de comunicación ideal y un modelo Estímulo-Respuesta

Adaptado de Blanco, 1996.

Previamente se han realizado aplicaciones de la teoría matemática de la información en experimentos de identificación y discriminación de estímulos. Gardner empleó tonos sinusoidales entre los 15 y 110 decibeles (entre 4 a 10 tonos) en diferentes condiciones. Al aumentar el número de tonos a identificar, aumentaba la información que los participantes debían procesar. Mediante técnicas de la teoría matemática de la información se estimó cuanta información entraba y cuanta información procesaban los participantes. Resultados de esta aplicación indican que los participantes son eficientes para procesar información hasta cierto umbral. Una vez rebasado este umbral la ejecución se mantiene constante. (Blanco, 1996). Si bien la teoría matemática de la comunicación ha sido aplicada a preparaciones relacionadas con el estudio de la memoria, particularmente la memoria declarativa, también se han propuesto aplicaciones al sistema motor.

Sistema motor y procesamiento de información.

Trabajo previo ha mostrado que no es posible estudiar el sistema motor sin tomar en cuenta el sistema sensorial; diversas observaciones de experimentos conductuales son fácilmente caracterizadas por un sistema receptor-neuro-efector descrito brevemente en este trabajo (Fitts, 1992).

Estudiar el sistema completo brinda la posibilidad de determinar algunas propiedades implícitas. Paul Fitts fue el primer psicólogo en proponer este razonamiento. De acuerdo con su trabajo clásico, si a un participante S se le pide efectuar respuestas rápidas y uniformes que han sido bien aprendidas previamente, manteniendo constantes todos los estímulos relevantes excepto aquellos relacionados con la propia respuesta del individuo (e.g. características de los estímulos ante los cuales responder), se puede crear una situación experimental tal que sería razonable asumir que la ejecución está limitada principalmente por la capacidad del sistema motor(Fitts, 1992).

Con lo anterior se define la capacidad del sistema motor (o el límite de procesamiento de información del sistema motor) como la habilidad de producir una clase de movimientos entre distintas alternativas. A mayor número de alternativas o clases, mayor es la cantidad de información o entropía de un tipo particular de respuesta(Fitts, 1992).

La hipótesis de Fitts con respecto al límite de información en el sistema motor era que al evaluar cualquier movimiento (independientemente de la tarea), conceptos como latencia o tiempo de ejecución, amplitud o distancia a recorrer y variabilidad de la respuesta están relacionados cuantitativamente bajo la idea de límite de procesamiento de información.

La **hipótesis específica** propuesta por Fitts es:

“Si la amplitud y los límites de tolerancia de una tarea son controlados por E (experimentador) y si, S (participante) tiene la instrucción de trabajar a su máxima

capacidad, entonces el tiempo promedio por respuesta será directamente proporcional al promedio de la cantidad mínima de información por respuesta, demandada por condiciones particulares de amplitud y tolerancia”(Fitts, 1992).

Fitts realizó diversos experimentos para comprobar esta hipótesis, en los cuales las variables de interés fueron la amplitud promedio de movimiento, duración promedio, la distribución de respuestas, en una serie de movimientos rápidos y uniformes. Sin embargo para el presente trabajo es de mayor relevancia el experimento descrito en la siguiente sección.

Experimento de toque recíproco (Reciprocal Tapping Experiment).

La descripción del experimento de toque recíproco es importante debido a la similitud que guarda con el experimento de interés en este trabajo.

En la siguiente imagen se ilustra la preparación.

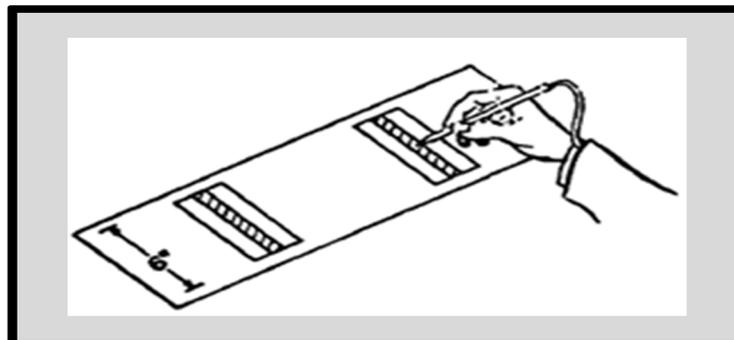


Figura 3

Dispositivo Experimental empleado por Fitts. La consigna del participante fue tocar con el estilete las placas metálicas en el centro, alternadamente sin errores. Adaptado de Fitts, 1992.

La tarea del participante consistía en realizar trazos con un estilete del centro de una placa a otra (parte rayada, figura 3). Se registraba cada vez que el estilete tocaba la placa y el tiempo en el que lo hizo. Asimismo, si el participante se seguía

de largo o no alcanzaba la placa se registraba un error (parte clara del recuadro de la placa, figura 2).

Las variables independientes manipuladas en este experimento fueron la distancia o amplitud entre las placas (en adelante a), (2, 4,8, o 16 pulgadas) y la variabilidad de la respuesta o margen de error en función del ancho de la placas (2, 1, .5, o .25 pulgadas; en adelante w). Cada ensayo tenía una amplitud y un ancho de placas fijo (e.g. $a= 8$ pulgadas, $w=2$ pulgadas).

La variable dependiente de interés era el tiempo medio de ejecución (tiempo promedio transcurrido entre tocar una placa y otra).

Los resultados muestran que para cada valor de w , conforme se incrementa la distancia a , aumenta el tiempo medio de ejecución. De manera similar, para cada categoría de a , el tiempo se incrementa conforme se hace más estrecho el ancho de las placas (w). Con lo anterior se indica que la relación entre amplitud de movimiento y la tolerancia del mismo pueden estar relacionadas por un único principio(Fitts, 1992). Este principio es, de acuerdo a Fitts, la cantidad mínima de información para organizar un movimiento en función de las características del mismo.

En notación de teoría de la información esto se escribe así

$$I_d = \log_2 \left(\frac{2a}{w} \right) \quad (2)$$

Donde I_d es índice de dificultad, a , la amplitud y w la tolerancia de error.

Con la función anterior se pretendió esbozar que la organización mínima de un movimiento depende de una razón entre un conjunto de amplitudes y la tolerancia de error. El numerador es hasta cierto límite arbitrario debido a que a diferencia del margen de error, el total de amplitudes de un movimiento es desconocido, únicamente limitado por la preparación experimental, por tanto el que la amplitud esté multiplicada por 2 es por razones de conveniencia (esto con el fin de evitar una indeterminación), ya que si:

$$a \cong w \rightarrow I_d = \log_2(2 * 1) = 1$$

Entonces el índice de dificultad no puede ser cero.

Justificación del uso de una función logarítmica.

El uso de una función logarítmica está relacionado con el concepto de cantidad mínima de información. La función logarítmica, sus propiedades y su aplicación a la teoría de la información están basadas en una serie de teoremas más allá del alcance de esta tesis. Sin embargo hay una serie de principios con los que puede explicarse el empleo de logaritmos razonablemente.

Cuando se tiene un mensaje con n posibles estados (e.g. El timbre de una casa tiene 2 posibles estados, sonando y no sonando), la cantidad mínima de información para transmitir a alguien ese mensaje es igual a su logaritmo:

$$I = \log_2(n) \quad (3)$$

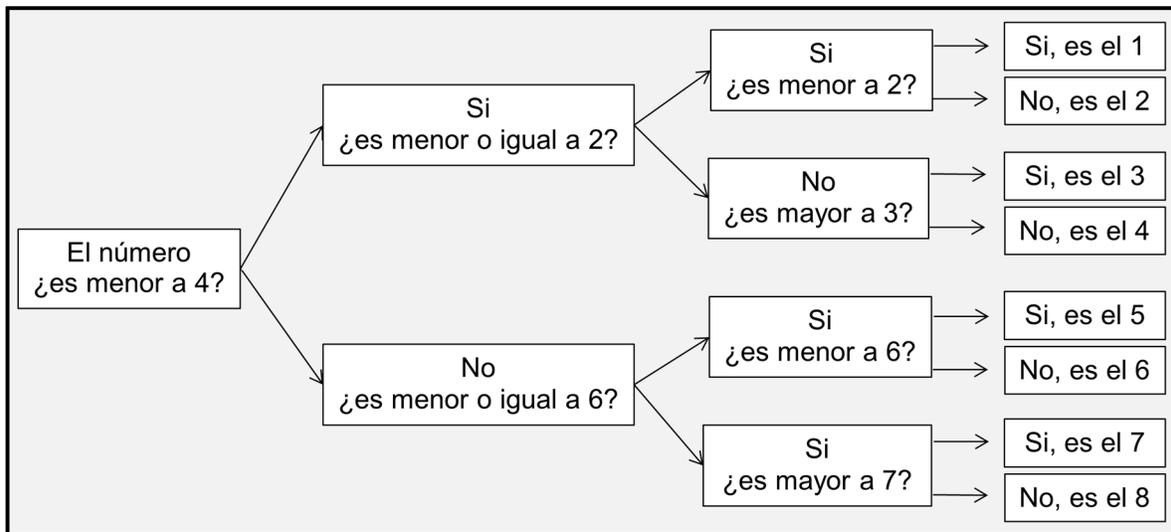
Donde I es la cantidad de información (cuando la base es 2 las unidades se denominan bits) y n el número posible de estados. Se utiliza la base 2 debido a su simplicidad, un sistema por más sencillo que sea tiene mínimo 2 posibles estados.

La cantidad de información puede definirse como la organización mínima para definir un mensaje (Blanco, 1996; Coombs, 1981; Shannon, 1948; Pierce, 1980).

Por ejemplo, supóngase un sistema con 8 posibles estados (1, 2, 3... 8) y se tiene que averiguar en qué estado se encuentra usando preguntas con respuestas afirmativas o negativas. De acuerdo a la función anterior sabemos que la cantidad de información en este sistema es:

$$I = \log_2(8) = 3 \text{ bits}$$

Esto nos dice que haciendo preguntas “afirmativo o negativo” necesitamos solamente 3 preguntas para determinar en qué estado está el sistema. Lo anterior se esboza en el siguiente recuadro.



Como puede verse en el recuadro, el número de preguntas mínimas para saber el estado de un sistema es 3, lo cual es equivalente a la información contenida en el sistema (3 bits).

Con este ejemplo puede esbozarse el por qué la función logaritmo es ideal para representar cantidades de información. Aunque si bien este es solo un ejemplo, este tema ha sido abordado con mayor rigor, teniendo como resultado demostraciones formales de teoremas que aseguran que la función logaritmo del número posible de estados es una buena medida de cantidad de información(Shannon, 1948).

El caso que se abordará en este trabajo es la cantidad de información mínima para organizar un movimiento. Es decir ¿Cuánta información se necesita para que un participante pueda realizar un movimiento?

El siguiente apartado ilustrará cómo puede resolverse esta pregunta, de acuerdo a la terminología revisada y a la hipótesis de Fitts mencionada en el apartado de sistema motor y procesamiento de información

Ley de Fitts.

