



UNIVERSIDAD DE JAÉN
FACULTAD DE HUMANIDADES Y
CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE PSICOLOGÍA

TESIS DOCTORAL

**LA ACTUALIZACIÓN DE INFORMACIÓN
NUMÉRICA EN LA MEMORIA DE TRABAJO.
CAMBIOS ASOCIADOS A LA EDAD
DURANTE LA NIÑEZ Y LA ADOLESCENCIA**

**PRESENTADA POR:
CRISTINA LENDÍNEZ RODRÍGUEZ**

**DIRIGIDA POR:
DR. D. SANTIAGO PELEGRINA LÓPEZ
DRA. DÑA. M^a TERESA LECHUGA GARCÍA**

JAÉN, 19 DE JUNIO DE 2015

ISBN 978-84-8439-936-0

RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	9
1. LA ACTUALIZACIÓN EN LOS MODELOS TEÓRICOS DE MEMORIA DE TRABAJO.....	11
1.1. La actualización en el modelo de Alan Baddeley	11
1.2. La actualización en los modelos de Nelson Cowan y Klaus Oberauer	14
2. LOS DISTINTOS COMPONENTES DEL PROCESO DE ACTUALIZACIÓN	21
2.1. La sustitución de la información	23
2.2. El acceso a la información (cambio de objeto)	25
2.3. La transformación de la información	31
2.4. La inhibición	33
3. DIFERENCIAS INDIVIDUALES Y EVOLUTIVAS ASOCIADAS A LA ACTUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN EN LA MEMORIA DE TRABAJO	37
3.1. Diferencias individuales	37
3.2. Cambios evolutivos	40
4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	46
SECCIÓN EXPERIMENTAL.....	51
5. Estudio 1: The distance effect in numerical memory-updating tasks.....	53
5.1. Abstract	54
5.2. Introduction.....	55
5.3. First experiment	59
5.4. Second experiment	65
5.5. General Discussion	69
5.6. References.....	73
6. Estudio 2: The role of similarity in updating numerical information in working memory: decomposing the numerical distance effect.....	79
6.1. Abstract	80
6.2. Introduction.....	81
6.3. Experiment 1	85
6.4. Experiment 2	90
6.5. Experiment 3	95
6.6. General discussion.....	100
6.7. References.....	104

7. Estudio 3: Age differences in working memory updating. The role of interference, focus switching and substituting information	109
7.1. Abstract	110
7.2. Introduction.....	111
7.3. The present study.....	115
7.4. Discussion.....	124
7.5. References.....	128
8. DISCUSIÓN.....	136
8.1. Principales resultados	136
8.2. Implicaciones teóricas	141
8.3. Conclusiones y perspectivas futuras	146
9. REFERENCIAS.....	150

RESUMEN

El proceso de actualización en la memoria operativa consiste en la modificación del contenido de la memoria para acomodarlo a una nueva información. El elemento más definitorio de la actualización implica la sustitución de una información por otra. Este trabajo parte de la idea de que la sustitución se realizaría de forma selectiva o parcial; es decir, no se actualizaría el elemento en su totalidad sino solo algunas de las partes que constituyen la representación mantenida en la memoria de trabajo. Cuando la información que se mantiene en memoria y la nueva se solapan representacionalmente debido, por ejemplo, a su similitud, solo habría que sustituir una parte de la representación, con lo que el proceso de actualización se realizaría más rápidamente.

En un primer estudio se pretendía determinar si el solapamiento representacional propiciado por la similitud entre la información implicada en la sustitución afectaba a la actualización. La similitud se operacionalizó a través de la distancia entre los números. En los experimentos realizados se observó que, cuando la distancia entre el número almacenado en la memoria y el que viene a sustituirlo era pequeña, el tiempo en el que se llevaba a cabo la actualización era menor que cuando la distancia entre ambos números era mayor. Este resultado podría interpretarse desde los modelos que exponen que la información se representa en la memoria a través de características (Nairne, 1990; Neath, 2000). Así, a medida que dos ítems almacenados en la memoria son más similares compartirían un mayor número de características y, por tanto, con la aparición del nuevo ítem sería necesario activar menos características ya que muchas estarían preactivadas.

El segundo estudio estaba dirigido a analizar la influencia de distintos aspectos de la similitud numérica. Concretamente, se planteó que dos dimensiones de similitud podrían estar contribuyendo al efecto de facilitación en la actualización. Por una parte, la distancia numérica y, por otra, los dígitos compartidos entre los números implicados en la sustitución. Para comprobar esto, se llevaron a cabo tres experimentos en los que se manipuló la proximidad entre los números empleando distintos rangos de distancia y además la coincidencia en los dígitos (en la decena o en la unidad) de ambos números. Los resultados revelaron que ambas dimensiones influyen en la actualización de forma independiente.

El objetivo del tercer estudio consistía en examinar posibles cambios evolutivos en el componente de sustitución y en el acceso a la información en diferentes grupos de edad: niños de 8 y 11 años, adolescentes de 14, y adultos. Además se analizaron posibles diferencias en la interferencia producida por el hecho que los números almacenados en la memoria compartiesen la decena. Los resultados revelaron diferencias entre los grupos en el tiempo que se tarda en acceder a la información almacenada en la memoria de trabajo. Así, los niños

eran más lentos en acceder a la información que los adolescentes y los adultos. Sin embargo, la sustitución de la información y la interferencia no se veían afectados por la edad.