Una vez discutida la terminología y recordando la hipótesis específica de Fitts planteada anteriormente, obtenemos

$$T_m \propto I \quad (4)^1$$

Donde T_m es el tiempo que toma realizar un movimiento e I es la cantidad mínima de información, sustituyendo I por el índice de dificultad previamente definido

$$T_m \propto \log_2 \left(\frac{2a}{w} \right) \quad (5)$$

Para convertir a una igualdad, hay que establecer una constante de proporcionalidad obteniendo al fin

$$T_m = b \log_2 \left(\frac{2a}{w} \right) \quad (6)$$

Considerando que la ordenada al origen puede ser diferente de cero, tenemos

$$T_m = m + b \log_2 \left(\frac{2a}{w} \right) \quad (7)$$

Con lo anterior podemos concluir que, en las condiciones descritas anteriormente, el tiempo de ejecución al realizar un movimiento orientado a un objetivo depende de la distancia a recorrer y el margen de error requerido para realizar tal movimiento, es decir el tiempo depende de la cantidad de información requerida para ejecutar un movimiento. Si los parámetros anteriores se mantienen constantes, la función anterior describe que el tiempo de ejecución de una tarea bien aprendida tenderá a ser constante.

La constante de proporcionalidad también nos indica que hay un límite en la capacidad de ejecutar un movimiento, siendo esta constante un indicador de cuánto tiempo de ejecución es necesario por cantidad de información.

¹ El símbolo \propto significa "proporcional a"

Si bien esta función describe de qué depende el tiempo de movimiento, no describe cómo se desarrolla el movimiento es decir su dinámica. Para poder profundizar en ello es necesario estudiar detalladamente características como son la velocidad y la aceleración conforme se desarrolla el movimiento.

Movimientos a través de túneles: Ley de la conducción (Steering Law).

Como se ha revisado, la función propuesta por Fitts permite modelar movimientos dirigidos a un objetivo dependiendo de los requisitos relativos de precisión.

La ejecución de la tarea de figura en el espejo no depende de la repetición de trazos entre 2 puntos sino de la repetición de trazos limitados constantemente por 2 barreras, es decir el realizar trazos a través de un "túnel". Por tanto es necesario modelar la ejecución de la tarea cuando el movimiento está limitado por 2 barreras.

El modelo propuesto por Fitts no da cuenta del movimiento a lo largo de una trayectoria dada; el movimiento en la tarea de figura en el espejo es más limitado y restringido en comparación con la preparación experimental de Fitts.

Lo anterior se hace evidente revisando la construcción del índice de dificultad. En el paradigma clásico de Fitts, el índice de dificultad está definido en función de la distancia entre los objetivos y la tolerancia de error al alcanzar el objetivo. Sin embargo, en una tarea cuya consigna es realizar un trazo a través de 2 barreras (túnel) la tolerancia de error está determinada por la distancia entre las líneas paralelas, condición que a diferencia del movimiento modelado por Fitts, es constante a lo largo del movimiento y no solamente al alcanzar los objetivos.

Considerando la distancia entre líneas paralelas como la tolerancia de error, podemos entender analíticamente que el movimiento a través de un túnel equivale a realizar una serie de movimientos constantemente limitados por el margen de error, es decir que en lugar de tener un único movimiento orientado a un objetivo tenemos una serie de "n" movimientos orientados a un objetivo, donde n

movimientos se corresponde a la distancia total a recorrer. Accot y Zhai (1997) validaron experimentalmente este razonamiento², proponiendo un índice de dificultad con base al planteamiento anterior.

El índice de dificultad adquiere la siguiente forma:

$$I_d = \frac{a}{w} \quad (8)$$

Recordando que el tiempo de ejecución de un movimiento orientado a un objetivo es proporcional a la cantidad de información mínima para ejecutar el movimiento, es decir la expresión (4). El tiempo de ejecución de un movimiento a través de un túnel será:

$$T_m = m + b \frac{a}{w} \quad (9)$$

Con la función anterior podemos entender cualitativamente que la dificultad de una tarea en la cual es necesario ejecutar un movimiento orientado a objetivo, limitado constantemente por 2 barreras, es directamente proporcional a la distancia total de recorrido (amplitud) e inversamente proporcional a la tolerancia de error.

También es de notarse que esta forma de índice de dificultad tiene como consecuencia que la dificultad de la tarea es mayor en comparación al paradigma planteado por Fitts. Por ejemplo supóngase un movimiento simple donde la distancia a recorrer es de 10 cm y el margen de error de 2 cm.

Determinando la dificultad de la tarea con la función de Fitts obtenemos:

$$I_d = \log_2\left(2 * \frac{a}{w}\right)$$

$$I_d = \log_2\left(2 * \frac{10}{2}\right)$$

$$I_d = \log_2(10) \approx 3.32$$

Por el contrario si se emplean las mismas condiciones con excepción de que el movimiento será a través de un túnel, obtendremos lo siguiente

² Ver anexo

$$I_d = \frac{a}{w}$$
$$I_d = \frac{10}{2} = 5$$

Lo anterior indica que al estar el movimiento a través de un túnel más limitado en comparación con el caso simple la dificultad aumenta considerablemente.

Función de potencia de adquisición de habilidades: Características y propiedades.

Como fue mencionado en un inicio, las curvas de aprendizaje describe el cambio de una conducta conforme se realiza la práctica de una tarea concisa. En este caso la tarea de la figura en el espejo, el tiempo que toma realizar un ensayo disminuye conforme se practica. La observación de estos cambios permite inferir que está ocurriendo un proceso de adquisición de una habilidad motora, lo cual se denomina memoria procedimental.

Entre las características de los datos generados por esta preparación experimental (tiempo de ejecución) se encuentra que estos tenderán a disminuir monotónicamente, es decir, se encontrará una tendencia en el tiempo de ejecución a disminuir conforme se realiza práctica (lo que implica que es poco probable que exista un ensayo a partir del cual el tiempo de ejecución tenderá a aumentar). Por lo tanto la pendiente que pueden tener los datos será siempre negativa.

Las funciones que pretendan dar cuenta del proceso de adquisición tendrán que tener esta característica.

Con base en el trabajo de Cousineau, Hélie y Lefebvre (2003), las funciones de aprendizaje se pueden distinguir por contener las siguientes relaciones

$$f(N) = a + b (g(N)) \quad (10)$$

Donde a y b son parámetros lineales que actúan como límites de la curva, ya que a determina el nivel asintótico de la curva y b la amplitud o nivel de la curva. La función $g(N)$ se corresponde al núcleo de la función o la razón de cambio.

En general, una función que pretenda describir el proceso de adquisición de una habilidad motora debe tener esta estructura. Esta constitución o estructura involucra una serie de propiedades que son coherentes con los resultados empíricos y teóricos, asimismo describen características de la ejecución de la conducta mediante la cual se infiere el proceso de memoria procedimental.

La función de potencia de adquisición de habilidades indica que el tiempo de ejecución de una habilidad motora se reduce en función del número de ensayos. Asimismo los elementos de la función implican que tras una cantidad elevada de ensayos, el tiempo de ejecución tenderá a una constante.

Lo anterior puede observarse considerando el siguiente desarrollo.

Retomando la función de potencia de adquisición de habilidades (ecuación 1), puede reescribirse así

$$T_m = c + \frac{T_o}{N^\alpha} \quad (11)$$

Si N toma un valor lo suficientemente elevado o en otras palabras tras una cantidad considerable de ensayos, el cociente en la ecuación anterior será muy cercano a cero. Lo anterior indica que conforme N se incrementa el tiempo de ejecución tenderá a ser constante.

Matemáticamente podemos corroborar lo anterior hallando el límite de N cuando tiende a infinito, teniendo entonces:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \left[T_m = c + \frac{T_o}{N^\alpha} \right] = c \quad (12)$$

De no ocurrir esto, el tiempo de ejecución disminuiría hasta cero, lo cual no es posible. Lo anterior es válido para cualquier forma de curva de aprendizaje ya que en todo caso debe existir un límite para la disminución del tiempo, límite que

equivaldría a realizar el movimiento de manera eficiente. Por definición se conoce este límite si se asume como cierta la hipótesis de Fitts³. De ser así, podemos hallar una vía por la cual relacionar los principios de curvas de aprendizaje y movimientos dirigidos a objetivo. Esto último es esencial ya que esta equivalencia permitirá abordar el caso de la adquisición de una habilidad en la tarea de la figura en el espejo. Antes de explorar esta posibilidad, es necesario argumentar el por qué se empleará la función de potencia y no otra función.

Uso de la función de potencia y justificación.

La función de potencia de adquisición de habilidades no es la única función que se ha propuesto con respecto al ajuste de curvas de aprendizaje. Heathcote, Brown, y Mewhort (2000), han realizado importantes críticas con respecto a la validez de la función, destacando que una función exponencial ajusta mejor los datos de participantes individuales, pero la función de potencia ajusta mejor los datos de promedios grupales. Lo anterior ha llevado a la propuesta del modelo APEX que conjunta términos exponenciales y de potencia.

Con respecto a la controversia referente a encontrar la ecuación que explique las curvas de aprendizaje Newell, Liu, y Mayer-Kress (2001) han aplicado una teoría de gran alcance que es el análisis de sistemas dinámicos. Esta teoría busca entender cómo cambia un sistema con respecto al tiempo, caracterizando la escala de tiempo en la que cambia un sistema. Por ejemplo, en materia de habilidades motoras, tenemos distintas escalas temporales, desde cambios rápidos como es la adaptación necesaria para realizar una tarea motora novedosa como cambios lentos y graduales como es el desarrollo motor desde la infancia a la adultez.

La aplicación de teoría de sistemas dinámicos a las curvas de aprendizaje tiene como resultado que no existe una sola ecuación que describa los cambios de la conducta, sino toda una familia de ecuaciones como son curvas sigmoideas,

³ Revisar cita textual del apartado “Sistema motor y procesamiento de información”

exponenciales y de potencia. La ocurrencia de una función u otra depende de cómo son las escalas de tiempo de acuerdo a la tarea (Newell, Liu, & Mayer-Kress, 2001).

En esta disertación se empleará una función de potencia dada su generalidad, además, acorde con el trabajo mencionado previamente, la función en cuestión es un caso especial que ocurre cuando se da la superposición de diversos procesos. Siendo este desarrollo teórico una primera aproximación a la comprensión de una tarea particular de adquisición de una habilidad motora, se empleará la función de potencia como un caso idealizado de curvas de aprendizaje.

La validez de los razonamientos propuestos es independiente de la modelación de la razón de cambio de la curva, ya que como se expondrá en los siguientes apartados, el desarrollo de esta propuesta es independiente del núcleo o razón de cambio de la función (ecuación 10).

Función de potencia de adquisición de habilidades y la función de Fitts: dos caras de la misma moneda.

Existen similitudes y diferencias entre las funciones que describen el proceso de adquisición de una habilidad motora y el tiempo de ejecución de un movimiento orientado a un objetivo; entre las semejanzas encontramos que los modelos intentan dar cuenta del mismo fenómeno: el tiempo de reacción para ejecutar un movimiento dirigido a un objetivo, dadas unas condiciones específicas para realizar este movimiento. Sin embargo la situación que se pretende describir es un tanto diferente: la función de adquisición de habilidades trata de dar cuenta del tiempo de reacción de habilidades que se están adquiriendo y la función de Fitts de los tiempos de reacción una vez que la habilidad ya ha sido bien aprendida. La función de Fitts muestra de manera explícita que el tiempo de reacción es proporcional a la dificultad de la tarea mientras que la función de potencia emplea el mismo principio aunque de manera implícita.

Es posible hallar una relación entre estos principios tomando en cuenta que describen la misma conducta en instantes diferentes.

Por ejemplo, supóngase la ejecución de la tarea de la figura en el espejo en ausencia del espejo, es decir ¿qué sucedería en el caso de que el participante pudiera ver su mano directamente? De acuerdo a los modelos revisados, el tiempo de ejecución dependería de la distancia total a recorrer y del ancho de las líneas por el cual el participante tendría que conducir su trazo. En otras palabras y acorde con la literatura revisada, el tiempo de ejecución sería proporcional a la cantidad mínima de información necesaria para ejecutar el movimiento, en este caso la distancia total y el ancho entre las líneas; Esto indica que al ser el tiempo de ejecución constante, esta condición es en la que podemos conocer el tiempo óptimo de ejecución.