En definitiva, en esta Tesis Doctoral se comprobó que el solapamiento representacional entre la información implicada en la actualización influye en el proceso de actualización. Este resultado se generalizó a distintas dimensiones de similitud numérica: la distancia numérica y los dígitos compartidos. Finalmente, el estudio evolutivo reveló diferencias asociadas a la edad en el acceso a la información en la memoria de trabajo. Puesto que muchas tareas cotidianas requieren el acceso simultáneo a distintos elementos mantenidos en la memoria de trabajo, las diferencias encontradas en este componente podrían explicar, al menos en parte, los cambios asociados a la edad en la actualización.

INTRODUCCIÓN

La memoria de trabajo ha sido concebida como un sistema de memoria con capacidad limitada, que sirve para el mantenimiento temporal y la manipulación de la información (Baddeley, 1986; Baddeley y Hitch, 1974). Este sistema juega un papel crucial en la cognición de alto nivel, en la que se incluye el razonamiento (Kyllonen y Christal, 1990), la comprensión lectora (Daneman y Carpenter, 1980; Just y Carpenter, 1992), el cálculo aritmético (Hitch, 1978) y la resolución de problemas (Engle, Tuholski, Laughlin, y Conway, 1999).

La memoria de trabajo ha demostrado tener un papel clave a la hora de explicar las diferencias evolutivas e individuales en el rendimiento en tareas cognitivas complejas (Cowan, 1995; Miyake y Shah, 1999). Existen abundantes estudios que evidencian que la memoria de trabajo experimenta cambios a lo largo de la niñez (p.ej., Bayliss, Jarrold, Baddeley, Gunn, y Leigh, 2005; Case, Kurland, y Goldberg, 1982; Gathercole, Pickering, Ambridge, y Wearing, 2004) y durante la vejez (p.ej., De Beni y Palladino, 2004; Oberauer, Wendland, y Kliegl, 2003). Por su parte, diferentes estudios han demostrado la relevancia de la memoria de trabajo a la hora de explicar diferencias individuales en diversas actividades cognitivas complejas, por ejemplo en el rendimiento escolar (p.e., Cain, 2006; Dehn, 2008; Raghubar, Barnes, y Hecht, 2010).

Dado que la memoria de trabajo tiene una capacidad limitada es necesaria la actualización continua de su contenido, de manera que se mantenga activa solo la información relevante para la actividad que estemos realizando (Morris y Jones, 1990). La actualización se considera una función ejecutiva fundamental en la arquitectura cognitiva (Miyake, Friedman, Emerson, Witzki, y Howeter, 2000) con una clara implicación en numerosas tareas cognitivas complejas, siendo la única función ejecutiva que predice consistentemente la inteligencia (Belacchi, Carretti, y Cornoldi, 2010; Chen y Li, 2007; Friedman, Miyake, Corley, Young, DeFries, y Hewitt, 2006).

La Tesis Doctoral que se presenta aquí tenía como objetivo precisamente el análisis de ciertas características del funcionamiento de este proceso ejecutivo. Además, dada la importancia de la actualización en la explicación del rendimiento escolar, y la posible existencia de cambios evolutivos en el funcionamiento de este proceso, también se abordó en esta Tesis su evolución a lo largo de la niñez, por sus evidentes implicaciones prácticas a nivel educativo.

A continuación se describirán brevemente los principales modelos teóricos que se han propuesto para explicar el funcionamiento de la memoria de trabajo, contextualizando en cada uno de ellos el proceso de actualización. En capítulos posteriores se irán analizando distintos

componentes que están implicados en el proceso de actualización en la memoria de trabajo, haciendo especial referencia a las diferencias evolutivas encontradas en estos componentes así como sus implicaciones en el desarrollo del proceso de actualización. En un último capítulo se presentará los objetivos principales de la presente investigación.

1. LA ACTUALIZACIÓN EN LOS MODELOS TEÓRICOS DE MEMORIA DE TRABAJO

1.1. LA ACTUALIZACIÓN EN EL MODELO DE ALAN BADDELEY

Desde que se acuñó el término “memoria de trabajo”, distintos modelos teóricos han intentado explicar sus propiedades y características. El primero de ellos y el más influyente fue el modelo de Baddeley (1986, 1996). Entre las características del modelo de Baddeley destacan la propuesta de la existencia separada de un almacén de memoria a corto plazo (MCP) y otro de memoria a largo plazo (MLP), la distinción entre procesos de almacenamiento y ejecutivos, y la descomposición de la memoria de trabajo en distintos componentes.

Según este modelo, el papel principal de la memoria de trabajo es la recuperación del conocimiento almacenado en la memoria a largo plazo que es relevante para la tarea y su manipulación, permitiendo la interpretación de nuevos estímulos, el descubrimiento de nueva información o la solución de problemas (Baddeley y Logie, 1999). La memoria de trabajo también juega un papel primordial en la codificación de información en la memoria a largo plazo del resultado de sus operaciones.

De acuerdo con el modelo propuesto por Baddeley, la memoria de trabajo comprende múltiples componentes especializados en la cognición que permiten a las personas comprender y representar mentalmente su ambiente inmediato, retener información sobre su experiencia pasada inmediata, apoyar la adquisición de nuevo conocimiento, resolver problemas, y formular, relacionar y dirigir nuevas metas. Así, para explicar el funcionamiento de la memoria de trabajo, Baddeley y Hitch (1974, 1994) propusieron un modelo multicomponente formado por el lazo articulatorio y la agenda visoespacial, encargados del mantenimiento y el almacenamiento temporal de información verbal y visoespacial respectivamente, y por el ejecutivo central, considerado un controlador atencional.

El lazo articulatorio ha sido el componente del modelo que más se ha estudiado. Según el modelo de Baddeley y Hitch (1974), sería el responsable del almacenamiento y el mantenimiento de la información en una forma fonológica. Este a su vez se subdivide en dos

componentes, el almacén fonológico que mantiene los trazos en un código fonológico los cuales decaen en pocos segundos, y el repaso articulatorio cuya función es recuperar y articular de nuevo los contenidos mantenidos en el almacén fonológico y de este modo reactivarlos. El repaso articulatorio se encargaría también de recodificar en forma fonológica, por medio del repaso subvocal, la información de otras modalidades para que entre en el almacén fonológico. Debido a la eficiencia del almacén fonológico en el recuerdo serial, los adultos normalmente optan por nombrar y repasar subvocalmente los ítems presentados visualmente, transfiriendo así la información de un código visual a un código auditivo. Otra de las funciones que se le han atribuido al lazo articulatorio, y que estaría relacionada con la interacción entre el lazo articulatorio y la memoria a largo plazo, sería la de facilitar la adquisición del lenguaje manteniendo la representación de una nueva palabra y optimizando así el aprendizaje (Baddeley, Gathercole, y Papagno, 1998).

Otro componente de la memoria de trabajo en este modelo es la agenda visoespacial. Se asume que este componente es capaz de mantener y manipular temporalmente información visual y espacial, un proceso crucial para la orientación espacial y la solución de problemas visoespaciales. Además, este componente constituye una interconexión entre la información visual y espacial a la que se accede a través de los sentidos o de la memoria a largo plazo. La agenda visoespacial se ha fraccionado, de la misma manera que el lazo articulatorio en un almacén visual pasivo (visual cache) y en un sistema de repaso activo denominado "*inner scribe*" (Logie, 1995), aunque las evidencias de la existencia de estos dos subcomponentes en la agenda visoespacial son menores que en el caso del lazo articulatorio.

Posteriormente, Baddeley añadió un cuarto componente a su modelo, el retén episódico (Baddeley, 2000). Este componente surgió a partir de la necesidad de conectar la información de la memoria de trabajo y la memoria a largo plazo, y para especificar el modo en que los sistemas fonológico y visoespacial podían interactuar. Se considera un sistema de capacidad limitada que sirve para almacenar temporalmente la información en un código multimodal y que es capaz de integrar la información de ambos subsistemas (lazo articulatorio y agenda visoespacial) y de la memoria a largo plazo en una representación episódica unitaria.

Baddeley (1996) consideró al ejecutivo central como el principal componente del modelo de memoria de trabajo. Este sistema posee una capacidad limitada y una de las funciones fundamentales que se le atribuyeron es la de control de los procesos atencionales. Para explicar las características atencionales del ejecutivo central Baddeley adoptó el modelo atencional de Norman y Shallice (1986) considerando que las funciones del ejecutivo central se relacionaban con las de uno de los componentes de este modelo, el subsistema atencional

supervisor (SAS). Este último se encargaría de planificar soluciones basadas en la combinación activa de los estímulos existentes con la información almacenada en la memoria a largo plazo, y de controlar que la planificación se lleva a cabo. Entre las funciones atencionales que se le han asignado destacan la focalización de la atención, el cambio atencional y la atención dividida (Baddeley, 1996). Además, el ejecutivo central se encargaría de coordinar los otros dos sistemas (lazo articulatorio y agenda visoespacial), de cambiar entre tareas y estrategias de recuerdo (Baddeley, 1996), de coordinar varias tareas (p.e., Baddeley, Della Sala, Papagno, y Spinnler, 1997) y de activar temporalmente la información de la memoria a largo plazo (Baddeley, 1998). También se le ha atribuido la capacidad para atender e inhibir de manera selectiva (Baddeley, Emslie, Kolodny, y Duncan, 1998) y para controlar las estrategias de codificación y repaso.

La investigación de Morris y Jones (1990) fue una de las primeras en demostrar que el ejecutivo central se encarga de coordinar el proceso de actualización. Estos investigadores examinaron la implicación del ejecutivo central, propuesto en el modelo de Baddeley, en el proceso de actualización. Para ello, utilizaron una tarea similar a la de Yntema y Mueser (1962) en la que los participantes debían recordar los 4 o los 6 últimos números presentados de una lista de longitud desconocida. Debido al desconocimiento sobre la longitud de la lista, los participantes, ante cada nuevo ítem, debían actualizar los elementos a recordar. En este estudio se manipuló, por un lado, la longitud de las listas que determinaba el número de actualizaciones a realizar y, por otro, las características de la tarea que realizarían los participantes. En una de las condiciones los participantes escuchaban un discurso irrelevante; en la segunda, tenían que pronunciar la sílaba “the” dos veces por segundo a lo largo del ensayo y también durante el recuerdo (supresión articulatoria); y en una tercera condición de control, no escuchaban ni tenían que decir nada. Es preciso indicar que es bien sabido que las dos primeras condiciones interfieren con el lazo articulatorio. Los autores esperaban que el número de actualizaciones (operacionalizado a través de la longitud de la lista) requiriese el concurso del ejecutivo central.