Ahora considérese el caso en el que el participante solo puede ver su mano a través del espejo. Tendríamos las mismas condiciones que fueron mencionadas en el caso anterior ya que el participante aún debe conducir su trazado entre 2 líneas con una distancia y un ancho entre líneas establecido. Sin embargo se tiene un factor adicional: la retroalimentación que el participante recibe de su ejecución está distorsionada por el espejo, factor al cual el participante se adapta conforme realiza más ensayos de la tarea. Esta adaptación se ve reflejada en la disminución del tiempo de ejecución en función del número de ensayos realizados, lo cual es congruente con la función de potencia.

Entonces, a la luz de la literatura revisada, es plausible postular que en la tarea de la figura del espejo el tiempo de ejecución es proporcional a la cantidad de información necesaria para ejecutar la tarea; por lo tanto existen al menos 2 magnitudes a considerar: una referente a la cantidad mínima de información necesaria para ejecutar un movimiento y otra cantidad de información asociada a la dificultad inicial de la tarea (distorsión de la retroalimentación), magnitud que se reduce conforme se practica la tarea.

Con los argumentos formales expuestos hasta ahora es plausible desarrollar un enunciado o proposición formal que nos permita abordar el proceso de adquisición de una habilidad motora.

Una manera de realizar esto es encontrando equivalencias entre los principios revisados, como se expondrá en la siguiente sección.

Equivalencias entre principios.

Teniendo como supuestos que el tiempo de ejecución es proporcional a la demanda de información de una tarea dada y que el modelo de Fitts y la función de adquisición de habilidades modelan los tiempos de ejecución en situaciones donde ha habido aprendizaje y donde comienza a haber aprendizaje, respectivamente, es válido afirmar lo siguiente.

Con el fin de comprender cómo ambos principios regulan la conducta en la tarea de la figura en el espejo y por lo tanto cómo actúa la memoria de procedimiento dado que la misma es una especialización de mecanismos previamente existentes, se quiere encontrar un enunciado en el cual ambos principios teóricos puedan igualarse. La pregunta sería ¿en qué momento ambos principios serían equivalentes? Una solución es describir a la función de adquisición de habilidades cuando ya ha ocurrido aprendizaje, es decir, cuando se ha realizado toda la práctica posible hasta que la ejecución es constante.

La manera en la que matemáticamente se puede expresar lo anterior es igualando el límite de la función de adquisición de habilidades cuando el número de ensayos tiende a infinito, con la función de Fitts, (sea entonces la igualdad de la expresión 9 y 12) es decir:

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} [T_m = c + T_o * N^{-\alpha}] = m + b \frac{a}{w}$$
$$c = m + b \frac{a}{w}$$

Esto implica que el tiempo no disminuirá indefinidamente sino que tenderá a una constante y esta constante es igual al tiempo óptimo para realizar la tarea en condiciones donde ya ha habido aprendizaje, lo cual es válido tomando en cuenta que la función de Fitts asume que el organismo trabaja a su máxima capacidad (Fitts, 1992) y la función describe el mejor tiempo que el participante podría tener dada la cantidad de información necesaria para ejecutar la tarea.

Sustituyendo en la función de potencia de adquisición de habilidades (ecuación 1) obtenemos:

$$T_m = m + b \frac{a}{w} + T_o * N^{-\alpha} \quad (12)$$

Condiciones iniciales.

Hasta este punto hemos definido cómo se relacionan los principios revisados previamente en condiciones donde ha ocurrido aprendizaje, es decir tras una cantidad n de ensayos la ejecución llega a una asíntota que se corresponde con la ejecución de la tarea en ausencia del factor de dificultad.

Sin embargo queda por resolver la pregunta ¿cómo se llega a tal asíntota?

Previamente se mencionó que la velocidad de cambio en una función de potencia no es constante, sino que en principio los cambios son abruptos, posteriormente son menores conforme ocurren más ensayos.

¿De qué dependen estos cambios? Podemos obtener una respuesta derivando la función de potencia de adquisición de habilidades, con respecto a los ensayos (N) para entender cómo son los cambios en la curva de aprendizaje

$$\frac{dT_m}{dN} \left[m + b \frac{a}{w} + T_o N^{-\alpha} \right]$$

$$\frac{dT_m}{dN} = -\alpha T_o N^{-(\alpha+1)}$$

Como puede apreciarse, la razón de cambio de la curva de aprendizaje no depende únicamente del valor del exponente sino también del parámetro asociado a la condición inicial (tiempo de ejecución en el primer ensayo, T_o) ya que en el proceso de derivación, los valores asociados a la asíntota y la ordenada son descartados. Esto conlleva a considerar que la definición de las condiciones iniciales no es trivial.

En general este parámetro libre es una magnitud de unidades desconocidas que se reduce conforme transcurren los ensayos, sin embargo el significado teórico no está definido.

Así como la asíntota está definida en términos de requisitos relativos de precisión y no en términos de tiempo absoluto, es necesario reformular la condición inicial para entender los cambios en la curva de aprendizaje. Finalmente la asíntota y la condición inicial están asociadas al mismo proceso, una es tiempo de ejecución cuando ya hubo aprendizaje y la otra es el tiempo cuando apenas comienza el aprendizaje.

Por definición la condición inicial o tiempo inicial T_o es el tiempo de ejecución del primer ensayo.

Acorde con los supuestos declarados, tiempo de ejecución de la respuesta es directamente proporcional a la cantidad mínima de información por respuesta o sea la expresión (4)

Es posible definir el tiempo de ejecución en el primer ensayo bajo el mismo principio, siendo el tiempo de ejecución motor proporcional a una magnitud desconocida E de información asociada a la complejidad de la tarea. En consecuencia tenemos

$$T_o \propto E \quad (13)$$

Puede sostenerse la validez de lo anterior en el marco de que la condición inicial describe un tiempo de ejecución motor, teniendo vigente el principio de que el

tiempo de ejecución de una conducta orientada a un objetivo, es proporcional a una cantidad de información necesaria para ejecutar el movimiento.

Dado que el principio de movimientos orientados a un objetivo es el mismo, al convertir la expresión anterior en una igualdad, la constante de proporcionalidad es también la misma

$$T_0 = b * E \quad (15)$$

Con lo anterior podemos entender que el tiempo de ejecución dependerá de la cantidad de información necesaria para ejecutar tal movimiento. En la tarea de la figura en el espejo encontramos cantidades de información asociadas a la amplitud del movimiento a realizar y el margen de error (w) y cantidades de información asociadas a ejecutar el mismo movimiento pero con una condición extra donde la retroalimentación está alterada.

Retomando la función de potencia de adquisición de habilidades y tomando en cuenta el desarrollo anterior, sustituyendo (15) en (13)

$$T_m = m + b \frac{a}{w} + T_o * N^{-\alpha}$$

$$T_0 = b * E$$

$$T_m = m + b * \frac{a}{w} + b * E * N^{-\alpha} \quad (16)$$

Como resultado del razonamiento seguido hasta ahora, los parámetros que determinan la forma de la curva no han tenido una alteración importante; la razón a la que cambia la curva no se modifica. Sin embargo, la forma resultante es una forma factorizada de una curva de aprendizaje que permite explicitar características de la ejecución de la tarea. La independencia de la forma de la curva respecto de la asíntota, indica que es posible explorar otros patrones de aprendizaje que no obedezcan necesariamente a una función de potencia pero que tenga como resultado la convergencia al mismo límite (asíntota). A continuación se revisan características de la ecuación obtenida.

Finalmente con esta función podemos entender algunos aspectos de la memoria de procedimiento, particularmente la etapa de adquisición de una habilidad.

En el siguiente apartado se describirán las propiedades de esta función y su relación con la memoria de procedimiento.

Función de potencia de adquisición de habilidades como una función dependiente de los requisitos relativos de precisión. Propiedades de la función factorizada.

De acuerdo al desarrollo teórico revisado hasta el momento, la forma factorizada de la función de potencia debe satisfacer ciertas propiedades enunciadas a lo largo del desarrollo del argumento, lo cual se verificará en esta sección.

Previamente se propuso que el proceso de aprendizaje implica que existe una cantidad de información adicional a procesar y que ésta disminuye con la práctica. Lo anterior se puede corroborar de la siguiente manera

Retomando la forma factorizada (16) y extrayendo el factor común a la expresión obtenemos finalmente:

$$T_m = m + b \left(\frac{a}{w} + E * N^{-\alpha} \right) \quad (17)$$

Con este modelo o función podemos esclarecer y abordar algunas propiedades de la adquisición de una habilidad motora en la memoria de procedimiento. Con la ecuación 17 se hace explícito que hay una cantidad adicional de información a procesar (parámetro E), asimismo que está disminuye en función de los ensayos (N). El parámetro m y b representa el límite de capacidad de procesamiento de información al realizar un movimiento, a la amplitud o distancia de recorrido, w el ancho o distancia entre líneas paralelas y α el exponente que indica la razón a la cual disminuirá el tiempo de ejecución.

La expresión resultante cumple el supuesto que enuncia que el tiempo de ejecución es proporcional a una demanda de información (4):

Entonces

$$I = \left(\frac{a}{w} + E * N^{-\alpha} \right)$$

Donde la cantidad de información es una función compuesta por las 2 magnitudes propuestas: la cantidad mínima de información necesaria para ejecutar un movimiento, dadas una amplitud y un margen de error y la información asociada a la dificultad de la tarea.

La forma factorizada también permite obtener información acerca de cómo cambia la curva, toda vez que esta ya no están definida en términos de condiciones iniciales mediante un parámetro libre arbitrario.

Derivando la forma factorizada (16) con respecto al número de ensayos se tiene

$$\frac{dT_m}{dN} \left[m + b \left(\frac{a}{w} + E * N^{-\alpha} \right) \right]$$

$$\frac{dT_m}{dN} = -\alpha b E N^{-(\alpha+1)}$$

Lo cual nos da información más detallada con respecto a cómo son los cambios en la curva.

Esto indica que la razón de cambio en una curva será más pronunciada dependiendo de qué tan difícil es la dificultad de la tarea (valores grandes de E equivalen a razones de cambio mayores) y la capacidad de aprendizaje del participante (entre más grande sea el valor de alfa, más pronunciados serán los cambios).

También la razón de cambio depende de la constante de proporcionalidad motora (parámetro b). Retomando esta constante, entre más grande sea este valor, el participante requiere de mayor tiempo para realizar un movimiento. La relación con la derivada indica que si el participante tiene mayor pericia para ejecutar un movimiento, la curva será menos abrupta.

Previamente se realizó una equivalencia entre el límite de la función cuando tiende a un infinito número de ensayos y la función de Fitts. Esta equivalencia debe de cumplirse también para la forma factorizada.

Corroborando lo anterior:

$$\lim_{N \rightarrow +\infty} \left[T_m = m + b \left(\frac{a}{w} + E * N^{-\alpha} \right) \right] = m + b \frac{a}{w}$$

Con lo cual se verifica la condición en la cual la habilidad ha sido aprendida.

Planteamiento del problema.

La memoria de procedimiento es un tipo de memoria no verbal mediante el cual se adquieren distintas destrezas motoras. Se sabe que la manera en la que se adquiere una habilidad motora específica es mediante la práctica secuencial de una conducta particular.