La investigación de Morris y Jones (1990) demostró que el número de actualizaciones requeridas afectaba a la ejecución de manera independiente a como lo hacían condiciones como el discurso irrelevante y la supresión articulatoria, que se sabe que afectan al lazo articulatorio. Por su parte, el discurso irrelevante y la supresión articulatoria perjudicaban el recuerdo serial pero no afectaban al proceso de actualización. Estos resultados se interpretaron como una prueba de que la actualización del contenido de la memoria no es llevada a cabo por el lazo articulatorio, que se encargaría meramente del mantenimiento de la

información. Estos autores concluyeron que el ejecutivo central se encargaría de coordinar el proceso de actualización. Aunque el estudio de Morris y Jones (1990) ha recibido algunas críticas en cuanto a si la tarea requiere o no actualización (p.ej., Ruiz, Elosua, y Lechuga, 2005), la tarea propuesta por estos autores continúa siendo utilizada en numerosos estudios como medida estándar del proceso de actualización.

Estudios posteriores han evaluado el papel de la actualización frente a otras funciones ejecutivas y su papel específico en la cognición. Miyake et al. (2000) examinaron el papel de tres funciones ejecutivas en la cognición: la actualización, el cambio y la inhibición. El cambio implica mover la atención entre distintas tareas u operaciones, mientras que la inhibición hace referencia a la habilidad para suprimir respuestas automáticas, dominantes o salientes. Estos autores seleccionaron distintas tareas en las que estaban implicadas estas funciones ejecutivas y examinaron su papel en diferentes tareas cognitivas complejas (el test Wisconsin, la torre de Hanoi, la tarea de generación aleatoria de números, una tarea de amplitud de operaciones y una tarea de procesamiento dual). Encontraron que, aunque estas tres funciones ejecutivas correlacionaban moderadamente entre sí, su contribución en las tareas cognitivas planteadas era diferente. Concluyeron que la actualización podría considerarse una función ejecutiva que explicaría el rendimiento en algunas tareas de memoria de trabajo, de manera independiente del resto de funciones ejecutivas (cambio e inhibición), aunque manteniendo al mismo tiempo una relación con estas ya que comparten recursos comunes.

Tras la propuesta clásica de Baddeley, otros autores han reelaborado algunos de los aspectos implicados en este modelo original, dando lugar a nuevas aproximaciones teóricas al funcionamiento de la memoria de trabajo. Entre las propuestas más influyentes se encuentran el modelo de memoria de trabajo de Cowan y la modificación que de este modelo realizó posteriormente Oberauer.

1.2. La actualización en los modelos de Nelson Cowan y Klaus Oberauer

El modelo de Cowan propone que la memoria está dividida en regiones que difieren en la accesibilidad a la información almacenada. Cowan (1988) consideró la memoria de trabajo como una “región activada” dentro de la memoria a largo plazo. De este modo, propuso una estructura jerárquica de “dos niveles” en la memoria de trabajo. En un primer nivel, una amplia zona de activación de la memoria a largo plazo en la que la información está almacenada en un estado de fácil disponibilidad pero de acceso no inmediato.

En un segundo nivel, una zona de acceso privilegiado e inmediato que recibe el nombre de “foco atencional” y cuya capacidad es limitada. Según este modelo, el foco atencional incluye aquella información de la que la persona es consciente en un momento dado. Esta información es la más accesible de la memoria de trabajo puesto que tiene una activación más completa que el resto de los ítems que se sitúan fuera del foco, y es la información que es atendida y seleccionada para una acción futura. Durante la realización de una tarea, se requiere que el ítem a recordar esté activado en el foco atencional en el momento inmediatamente anterior a la respuesta. De esta manera, cualquier información que se recuerde está sujeta a la capacidad limitada del foco. Según Cowan el foco atencional puede albergar en torno a 4 ítems no relacionados entre sí. Por el contrario, la zona activada de la memoria a largo plazo no está limitada en capacidad sino temporalmente, y los elementos mantenidos en esta estructura están sujetos a la interferencia y al decaimiento.

Según este modelo, la información en la memoria fluye a través de estos niveles. Cuando los estímulos son suficientemente salientes y tienen una especial relevancia para el sujeto entran en el foco atencional. Un proceso ejecutivo dirige el proceso de atención voluntaria durante el cual se sitúan intencionalmente los ítems en el foco. Puesto que la capacidad del foco atencional es limitada, si otra información relevante necesita ser procesada, la información que está en ese momento en el foco tiene que ser desplazada de este para que la nueva pueda ser activada. La activación de la información en el foco origina la existencia de procesos de cambio del foco atencional (McElree, 2001; Voigt y Hagendorf, 2002). Cuando el número de ítems que se mantiene en la memoria de trabajo es pequeño o igual a la capacidad del foco atencional, se accederá a ellos rápidamente. Por el contrario, si el número de ítems que tienen que retenerse excede la capacidad del foco, se almacenarán fuera del foco atencional y el acceso a los mismos conllevará un incremento en el tiempo de respuesta (coste de cambio, “*switching cost*”). La existencia de este coste de cambio atencional se ha constatado en numerosos estudios (Garavan, 1998; Garavan, Ross, Li, y Stein, 2000; Kübler, Murphy, Kaufman, Stein, y Garavan, 2003; McElree, 2001; Oberauer, 2002).

El modelo de Cowan (1988) fue modificado por Oberauer (2002), que sugirió un tercer nivel de activación, planteando un modelo tripartito de la memoria de trabajo. Así, Oberauer propuso entender la memoria de trabajo como una estructura concéntrica de representaciones con tres regiones distintas funcionalmente. La primera sería la parte activada de la memoria a largo plazo que puede servir, entre otras cosas, para memorizar información por breves períodos para un recuerdo posterior. La segunda sería la región de acceso directo que permite mantener un número limitado de ítems (o “*chunks*”) disponibles o accesibles para

ser utilizados en procesos cognitivos futuros. Esta región se corresponde con lo que Cowan (1995, 1999) denominó foco atencional. La tercera y última región sería el foco atencional, que albergaría el único ítem que es seleccionado en un momento dado para la siguiente operación cognitiva.

Oberauer propuso que existe una diferencia entre mantener los objetos para un acceso directo y seleccionar un objeto para una acción futura. Aunque se pueden mantener varios objetos en la región de acceso directo, solamente uno de ellos está seleccionado inmediatamente para la acción o para su procesamiento. Solo los ítems que se encuentran dentro de la región de acceso directo son candidatos para ser seleccionados por el foco atencional. La recuperación de un ítem de la memoria de trabajo, ya sea para el recuerdo o la manipulación, conlleva activarlo en el foco. El foco de la memoria de trabajo tiene por tanto una función con respecto a la memoria que es equivalente a la función del foco atencional en percepción (Allport, 1987). Concretamente, su papel sería el de proporcionar el acceso selectivo a las representaciones que van a ser procesadas. El foco atencional serviría como conexión de los contenidos en la memoria de trabajo (p.ej., las representaciones mantenidas en la región de acceso directo) y el sistema de procesamiento.

Oberauer (2002) realizó un estudio para comprobar la existencia de los tres componentes propuestos en su modelo: la parte activada de la memoria a largo plazo, la región de acceso directo y el foco atencional. En la tarea, los participantes tenían que actualizar el contenido de una serie de números que aparecían en diferentes rectángulos, realizando una serie de operaciones aritméticas. Además, debían memorizar una serie de dígitos que tenían que recordar al final del ensayo y que el participante sabía que no se deberían actualizar. Según Oberauer, los dígitos sobre los que se aplicaban las operaciones aritméticas se encontrarían todos en la región de acceso directo y competirían por ser seleccionados para entrar en el foco. Este investigador encontró que a medida que aumentaba la carga de memoria se incrementaba la latencia de respuesta debido a la competición de los dígitos mantenidos en la región de acceso directo. Sin embargo, este efecto de la carga no se encontró en los ítems que no se actualizaban. Oberauer interpretó este resultado como una evidencia de que los dígitos que temporalmente son irrelevantes, son movidos de la región de acceso directo a la parte activa de la memoria a largo plazo. De esta forma esta región no se ve afectada por el incremento del número de ítems. Estos resultados muestran la flexibilidad de la memoria de trabajo para mover los contenidos entre las distintas regiones. Una lista de dígitos que no es necesaria para el procesamiento temporalmente, se mueve de la región de acceso directo en alrededor de 2 segundos, lo cual se refleja en la eliminación de los efectos de

la carga (*"set size"*). Cuando esta lista vuelve a ser relevante para el procesamiento vuelve a la región de acceso directo y el efecto de la carga en los tiempos de respuesta reaparece (Oberauer, 2005). Por otra parte, Oberauer (2002) también encontró evidencias de la existencia del foco atencional. Así, observó que cuando una operación aritmética debía aplicarse al mismo dígito que en el paso previo, las latencias eran más cortas que cuando debía accederse a un dígito diferente (coste de cambio). Además este coste de cambio se incrementaba a medida que aumentaba el número de elementos mantenidos en la memoria. Este coste de cambio se ha encontrado también en las condiciones en las que el ítem debe ser actualizado y reemplazado por un nuevo ítem (Oberauer, 2003).

Un aspecto relativo al foco atencional que ha generado controversia tiene que ver con su capacidad. La capacidad limitada del foco atencional en la memoria de trabajo explicaría el coste temporal que se produce al cambiar de un objeto a otro. Algunos estudios (p.ej., Garavan 1998; Kessler y Meiran, 2006; McElree, 2001; McElree y Doshier, 1989) sugieren que el foco atencional solo puede albergar un único elemento como propone Oberauer (2002) en su modelo. Garavan (1998) planteó que el coste temporal de cambio de objeto evidenciaba la existencia de un foco atencional de capacidad limitada que únicamente puede albergar un objeto al mismo tiempo. Por tanto, para actualizar un ítem que no ha sido actualizado recientemente, hay que volver a recolocar ese ítem dentro del foco atencional lo cual conlleva un coste temporal (*object switching cost*).