Básicamente se tiene que una habilidad motora se irá adquiriendo conforme se vaya practicando. Una forma de inferir la adquisición de una habilidad motora es tomar una variable que describa la ejecución del participante y estudiar sus cambios conforme se practica la habilidad de interés. La tarea de la figura en el espejo es una preparación experimental conveniente para el estudio de la adquisición de una habilidad motora, ya que mediante una manipulación sencilla se pone a prueba la destreza del participante para readaptarse a una nueva condición. Si bien en materia de adquisición es clara la relación que a mayor práctica, el participante mejorará su eficiencia, se desconocen principios básicos o propiedades esenciales más allá de esta premisa.

La estructura de la tarea permite emplear principios teóricos como los que fueron revisados en las secciones previas de este trabajo; principios asociados al control

motor, los cuales a su vez describen el fenómeno en términos de procesamiento de información y modelos descriptivos de las curvas de aprendizaje.

Mediante el desarrollo matemático propuesto se puede entender el problema de la adquisición de una habilidad como un problema de procesamiento de información, asimismo nos permite descomponer el problema en elementos de control motor y adquisición. El trabajo teórico desarrollado permite dar cuenta del significado de algunos parámetros estimados en los datos.

Sin embargo el planteamiento teórico está siempre participante al trabajo experimental, es por tanto necesario corroborar y someter empíricamente los principios empleados en el desarrollo propuesto.

Para ello se propone lo siguiente:

En primer lugar es necesario plantear una situación experimental simplificada que permita obtener datos sobre adquisición susceptibles de ser descritos por las ecuaciones propuestas.

La tarea de la figura en el espejo emplea una figura con forma de estrella, en la que se tienen que realizar trazos en distintas direcciones con distintos sentidos (e.g. un movimiento horizontal de derecha a izquierda y uno de izquierda a derecha tiene la misma dirección pero sentidos opuestos, en la figura de la estrella se tiene por tanto distintas direcciones y sentidos).

A diferencia de la tarea original, en este trabajo solo se empleó una sola dirección (movimientos horizontales) ya que el modelo empleado para abordar los movimientos orientados a un objetivo está ideado en una sola dirección (si bien es posible abordar una situación en 2 dimensiones, como es el caso de la figura de la estrella los cálculos se vuelven mucho más complejos, antes de generalizar a más dimensiones, valdría la pena corroborar la validez de los premisas en el caso más simple posible).

Por tanto es deseable que en vez de someter al participante a resolver una tarea con distintos ángulos y direcciones, se emplee un único par de líneas paralelas con amplitud y distancia entre líneas constante.

El modelo propuesto (ecuación 16) implica que el tiempo de movimiento es proporcional a la cantidad de información necesaria para ejecutar un movimiento. Es prioritario verificar esta hipótesis ya que es la primera premisa en la que se basa el modelo (sea entonces que se cumpla la ecuación 9).

Para verificar esta hipótesis se puede someter al participante a realizar una tarea similar al experimento realizado por Accot y Zhai (1997), en la cual el participante tiene que realizar movimientos a través de pares de líneas, donde ensayo a ensayo se variará la distancia a recorrer (a) y la distancia entre las líneas (w), básicamente es el replicar la existencia de la función lineal que describe el tiempo de ejecución en función de la cantidad de información⁴.

Asimismo esto nos permitirá estimar, previo al estudio de adquisición, los parámetros asociados a la capacidad de procesamiento de información de un participante (parámetros m y b).

En segundo lugar se aborda el problema de la adquisición de la habilidad motora.

De manera que se puedan realizar la tarea en una computadora, se le presentará a cada participante del experimento, en un monitor, un par de líneas con amplitud y distancia entre líneas que se mantendrá constante a lo largo de los ensayos. El participante tendrá que realizar trazos con un ratón (es decir moverá un cursor en la pantalla para realizar el trazo) a través de las líneas paralelas, sin embargo para emular el efecto del espejo la retroalimentación del participante (movimiento del cursor en la pantalla) será distorsionada de la siguiente manera: movimientos horizontales permanecerán intactos (si el participante mueve el ratón a la derecha el cursor se mueve en la misma dirección) pero los movimientos verticales se invertirán (si el participante mueve el ratón hacia abajo, el cursor en la pantalla se moverá hacia arriba).

⁴ Ver Anexo

Mediante este experimento se pretende estudiar la cantidad de varianza explicada por el modelo (ecuación 16). Es de resaltar que 2 parámetros a estimar del modelo se han obtenido del primer experimento (m, b), por tanto en este experimento solo se necesitará inferir 2 parámetros del modelo (α, E)

Mediante la función lineal asociada a la capacidad de procesamiento de información (ecuación 9) y los parámetros estimados de cada participante en el primer experimento se puede predecir el tiempo de ejecución al que tenderán los participantes al aproximarse a la asíntota. Este valor se puede conocer ya que en todos los ensayos la amplitud de recorrido y la distancia entre líneas paralelas se mantiene constante.

A través de los resultados de la segunda fase, se puede corroborar si los participantes se están o no aproximando a la asíntota que se pretende predecir; esto por medio de la comparación del tiempo de ejecución promedio en los últimos ensayos con los tiempos de ejecución predichos por la función.

No es posible saber *a priori* cuantos ensayos son necesarios para aproximarse a la asíntota, (para ello debería de conocerse de antemano el valor del parámetro α) así que se procurará correr la mayor cantidad de ensayos en un intervalo de tiempo determinado para así obtener la mayor cantidad de ensayos posibles.

Justificación.

La propuesta metodológica presentada en este trabajo se ha planteado de este modo ya que en la literatura referente a modelos matemáticos en psicología, generalmente se propone una estructura derivada de supuestos teóricos, donde la vía de verificación del estudio reside en el estudio de la bondad de ajuste del modelo. La varianza explicada es un criterio necesario pero no suficiente, ya que los datos derivados de experimentos conductuales, contienen una cantidad significativa de ruido intrínseco al proceso. (Ward, 2002) La información contenida en los datos tiene una parte determinista y otra estocástica, lo cual resulta en un conflicto al momento de estimar los parámetros si se desconoce la distribución

estocástica de los datos, además de volver poco confiable el criterio de la varianza explicada.

En consecuencia es necesario someter a prueba las premisas empleadas en los modelos así como las consecuencias lógicas del razonamiento empleado. Los modelos teóricos no equivalen a la teoría en sí misma; confrontar las predicciones teóricas con la evidencia empírica permite estudiar las diferencias entre lo que estamos entendiendo con la modelación y la realidad empírica, permitiendo hallar áreas de oportunidad o puntos que no se están considerando en el desarrollo de la teoría.

Pregunta de investigación.

¿Las ecuaciones de aprendizaje motor y movimientos orientados a objetivo describen a la memoria procedimental cuando se está adquiriendo una habilidad motora y cuando ésta ya se ha adquirido⁵?

¿El modelo desarrollado describe apropiadamente el proceso de adquisición de una habilidad motora?

Hipótesis

De manera que puedan resolverse las preguntas propuestas, se plantean los siguientes conjuntos de hipótesis, con base en el desarrollo teórico previo.

Ho: El tiempo de ejecución no se incrementa proporcionalmente a la cantidad de información necesaria para especificar un movimiento.

Hi: El tiempo de ejecución se incrementa proporcionalmente a la cantidad de información necesaria para especificar un movimiento.

Ho: El modelo propuesto no explica la varianza en los datos experimentales.

⁵ Ecuaciones 9 y 16

Hi: El modelo propuesto explica la varianza en los datos experimentales.

Ho: No existen diferencias significativas entre el tiempo promedio de los últimos 3 ensayos y la asíntota teórica predicha

Hi: Existen diferencias significativas entre el tiempo promedio de los últimos 3 ensayos y la asíntota teórica predicha

Método.

Participantes:

La muestra, obtenida por medio de muestreo no aleatorio, se compuso de 12 participantes, de los cuales fueron 6 mujeres y 6 hombres, (media 23.58 años, D.E. 3.67). Todos los participantes fueron diestros, sin antecedentes de enfermedades neurológicas o psiquiátricas.

Materiales:

Para el experimento se usó una computadora Hp w1907, empleando el software Eyelines para la presentación de estímulos y adquisición de datos, el cual además de presentar los estímulos con precisión (este programa permite diseñar y presentar los estímulos con precisión de milímetros), registra el movimiento del mouse y el tiempo de ejecución.

Estímulos:

Se emplearon pares de líneas paralelas negras sobre un fondo gris. La manipulación consistió en la variación de la longitud de las líneas (a) y la distancia entre las líneas dependiendo de la fase experimental (w).

Las combinaciones de amplitud y ancho entre líneas empleados en los experimentos, así como sus índices de dificultad se muestran en la siguiente tabla

Tabla 1 Posibles combinaciones de estímulos empleadas en el experimento.				
	5	10	15	20
0.5	10	20	30	40
1	5	10	15	20
1.5	3.33	6.66	10	13.33
2	2.5	5	7.5	10

En las filas se encuentra el ancho entre las líneas (cm) y en las columnas la amplitud. Las celdas correspondientes indican el cociente entre la amplitud y el ancho de las líneas.

Procedimiento:

Las sesiones experimentales fueron realizadas individualmente, en un espacio cerrado de 2x2, donde el mobiliario fue un escritorio, equipo de cómputo una silla y una división de madera entre el ratón de la computadora y el monitor (esta división impide la vista de la mano, al manipular el ratón de la computadora) y una silla.

Se sentó al participante frente al monitor a una distancia de un metro de distancia entre el monitor y los ojos (se ajustó el asiento de manera que la vista estuviera a la altura del monitor). Se le pidió que tomara el ratón de la computadora y recargara el brazo sobre el escritorio (así, el brazo estaría en reposo). Se verificó que la división de madera impidiera la vista de la mano.

La sesión experimental duró aproximadamente 40 minutos, divididos en 2 fases.

Fase 1

En la fase 1 se buscó contrastar el primer grupo de hipótesis en los cuales se expresa si el tiempo de ejecución es o no proporcional a la cantidad de información necesaria para ejecutar un movimiento, así como estimar los parámetros m y b de cada participante. La tarea consistió en realizar movimientos a través de pares de líneas lo más rápido posible y sin cometer errores, variando entre ensayos la longitud de las líneas (a) y la distancia entre las mismas (w) (ver

tabla 1). En esta fase la retroalimentación dada en la pantalla no fue distorsionada, es decir movimientos hacia la derecha implican movimientos del cursor a la derecha y así con las direcciones restantes.

Se dieron las instrucciones verbalmente, las cuales fueron las siguientes:

“Se te presentarán pares de líneas o barreras en la pantalla. Tu tarea consiste en trazar en la pantalla, presionando el botón izquierdo del mouse y moviendo la mano, una línea a través del par de líneas, lo más rápido posible y sin cometer errores. Un error será tocar alguna de las 2 barreras. Si comienzas el primer ensayo de izquierda a derecha en el segundo tendrás que trazar de derecha a izquierda y así sucesivamente.”

Se pidió al participante que parafraseara las instrucciones y se dio un minuto a cada participante para que se familiarizara con el cursor en la pantalla y el ratón.

Se administraron bloques de 6 ensayos (16 bloques en total), cada bloque con una combinación de amplitud de movimiento y distancia entre líneas. El orden en el que se presentaron los bloques fue aleatorio. La presentación de ensayos fue continua, en cuanto se terminaba un ensayo, se presentaba el ensayo siguiente.

Fase 2

En esta fase se presentó solo una combinación de líneas (a : 15 cm, w : 1 cm). En esta condición, la retroalimentación del monitor fue distorsionada para emular el efecto de ver el movimiento o trazo a través de un espejo (se recuerda que el participante no podía ver su mano directamente en ninguna de las 2 fases). Entonces los movimientos a la izquierda o a la derecha permanecieron intactos, pero cuando el participante movía el ratón hacia arriba, el cursor se movía hacia abajo y viceversa.