También consistente con la idea de un foco atencional de un solo elemento son los resultados obtenidos por McElree y Doshier (1989). Estos autores utilizando el paradigma de reconocimiento de Sternberg, observaron que se accedía más rápidamente a la última palabra de una lista que a las presentadas previamente. Además el recuerdo de este ítem era superior que el de los otros ítems de la lista. Estos investigadores interpretaron estos resultados como una evidencia de la existencia de un foco atencional que mantenía activo este último ítem, teniendo, por tanto, un estatus privilegiado de accesibilidad. McElree (2001) encontró resultados similares utilizando la tarea N-back. En esta tarea se presenta a los participantes una serie de ítems y estos tienen que decidir si cada uno de los ítems presentados es idéntico o no al que apareció N posiciones atrás en la secuencia. Así, observó que el tiempo de acceso era mucho más rápido para N=1 que para N=2 ó N=3, pero que era idéntico para N=2 y N=3. Así cuando N es igual a 1, la carga de memoria se limita a un ítem que está en el foco. Cuando N es mayor que 1, el ítem ha de moverse desde fuera hacia el foco para su procesamiento. Esta operación, conlleva un coste de cambio de objeto. Los resultados de esta investigación sugerían que la capacidad del foco se limita a un único elemento puesto que si el foco

atencional pudiese albergar más de un elemento no se hubiese encontrado el coste de cambio de objeto. Además McElree afirmó que el coste asociado al cambio atencional depende de si es necesario o no realizar un cambio, pero es independiente del incremento en la carga de memoria. Si esto fuese así, se esperaría encontrar un incremento en los tiempos de respuesta de $N=2$ a $N=3$, efecto que no se observó. No obstante, este último resultado contrasta con lo obtenido por Oberauer (2002) que encontró, como ya se ha comentado anteriormente, que el número de elementos mantenidos en la memoria producía un incremento en el coste de cambio.

Algunos autores (p.ej., Lilienthal, Tamez, Shelton, Myerson, y Hale, 2013; Verhaeghen, Cerella y Basak, 2004; Verhaeghen, Cerella, Basak, Bopp, Zhang, y Hoyer, 2007) plantean que la práctica intensiva en una tarea podía hacer que la capacidad del foco atencional aumentara, pudiendo llegar a contener hasta cuatro elementos a la vez, lo que apoyaría el modelo de Cowan (1988, 1995, 2001). Sin embargo, en otras investigaciones (Garavan, 1998; Oberauer, 2002; Oberauer, 2006; Oberauer y Bialkova, 2011) se ha constatado que la capacidad del foco atencional no se incrementa como consecuencia de la práctica, ya que después de varios ensayos el coste de cambio seguía produciéndose.

Aunque inicialmente Oberauer planteó que el foco atencional únicamente podría albergar un solo elemento, en investigaciones posteriores se ha cuestionado si éste podría expandirse si así lo demandase la tarea, puesto que muchas actividades de la vida cotidiana requieren el acceso a más de un elemento en la memoria de trabajo. Para dilucidar esta cuestión, Oberauer y Bialkova (2009) utilizaron una tarea en la que los participantes debían codificar y memorizar cuatro dígitos en cuatro colores diferentes y realizar con ellos diferentes operaciones de suma y resta. Una vez que los participantes memorizaban los cuatro dígitos asociándoles su color, se les mostraban como claves dos círculos de diferente color, que indicaban los números que debían utilizar para realizar la operación, y un signo de suma o resta. Los participantes debían realizar la operación e indicar el resultado lo más rápido posible. En esta tarea se manipulaba la repetición del dígito de un color, el cambio al otro operando o el cambio a un nuevo dígito. Por ejemplo, si el ensayo comenzaba con la operación amarillo + rojo y en el siguiente ítem aparecía amarillo + verde, se producía una repetición del dígito del primer operando (amarillo) y un cambio a un nuevo dígito para el segundo operando (de rojo a verde). Si a continuación se presentaba la operación verde + azul, tenía lugar un cambio del segundo operando al primero y un cambio a un nuevo dígito en el segundo. Oberauer y Bialkova (2009) encontraron que los tiempos de respuesta eran menores si se repetían los dos dígitos del ensayo previo independientemente del operando en el que

apareciesen. Por ejemplo, si en un ensayo aparecía la combinación verde y azul, en el ensayo siguiente se tardaba menos ante las combinaciones: verde y azul o azul y verde. Sin embargo, esto no ocurría cuando solo uno de los dígitos del ensayo previo se repetía. La interpretación que dieron a estos resultados es que el foco atencional puede albergar dos elementos al mismo tiempo pero solo cuando ambos elementos están integrados en una sola unidad. Por este motivo, cuando se repiten los dos dígitos de un ensayo a otro, se reutilizaría la integración de estos dos elementos, lo cual supone un beneficio temporal. Sin embargo, cuando se repite uno solo de los dígitos, esta integración no puede emplearse de nuevo con lo que no se produciría ningún beneficio. Los resultados de esta investigación demostraron, por tanto, que el foco atencional puede integrar ad-hoc dos elementos (*chunking*) para seleccionarlos en la memoria de trabajo cuando sea necesario para el procesamiento. McElree (1998, 2006) ya encontró evidencias experimentales de que el foco puede mantener varios ítems relacionados semánticamente lo que posibilitaba su integración.

A partir de los resultados obtenidos, Oberauer y Bialkova (2009) defendieron que la capacidad del foco no está limitada a un único elemento sino a una única unidad representacional. Estos investigadores plantearon que la razón de que el foco no pueda aumentar su eficiencia incrementando el número de ítems que puede mantener al mismo tiempo tiene que ver con la selección de las representaciones para el procesamiento. Si el foco pudiese contener varios elementos al mismo tiempo podría existir confusión o interferencia entre ellos, lo cual no puede suceder con la integración de los elementos, ya que constituyen una representación nueva y única cuyos componentes no pueden entenderse por separado. Por tanto, la limitación del foco atencional a un único elemento integrado (*chunk*) no se debe entender como una limitación en la capacidad cognitiva, sino como un modo de maximizar la eficiencia de la selección de los contenidos para el procesamiento.

Recientemente, Oberauer (2013) ha precisado la forma de entender el funcionamiento del foco atencional. Este investigador propone que más que la capacidad del foco y los elementos que se encuentran dentro o fuera de él, resulta relevante entender este mecanismo en base a las representaciones de los ítems y en las conexiones entre estas y sus claves de recuperación. Según este modelo, la velocidad para acceder a un ítem en la memoria de trabajo no estaría determinada por su posición dentro o fuera del foco sino por la activación de la representación de ese ítem, de sus claves contextuales y la fuerza de las conexiones. De este modo, cuando es necesario recuperar el mismo ítem, se utilizaría el mismo contexto como clave de recuperación, con lo que el acceso se produciría más rápido ya que se utilizarían las mismas conexiones entre el ítem y sus claves contextuales. Por el contrario, cuando se accede

a un ítem diferente, será necesario activar nuevas claves contextuales asociadas a ese nuevo ítem lo que conllevaría un coste.

En este trabajo, Oberauer (2013) retoma la cuestión relacionada con la capacidad del foco atencional. Según lo planteado en su modelo, la representación de un ítem y sus claves contextuales en un momento determinado sería el contenido del foco. Las claves contextuales activadas en los ensayos previos pueden tener aún cierta activación residual por lo que el foco atencional puede contener varias claves contextuales con distinto nivel de activación al mismo tiempo. La activación del ítem es más restringida puesto que se resetea a cero después de su procesamiento en la tarea. Sin embargo, este investigador plantea que cuando la tarea exige el acceso a dos ítems, como en los estudios que se vienen analizando, se activan dos claves contextuales al mismo tiempo y, por tanto, se activarían simultáneamente las representaciones de dos ítems (Gilchrist y Cowan, 2011; Oberauer y Bialkova, 2009).

Muchas tareas de actualización requieren el mantenimiento de varios elementos en la memoria de trabajo lo que exige cambiar el foco atencional de un elemento a otro para acceder a su contenido. El acceso a la información se considera un componente esencial del proceso de actualización. Las principales evidencias empíricas en relación con este componente se comentarán en el siguiente apartado.

2. LOS DISTINTOS COMPONENTES DEL PROCESO DE ACTUALIZACIÓN

Existe cierto consenso en cuanto a que el proceso de actualización no es un proceso unitario sino que está formado por distintos subprocesos o componentes. Cada uno de estos componentes ha sido examinado en diversas investigaciones, lo que ha permitido conocer con mayor detalle el funcionamiento del proceso de actualización.

Ecker, Lewandowsky, Oberauer, y Chee (2010) realizaron un análisis de distintas tareas de actualización e identificaron tres procesos independientes. El primero de ellos sería la recuperación del contenido previamente almacenado. Una de las tareas en la que estaría implicado este componente es la N-back (Kirchner, 1958; Yntema, 1963). Esta tarea exige la recuperación de información previa puesto que los participantes deben ir recordando los últimos ítems presentados; por ejemplo, el ítem anterior en el caso de una tarea de N-back 1 o el ítem situado dos posiciones atrás en el caso de una tarea N-back 2.

El segundo componente sería el de transformación de la información. Muchas tareas de actualización conllevan la transformación de la información por ejemplo a través de una operación aritmética ($3+2$). Un ejemplo de una tarea en la que estaría implicado el componente de transformación sería la diseñada por Oberauer, Süß, Schulze, Wilhelm, y Wittmann (2000), en la que los participantes debían mantener en la memoria los números que aparecen en distintos rectángulos, realizar una operación aritmética sobre cada uno de los números situados en cada rectángulo y recordar finalmente el resultado.

El tercer componente sería el de sustitución. Este componente implicaría sustituir información que ha quedado obsoleta por información nueva. Una tarea en la que es necesaria la sustitución podría ser, por ejemplo, la tarea de actualización de matrices de Chen y Li (2007). Esta tarea consistía en la presentación de tres círculos de colores en las distintas celdas de una matriz 4x4. Una vez que se presentaba la matriz, aparecían una serie de flechas de distintos colores que indicaban a qué nueva celda se debía mover cada uno de los círculos (izquierda, derecha, arriba o abajo). En esta tarea se requería recuperar la posición de cada ítem en la matriz y sustituirla por la nueva posición hasta que finalizaba el ensayo.