La tarea del participante consistió en realizar trazos por en medio de las líneas, lo más rápido que pudieran y sin tocarlas. La presentación de ensayos fue continua, sin intervalos de tiempo entre los ensayos. Asimismo no se presentó un tiempo

límite para terminar un ensayo. En esta fase se tomaron en cuenta 60 ensayos para construir las curvas de aprendizaje

Se dio verbalmente al participante las siguientes instrucciones:

“Se te presentarán pares de líneas o barreras en la pantalla. La tarea será idéntica a la anterior, sin embargo el movimiento del cursor estará distorsionado a manera de un espejo. Tu tarea consiste en realizar los trazos lo más rápido posible y sin cometer errores. En cada ensayo deberás de mejorar tu tiempo con respecto al ensayo anterior.”

En la siguiente sección se detallan los análisis y medidas empleadas para contrastar las hipótesis planteadas.

Resultados

Fase 1

Todos los análisis se efectuaron con datos individuales. El nivel de significancia empleado fue de $p < .05$.

En esta fase se buscó contrastar el primer conjunto de hipótesis. Para ello se realizó un análisis de regresión lineal entre el tiempo promedio de ejecución de un bloque y la cantidad de información de ese bloque (cantidad de información es igual a el cociente entre la amplitud de movimiento a y distancia entre las líneas w). (Véase ecuación 9). Asimismo estimar los parámetros m y b del modelo (véase ecuación 9).

Para estimar la función lineal del tiempo motor como función de la cantidad de información, se calcularon las siguientes medidas:

Tiempo promedio de ejecución:

Cada bloque de ensayos consistió en 6 trazos con una longitud o amplitud de líneas y distancia entre líneas determinado. Entonces para estimar el tiempo

promedio de ejecución de cada bloque, se tomó el promedio de los tiempos de ejecución de los 6 trazos, esto por cada bloque.

Cantidad de información por bloque:

Para estimar la cantidad de información de cada bloque, se dividió la amplitud o longitud de las líneas entre la distancia entre líneas $\left(\frac{a}{w}\right)$. De esta forma se estimó la cantidad de información necesaria para ejecutar un movimiento en cada condición o bloque de ensayos.

Estimación de la función lineal:

Una vez obtenidos el tiempo medio de ejecución y la cantidad de información por bloque de ensayos, se realizaron análisis de regresión entre el tiempo de ejecución como función de la cantidad de información. En la siguiente figura se muestran las gráficas.

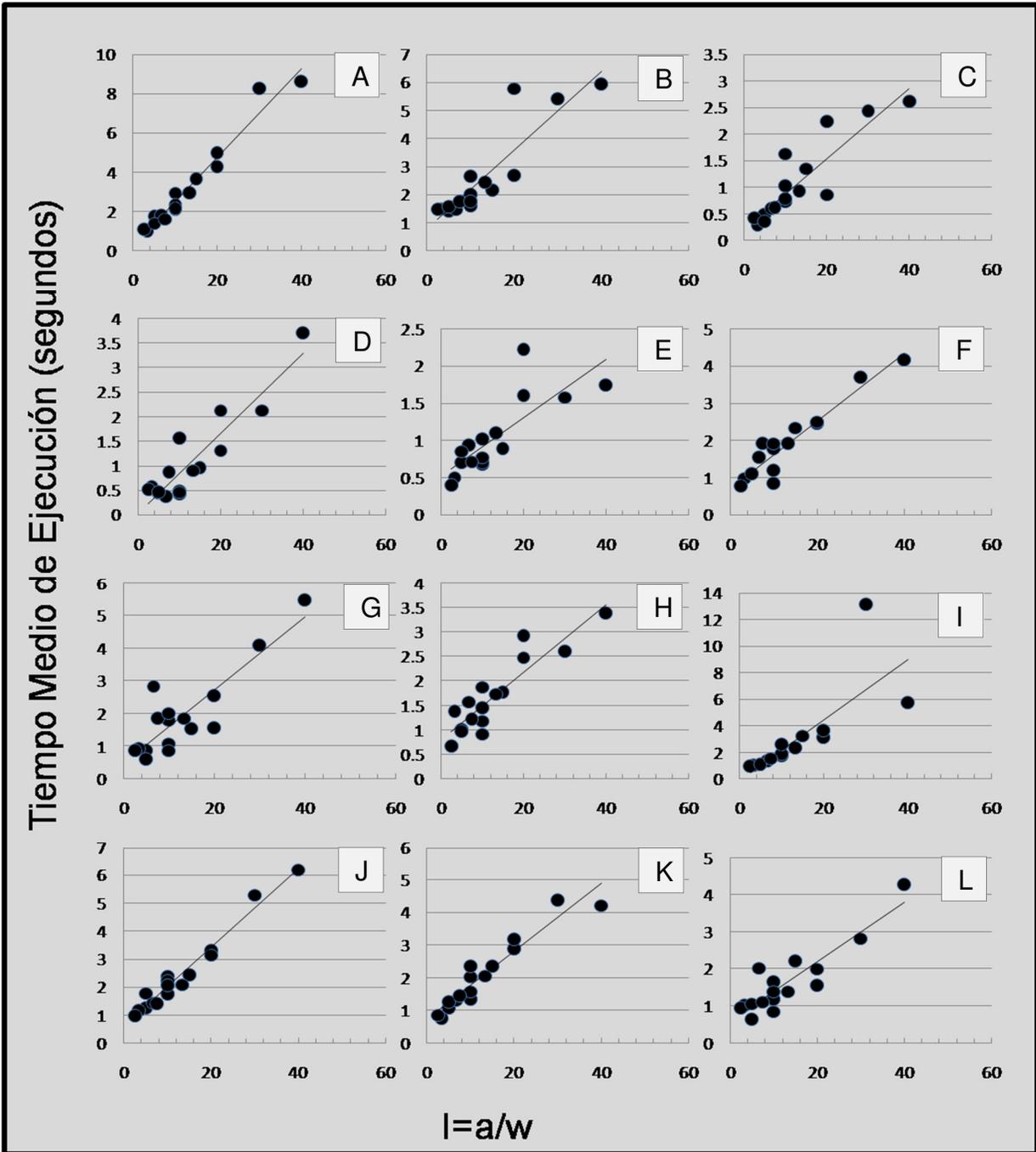


Figura 4

Tiempo medio de ejecución en función de la cantidad de información.

Las gráficas representan los tiempos de ejecución de cada participante en función de la cantidad de información necesaria para ejecutar un movimiento. Esta cantidad de información se estima dividiendo la amplitud del movimiento entre la distancia entre líneas.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros estimados por participante asimismo el porcentaje de varianza explicada de esta regresión lineal.

Tabla 2			
Parámetros estimados y porcentaje de varianza explicada por participante.			
Participante	Pendiente	Ordenada	R² *
A	0.23	0.26	0.96
B	0.14	0.76	0.8
C	0.07	0.23	0.79
D	0.08	0.02	0.84
E	0.04	0.51	0.64
F	0.09	0.7	0.9
G	0.11	0.48	0.76
H	0.07	0.79	0.82
I	0.23	-0.05	0.59
J	0.14	0.61	0.97
K	0.1	0.72	0.91
L	0.08	0.59	0.81

* p<.005

Los datos de participantes con menor cantidad de varianza (participantes E, G, I) explicada en general contienen un punto aberrante ⁶(observación realizada con los residuos). Se realizaron estimaciones omitiendo esta observación, incrementando la varianza explicada, sin embargo el valor numérico de los parámetros generalmente varió poco. El análisis de regresión lineal y las medidas de varianza explicada ofrecen evidencia de que el tiempo de ejecución se incrementa conforme la cantidad de información necesaria para especificar un movimiento se incrementa.

⁶ Dado que no fue el objetivo de las hipótesis planteadas, no se incluyó el análisis en este trabajo

Fase 2

En esta fase se buscó contrastar las últimas 2 hipótesis, estudiando la varianza explicada del modelo y si existen diferencias significativas entre las asíntotas encontradas y las predichas.

En primer lugar es necesario visualizar los resultados de cada participante, generando curvas de aprendizaje que representen el tiempo de ejecución en cada ensayo realizado

Entonces, se tomaron en cuenta el tiempo de ejecución de los primeros 60 ensayos y se construyeron las curvas de aprendizaje de cada participante.

En la siguiente figura se muestra este resultado.

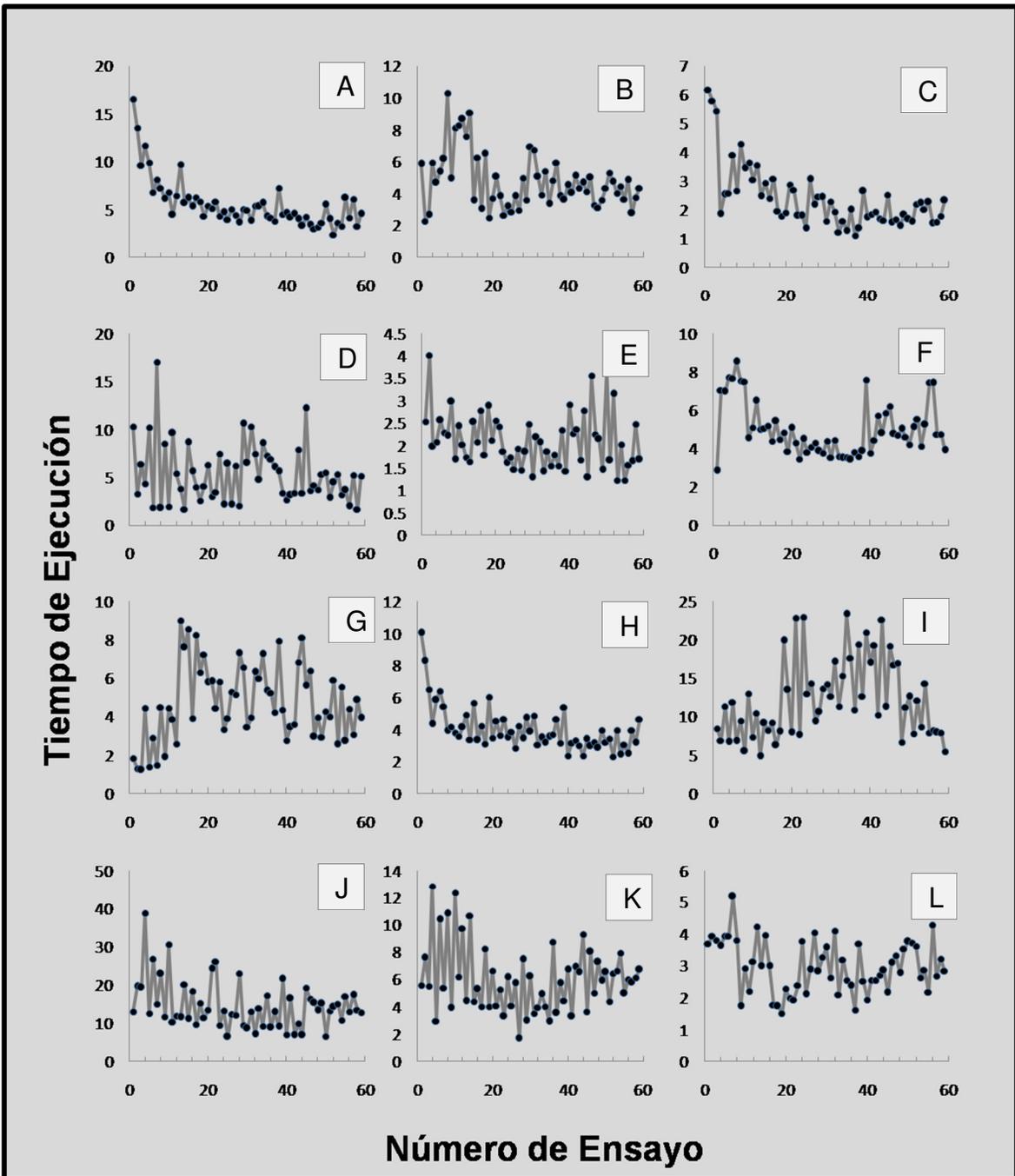


Figura 5

Las gráficas representan el tiempo de ejecución en el ensayo N de cada participante.

Es de notarse que la escala de las ordenadas varía de participante a participante.

En la inspección visual de los datos, los participantes A, C, H muestran una tendencia monótonamente decreciente, es decir disminuyen su tiempo de ejecución conforme ejecutan la tarea. No así con el resto de participantes, los cuales en apariencia mostraron tiempos de ejecución aleatorios.

En los experimentos se les solicitó a los participantes comenzar un primer movimiento de izquierda a derecha, el siguiente movimiento de derecha a izquierda y así sucesivamente.

Para evitar sesgos en el análisis y descartar la posibilidad de que al participante se le facilitara más un movimiento en una orientación que en otra (ejemplo: al participante se le facilita más la ejecución de movimientos de izquierda a derecha), se tomó como una observación la suma de los primeros 2 ensayos, luego los siguientes 2 y así sucesivamente (e.g. observación 1= ensayo 1 + ensayo 2, observación 2= ensayo 3+4 y así sucesivamente) De manera que cada observación es igual al tiempo de ejecución que le tomó realizar el movimiento de ida y vuelta.

Las gráficas correspondientes a esta transformación se muestran a continuación.

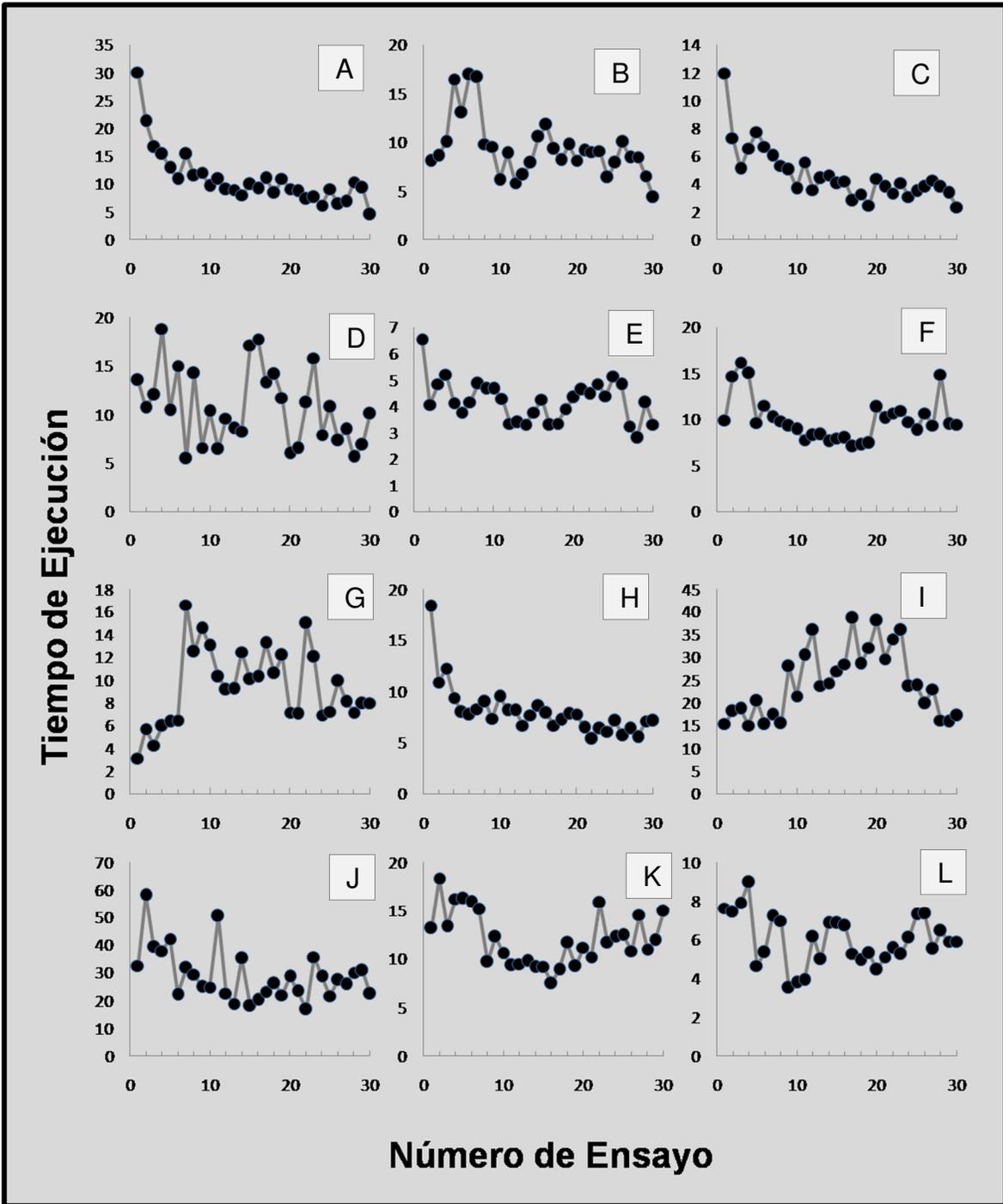


Figura 6

Las gráficas representan el tiempo de ejecución en el ensayo N de cada participante. En estas gráficas la primera observación es igual a la suma del tiempo en el ensayo 1 más el ensayo 2, la segunda observación es igual al ensayo 3 más el 4.

Finalmente, para poder evaluar el modelo sin tener que promediar los datos entre participantes, se empleó el promedio de bloques de ensayos por participante, lo cual no afecta la estimación de parámetros de curvas de aprendizaje (Cousineau, Hélie, & Lefebvre, 2003). Cada bloque constó de 12 ensayos.

Con estos datos se estimaron los parámetros y la bondad de ajuste del modelo por cada participante mediante el paquete de análisis de datos STATISTICA.

En la siguiente figura se muestra el tiempo medio de ejecución en función del bloque de ensayos con la curva del modelo ajustada a los datos.

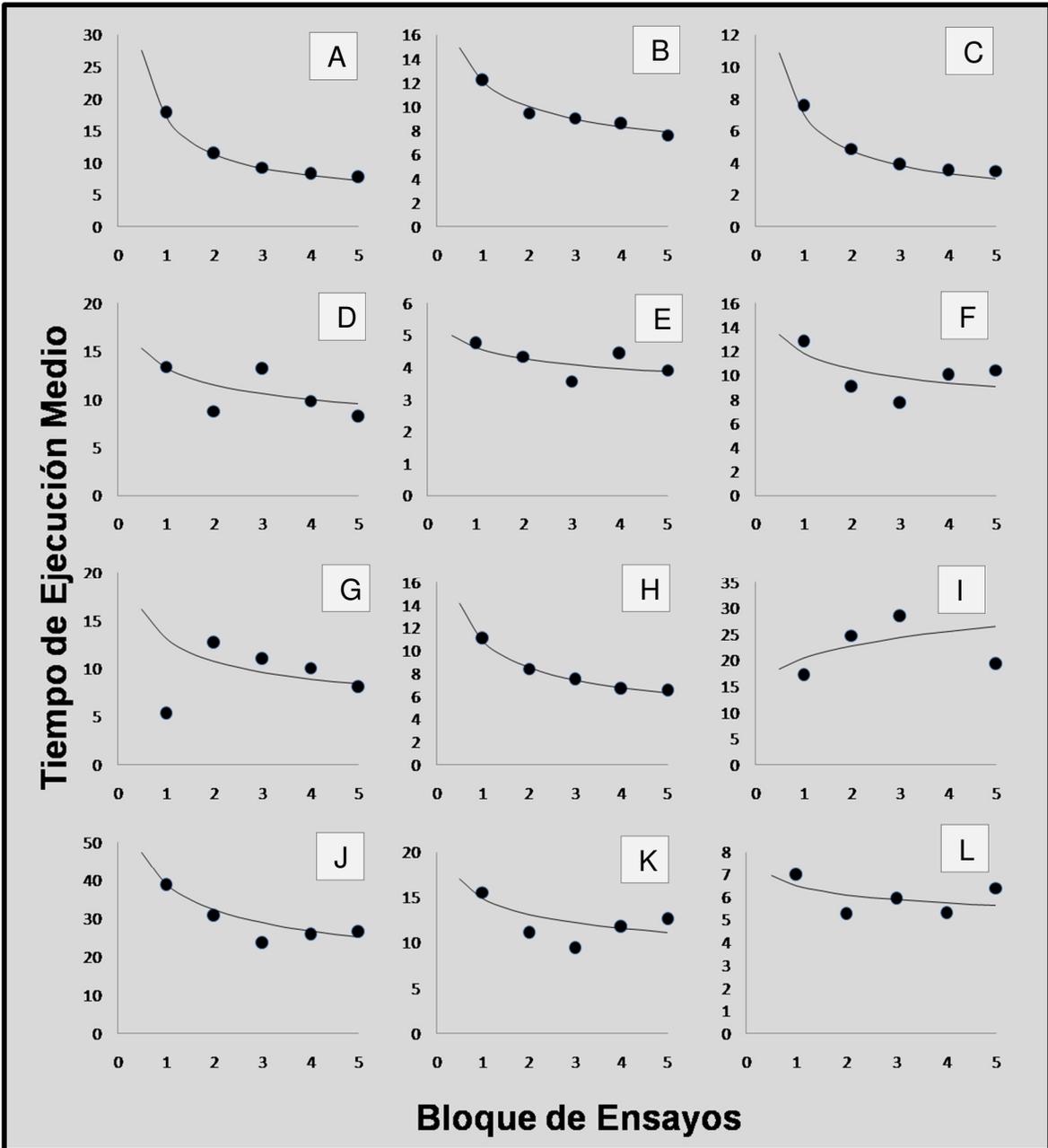


Figura 7

Las gráficas representan el tiempo de ejecución promedio (ordenadas) en cada bloque de ensayos de cada participante (abscisas).

En la siguiente tabla se muestran los valores de los parámetros obtenidos y la varianza explicada por el modelo

Tabla 3 Parámetros estimados en la fase 2 y porcentaje de varianza explicada por participante.			
Participante	Potencia	E	R²
A	-0.82	60	0.99
B	-0.38	65.75	0.96
C	-0.73	88.46	0.98
D	-0.23	146.56	0.35
E	-0.15	88.81	0.41
F	-0.21	107.54	0.3
G	-0.35	97.98	0.19
H	-0.44	130.86	0.99
I	0.19	75.11	0.19
J	-0.3	258.84	0.83
K	-0.22	120.646	0.35
L	-0.127	58.73	0.2

Como puede verse en la tabla, el modelo tuvo un buen ajuste en 5 de 12 casos. Realizando comparaciones entre los diagramas de dispersión y la varianza explicada, los participantes que tuvieron un buen ajuste (participantes A, B, C, H y J) fueron aquellos en cuyas curvas de aprendizaje se apreciaba una tendencia a disminuir el tiempo de ejecución de forma monótonamente decreciente (aunque en el caso del participante J, esto no fue evidente a simple vista, sin embargo entre los distintos ajustes de curva, fue el participante con menor cantidad de varianza explicada).

En general se consideraron para los análisis todos los casos ya que *a priori* no se estableció un criterio de exclusión. Sin embargo los datos que no fueron ajustados por el modelo en general no mostraron una disminución en el tiempo de ejecución. Adicionalmente, hay casos en los que se encontró una disminución en el tiempo en los primeros bloques y en los últimos un aumento en el tiempo. En la discusión se sugieren métodos para evaluar estos datos

Por tanto, hay evidencia para rechazar la hipótesis nula a favor de la alterna si y solo si se consideran los casos donde los participantes reducen su tiempo de ejecución conforme repiten la tarea (5 de 12 casos). Entonces en los casos donde los participantes reducen su tiempo conforme a los ensayos, el modelo predice desde 83% hasta 99.7% de la varianza. Sin embargo es de considerarse este resultado como parcial hasta que se halla profundizado en criterios de exclusión y tratamiento de datos en esta preparación experimental (en la discusión se desarrollará este punto).

Finalmente para poner a prueba el último conjunto de hipótesis, se realizó lo siguiente:

Se emplearon los datos de los participantes en los cuales se notó una disminución en el tiempo de ejecución promedio (41% de la muestra), es decir, para este análisis se emplearon los datos en los cuales la bondad de ajuste fue superior al 80%.

Por cada participante se estimó la asíntota a la que tendería su tiempo de ejecución mediante la función lineal estimada en la primera fase (asíntota teórica predicha). Posteriormente se tomó el promedio de los últimos 3 ensayos de cada participante y se realizó una prueba t para muestras relacionadas. De acuerdo al conjunto de hipótesis propuesto, se espera que no haya diferencias significativas entre ambos conjuntos de medias.

No se encontraron diferencias significativas entre la media de asíntotas teóricas (Media: 2.45, D.E: .94) y la media de asíntotas obtenidas empíricamente (Media: 5.11, D.E:3.92) [$t(4)=1.6$, $p=.18$]

Por lo tanto no se encontró evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula a favor de la alterna, teniendo entonces que las medias empíricas y las predichas por el modelo pertenecen a la misma distribución. Se ahondará más en los resultados obtenidos en la discusión.

Discusión y futuras direcciones.

La elección de la metodología de este trabajo fue motivada por la idea de que la modelación matemática en psicología, lejos de reducirse a la verificación de la varianza explicada por un modelo formal, sugiere razonamientos para verificar teorías, dando oportunidad a la detección de brechas entre lo que entendemos en un modelo, con la realidad y características del fenómeno empírico.

El trabajo experimental resultado de esta metodología guiada por los supuestos teóricos, da información a favor de las hipótesis propuestas, sin embargo la evidencia obtenida no es concluyente.

Contrastando los resultados guiados por la teoría con los obtenidos se ha llegado a las siguientes conclusiones y observaciones realizadas posteriores a la ejecución de los experimentos y análisis de datos para una futura implementación.

Aspectos Motores

Existe numerosa evidencia previa que respalda que el tiempo de ejecución para realizar un movimiento dirigido a un objetivo es proporcional a la cantidad de información necesaria para realizar tal movimiento (Accot & Zhai, 1997; Guiard, 1993; Mottet & Bootsma, 1999). Con base a los resultados obtenidos es necesario mejorar la metodología empleada para estimar los parámetros dependientes de esta relación. Los valores de amplitud y distancia entre líneas se eligieron de manera arbitraria, utilizando un espaciamiento lineal. Sin embargo los coeficientes obtenidos con tales elecciones de longitud de línea y distancia ente líneas (cantidad de información en el ensayo) no tienen un espaciamiento lineal, teniendo como consecuencia pocos valores cuyos coeficientes son grandes y muchos valores de coeficientes pequeños. Una vía de verificar la relación lineal y tener una mejor estimación de los parámetros, es elegir combinaciones de amplitud de movimiento y ancho entre líneas de manera que los coeficientes obtenidos tengan como resultado un espaciamiento lineal, de esta manera se evitará la

concentración de datos alrededor de cierto valor de la variable independiente y se podrá tener una mejor idea de la variabilidad que se puede esperar en las estimaciones. Asimismo es de relevancia el conocimiento de la variabilidad del tiempo de ejecución motor para estimar los valores de la asíntota. De acuerdo a las ecuaciones de curvas de aprendizaje, las asíntotas se alcanzan únicamente cuando el número de ensayos tiende a infinito, sin embargo tras una cantidad elevada de ensayos, los valores obtenidos son muy cercanos a la asíntota. En consideración con lo anterior, un posible criterio de evaluación para las curvas de aprendizaje en relación a la asíntota podría ser la estimación de intervalos de confianza del tiempo de ejecución motor dada una cantidad de información; así para considerar que se ha llegado a la asíntota, el promedio de tiempo de ejecución de un participante deberá estar contenido dentro del intervalo de confianza estimado.

Diseño Experimental: Adquisición de Habilidad Motora

Pese a que se buscó una simplificación de las tareas es de notarse que no todos los participantes redujeron su tiempo de ejecución. Esto se puede explicar por varios factores.

En primer lugar, el número de ensayos parece ser insuficiente. Pese a que se diseñó la tarea de manera que no implicara gran dificultad, no todos los participantes se aproximan a la asíntota. Si bien la última prueba de hipótesis hecha con respecto a las asíntotas la cual ofrece evidencia a favor de que se alcanzara la asíntota en ese conjunto de datos, es de recordar que la probabilidad obtenida fue de .18. Este valor indica la probabilidad de que ambos conjuntos de datos pertenezcan a la misma distribución. Por tanto es deseable para experimentos posteriores elevar el número de casos y el número de ensayos, ya que las varianzas obtenidas no son homogéneas entre condiciones experimentales (la varianza del grupo de promedios de los últimos ensayos fue mayor que la del grupo de tiempos de ejecución predichos); aunque este sesgo es

menor en muestras pareadas, es deseable incrementar la muestra para evitar error tipo II. Con respecto al número de ensayos sería deseable que se llevaran a cabo varios días de práctica y no solo una sesión de experimentos: lo anterior para evitar efectos de fatiga. En los resultados mostrados se tuvieron casos donde aparentemente el tiempo de ejecución disminuyó y sin embargo cerca de los últimos ensayos se incrementó.

En este diseño experimental se buscó realizar la mayor cantidad de ensayos posibles, razón por la cual el orden de las sesiones fue invariable. Dado que los factores motores se mantienen relativamente estables, se sugiere realizar las sesiones experimentales primero y en una sesión independiente, estimar los factores motores.

Un factor que pudo actuar en la ejecución de los participantes es el conocimiento de resultados (Mazur, 2006). En la fase de adquisición, la consigna de los participantes fue reducir el tiempo de ejecución con cada ensayo que ejecutaban, sin embargo los participantes no tienen una manera precisa de conocer cuánto tiempo les tomó realizar un ensayo. El tipo de retroalimentación que el participante obtuvo es resultado de una estimación subjetiva, es decir se basa en el tiempo que el participante cree que tardó. En este sentido es deseable corregir y mejorar el procedimiento, en posteriores manipulaciones experimentales se sugiere que el programa muestre al final de cada ensayo el tiempo de ejecución.

Finalmente queda por evaluar los datos de los participantes que no redujeron su tiempo de ejecución. Estos datos no fueron excluidos del todo de los análisis ya que no se estableció previamente un criterio. Sin embargo, algo que puede realizarse posteriormente es emplear análisis de series de tiempo para descartar si el tiempo de los participantes se está comportando de manera aleatoria o el ruido implícito en los datos distorsiona su forma determinística (Ward, 2002; Newell, Liu, & Mayer-Kress, 2001). Con los datos obtenidos esto resulta complicado ya que para realizar análisis de este tipo es necesario contar con más observaciones de las obtenidas.

Conclusiones.

En este trabajo se pretendió abordar el proceso de adquisición de una conducta motora que involucra a la memoria de procedimiento. Para ello se emplearon principios matemáticos desarrollados en torno a movimientos orientados a un objetivo y modelos que describen las curvas de aprendizaje. Mediante estos principios se realizó un intento de ampliar los conocimientos que se tienen con respecto a la fase de adquisición en la memoria de procedimiento.

Mediante la argumentación propuesta, surgieron hipótesis que fueron contrastadas para poder tener evidencia a favor de los principios empleados y las relaciones propuestas derivadas del contexto teórico. Las pruebas de hipótesis y los experimentos realizados fueron planteados de manera que se procurara que los ajustes de curva y las estimaciones estadísticas fueran siempre guiadas por un referente teórico (Newell, Mayer-Kress, & Yeou-Teh, 2006). Los resultados obtenidos sugieren cierta consistencia en las relaciones establecidas (ecuación 16), asimismo se hizo evidente que hay una brecha entre la comprensión de un modelo y la realidad empírica. Es de resaltar la importancia de este último punto ya que es necesario ser exhaustivos con las posibilidades que ofrece esta brecha, de manera que puedan agotarse explicaciones alternativas, además de explorar aspectos que no han sido abordados y que sin embargo surgen de este resultado; por ejemplo ¿Cuántos ensayos faltan para alcanzar el criterio de la asíntota? ¿Cuántos ensayos son necesarios para tener una buena estimación de los parámetros? ¿Cómo evaluar la adquisición de una habilidad motora si la curva subyacente depende de más de un parámetro?

La investigación de las propiedades de la fase de adquisición en la memoria procedimental puede solucionar estas preguntas. Aunque puede darse una respuesta parcial con el marco teórico propuesto es deseable acompañar el desarrollo analítico con la corroboración empírica. Esto último no debe dejarse de lado ya que las funciones propuestas son herramientas para conocer un proceso más complejo, más no el fenómeno por sí mismo.

Gran parte de este trabajo se basa en la idea del límite de las curvas de aprendizaje. El conocimiento del punto de equilibrio al cual tenderá la conducta tiene tanto consecuencias teóricas como de evaluación práctica. Por poner un ejemplo la existencia del límite asintótico implica que puede evaluarse el grado de adquisición de una conducta, independientemente de los factores motores asociados a los requisitos de una tarea conductual específica. Como fue discutido por Gallistel, Fairhurst y Balsam (2004), la estimación de las asíntotas es una tarea con ciertas restricciones debido a las características propias de la conducta bajo estudio; por mencionar un caso, el error o ruido asociado no a las observaciones sino a la ejecución *per se*, lo cual plantea dificultades en el sentido de que la variación observada en distintos experimentos conductuales no se comporta de forma aleatoria, sino que contiene una estructura caótica característica de sistemas con cierto grado de complejidad (Ward, 2002; Gilden, Thornton, & Mallon, 1995).

En conclusión, se tiene evidencia a favor de las relaciones propuestas, además de una serie de razonamientos que sugieren un nuevo conjunto de experimentos en pos de profundizar en los mecanismos que guían la memoria de procedimiento y confirmar la consistencia de los corolarios resultantes de las hipótesis planteadas.

Anexo

En este apartado se resumen los experimentos realizados por Accot y Zhai (1997) para validar el índice de dificultad o cantidad de información al realizar una tarea en donde se tiene que realizar un trazo a través de un túnel.

Los participantes del experimento se les presentaban estímulos en un monitor y el participante tenía que responder mediante un estilete y una tablet.

Experimento 1: atravesando objetivos

Se le presentaban 2 líneas verticales separadas por una amplitud de movimiento a , las líneas podían tener una longitud w (ver figura 1A)

En cada ensayo se le presentaba una amplitud de movimiento (distancia entre objetivos) y una longitud de línea. Los valores que podían tener de amplitud a podía ser de 256, 512 y 1026 pixeles. Y la longitud w de las líneas podía ser de 8, 16 o 32 pixeles (por lo tanto se podían tener 9 combinaciones diferentes).

La consigna del participante era realizar un trazo atravesando ambos objetivos (comenzando con el objetivo posicionado a la izquierda). Una vez que el participante atravesaba los 2 objetivos, tenía que repetir el trazo ahora en sentido contrario. Esta tarea la repitió 10 veces por ensayo.

Como variable dependiente se empleó el promedio de tiempo de ejecución de las 10 repeticiones (el tiempo de ejecución equivale al tiempo que tomó atravesar ambos objetivos).

De acuerdo a la teoría, se debería obtener una función lineal entre la cantidad de información en el ensayo, medida por la cantidad de información propuesta por Fitts y el tiempo promedio de ejecución.

En este artículo los autores utilizan una forma ligeramente diferente de la función de Fitts la cual es

$$I = \log_2 \left(\frac{a}{w} + 1 \right)$$

En la figura 2 se muestran los resultados de este experimento.

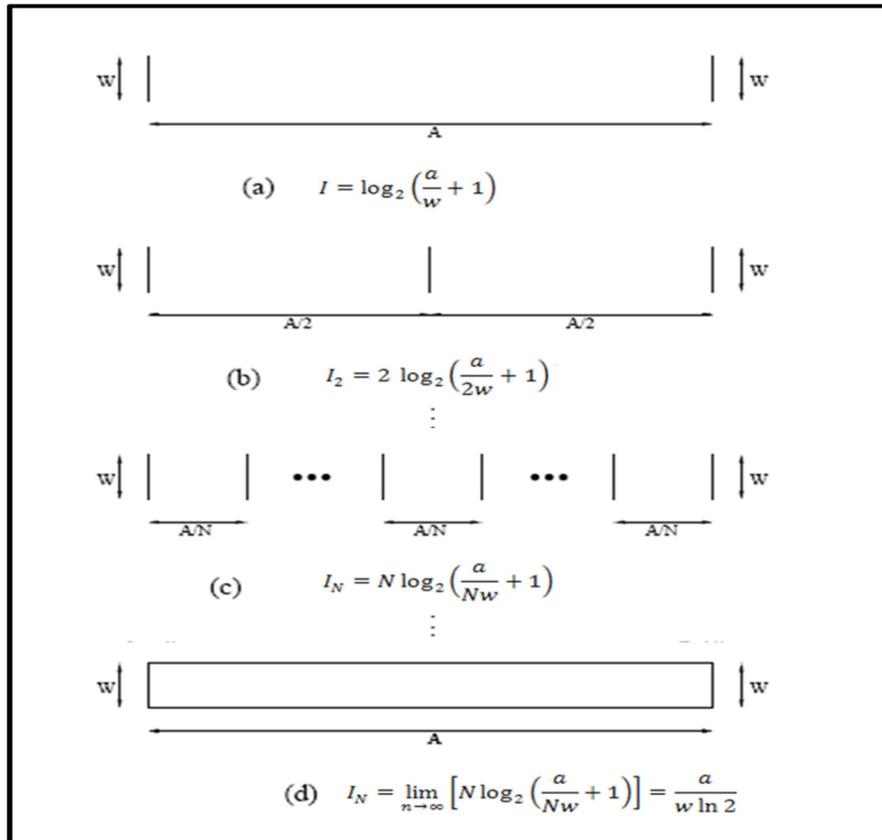


Figura 1

En esta figura se muestran ilustraciones de los experimentos realizados (A, D) asimismo el razonamiento seguido para derivar la cantidad de información dada una longitud de línea y ancho entre líneas.

Adaptado de: Accot y Zhai (1997)

Desarrollo Teórico

Dado que la función de Fitts explica el tiempo de ejecución en la preparación anterior, se realizó el siguiente razonamiento para derivar la cantidad de información dada una amplitud a y ancho de líneas w

Supongamos que incrementamos el número de objetivos a atravesar de 2 a 3 como se muestra en la figura 1b

Entonces la cantidad de información sería

$$I_2 = 2 \log_2 \left(\frac{a}{2w} + 1 \right)$$

Si aumentamos el número de objetivos a atravesar, de 3 a N objetivos (ver figura #c), la cantidad de información sería la siguiente

$$I_N = N \log_2 \left(\frac{a}{Nw} + 1 \right)$$

¿Qué pasaría si tomáramos una cantidad infinita de objetivos?

El resultado sería equivalente a atravesar una cantidad infinita de objetivos y por lo tanto atravesar un túnel (ver figura 1d) es decir

$$I_N = \lim_{n \rightarrow \infty} \left[N \log_2 \left(\frac{a}{Nw} + 1 \right) \right] = \frac{a}{w \ln 2}$$

Con fines de simplificación se obtiene que la cantidad de información necesaria para atravesar un túnel es:

$$I = \frac{a}{w}$$

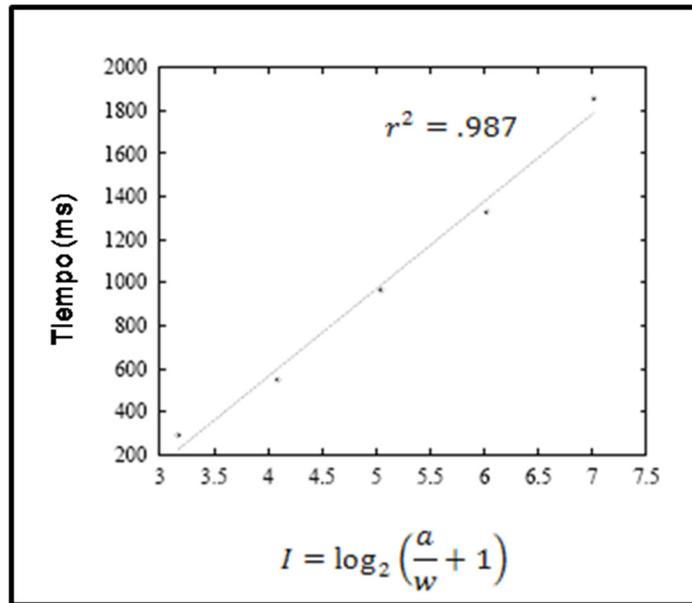


Figura 2

Resultados del primer experimento
 En la imagen se muestra la varianza explicada por la relación lineal.
 Adaptado de: Accot y Zhai (1997)

Experimento 2

Para poner a prueba esta hipótesis, se realizaron experimentos donde los participantes tenían que realizar movimientos a través de un rectángulo como el de la figura 1d, variando la amplitud del recorrido ($a=250, 500, 750, 1000$ pixeles) y el ancho entre líneas ($w=20, 30, 40, 50, 60$ pixeles). El procedimiento fue similar al experimento 1.

Los resultados se muestran en la figura 3

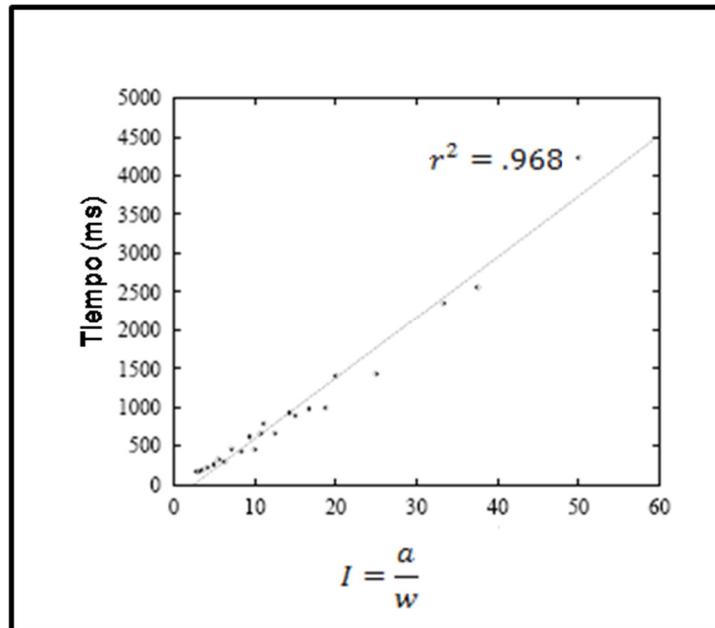


Figura 3

Resultados del experimento 2

En la gráfica se muestra la varianza explicada por la función lineal.

Adaptado de: Accot y Zhai (1997)

Con lo anterior se hace valido que la cantidad de información necesaria para realizar un movimiento a través de un túnel es directamente proporcional a la distancia a recorrer e inversamente proporcional al ancho entre líneas.

Bibliografía

- Accot, J., & Zhai, S. (1997). Beyond Fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks. *Proceedings of ACM CHI'97 Conference on Human Factors in Computing Systems* , 295-302.
- Blanco, M. (1996). *Psicofísica*. Universitas.
- Bootsma, R. J., & Mottet, D. (2004). Dynamic Invariance in Goal-Directed Aiming. *Perception* , 16(1), 55-60.
- Coombs, C. H., Dawes, R. M., & Tversky, A. (1981). Introducción a la psicología matemática. 385-437.
- Cousineau, D., Hélie, S., & Lefebvre, C. (2003). Testing curvatures of learning functions on individual trial and block average data. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* , 35 (4), 493-503.
- Fitts, P. (1992). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology: General* , 121(3), 262-269.
- Gallistel, C. R., Fairhurst, S., & Balsam, P. (2004). The Learning Curve: Implications of a Quantitative Analysis. *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 101 (36), 12124-13131.
- Gilden, G. L., Thornton, T., & Mallon, M. W. (1995). 1/f Noise in Human Cognition. *Science* , 267 (5205), 1837-1839.
- Guiard, Y. (1993). On Fitts' and Hooke's laws: Simple harmonic movement in upper-limb cyclical aiming. *Acta Psychologica* , 82, 139-159.
- Heathcote, A., Brown, S., & Mewhort, D. (2000). The Power Law Repealed: The case for an Exponential Law of Practice. *Psychonomic Bulletin and Review* , 185-207.

- Mazur, J. E. (2006). *Learning and behavior*. Upper Saddle River, Nueva Jersey, U.S.a: Pearson Prentice Hall.
- Milner, B., Corkin, S., & Teuber, H. L. (1968). Further analysis of the hippocampal amnesic syndrome: 14 year follow-up study of H.M. *Neuropsychologia* , 6, 215–234.
- Mottet, D., & Bootsma, R. (1999). The dynamics of goal-directed rhythmical aiming. *Biological Cybernetics* , 80, 235-245.
- Newell, A., & Rosenbloom, P. (1981). Mechanisms of skill acquisition and the law of practice. En J. R. Anderson (Ed.), *Cognitive skills and their acquisition* (págs. 1-56). New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Newell, K. M., Liu, Y.-T., & Mayer-Kress, G. (2001). Time Scales in Motor Learning and Development. *Psychological Review* , 108 (1), 57-82.
- Newell, K. M., Mayer-Kress, G., & Yeou-Teh, L. (2006). Human Learning: Power Laws or Multiple Characteristic Time Scales? *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology* , 2(2), 66-76.
- Pierce, J. R. (1980). *An Introduction to information theory: Symbols, Signals and Noise*. U.S.A.: Courier Dover Publications.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell system technical journal* , 27, 623-656.
- Snoddy, G. S. (1926). Learning and stability. *Journal of applied psychology* , 10, 1-36.
- Squire, L. R. (2004). Memory systems of the brain: a brief history and current perspective. *Neurobiology of learning and memory* , 82(3), 171-177.
- Ward, L. (2002). *Dynamical Cognitive Science*. Massachusetts Institute of Technology, USA: MIT Press.