Partiendo del análisis de los componentes implicados en las tareas tradicionales de actualización, Ecker et al. (2010) diseñaron una tarea basándose en la tarea de actualización de Salthouse, Babcock, y Shaw (1991). Esta tarea posibilitaba la manipulación independiente de todos estos componentes. Además permitía analizar la relación entre cada uno de estos componentes y la capacidad de memoria de trabajo.

En esta tarea se presentaba a los participantes tres letras en distintos rectángulos que aparecían en la pantalla del ordenador y que tendrían que ir actualizando a lo largo de la tarea. Se manipulaban los tres componentes propuestos de manera factorial, de manera que en cada condición experimental podría estar implicado un solo componente, dos de ellos o los tres. En las condiciones que implicaban recuperación se pedía a los participantes que recordasen la última letra que había aparecido en un rectángulo determinado. En las que implicaban una transformación, los participantes tenían que realizar una operación alfa-aritmética sobre la letra (p.e., $A+2=C$). Por último, las condiciones de sustitución requerían el remplazo del contenido de la memoria por información nueva, mientras que cuando no se exigía sustitución el contenido era idéntico al mantenido en la memoria.

Ecker et al. (2010) encontraron que los componentes de recuperación, transformación y sustitución contribuían de manera distinta e independiente en la ejecución de la tarea. El componente de transformación era el que tenía un mayor impacto en la ejecución de la tarea de actualización. Así, las condiciones que exigían realizar una transformación producían una disminución en los tiempos de respuesta y en la exactitud del recuerdo. Sin embargo, estos autores consideraron que el componente de transformación no se relacionaba de manera específica con la actualización o la capacidad en la memoria de trabajo sino que podría reflejar la velocidad de procesamiento general, considerada como un factor clave de diferencias individuales.

En relación al componente de recuperación, este se relacionaría con el recuerdo pero no con la velocidad en la realización de la tarea. Además, este componente se relacionaba con la capacidad de la memoria de trabajo. Así, las personas con baja capacidad de memoria de trabajo eran más propensas a cometer errores a la hora de recuperar el ítem correcto.

Respecto al componente de sustitución, encontraron que tenía un impacto pequeño pero importante en la ejecución de la tarea. En las condiciones que requerían la sustitución de la información, la exactitud en el recuerdo se veía afectada en menor medida que cuando era necesario recuperar o transformar la información. Además, la sustitución de la información aunque afectaba a los tiempos de respuesta lo hacía en menor medida que el componente de transformación. Otro resultado relevante fue que este componente no se relacionaba con la capacidad de memoria.

El análisis conjunto de los tres componentes del proceso de actualización permitió a estos investigadores determinar la contribución relativa de cada uno a la ejecución y comprobar su relativa independencia. No obstante, previamente numerosos estudios habían

abordado separadamente el análisis de los diferentes componentes. A continuación, se analizarán las principales investigaciones que han estudiado el componente de sustitución, seguidamente las que se han centrado en el acceso a la información en la memoria de trabajo, la transformación de la información y la inhibición. Este último componente, que no fue considerado en el estudio de Ecker et al. (2010) que se acaba de describir, se relacionaría con el mecanismo encargado de eliminar la información que deja de ser relevante para la tarea.

2.1. La sustitución de la información

El componente de sustitución supone reemplazar un contenido previo que ha dejado de ser relevante por otro nuevo. Según Ecker et al. (2010), la sustitución es el único componente específico de la actualización que es independiente de otras medidas de memoria de trabajo y refleja por tanto una aportación específica del proceso de actualización. Se han realizado diferentes propuestas acerca de cómo se produce la sustitución de la información en la memoria de trabajo.

Kessler y Meiran (2006) realizaron una investigación que caracteriza con precisión la sustitución, determinando además cómo esta se ve influida por el número de elementos a sustituir. Para ello, diseñaron una tarea en la que manipulaban la actualización introduciendo dos condiciones: una condición de actualización, donde había que sustituir el contenido almacenado en la memoria por otro nuevo y una condición de no actualización donde no se requería sustituir la información. En esta tarea los participantes debían realizar simultáneamente operaciones de suma y resta que aparecían en dos figuras geométricas diferentes indicando finalmente el resultado para cada una de ellas y memorizar los resultados para cada una de las figuras. Se emplearon sumandos y sustraendos entre el 1 y el 9, que implicaban siempre la actualización de la información, y además se incluyó la operación $+0$ y -0 , introduciendo así una condición de no actualización para lo que se asumía que esta operación no implicaba ningún cambio en el resultado asociado a la figura. Además, esta tarea permitía manipular el número de elementos que se actualizaba.

Estos investigadores encontraron que cuando la operación implicaba una actualización se empleaba más tiempo que cuando no era necesario actualizar el contenido de la memoria de trabajo. A la diferencia entre el tiempo empleado en ambas condiciones se le denomina coste de actualización. Además los resultados indicaron que este coste de actualización se veía afectado por el número total de elementos mantenidos en la memoria cuando se mantenía constante el número de ítems que se actualizaban. Por ejemplo, resultaba más lento actualizar un elemento de entre tres memorizados que actualizar un elemento de entre dos

memorizados. Estos resultados fueron interpretados por la existencia de un proceso de actualización global. Este proceso hace referencia a que cuando se produce una actualización se pone al día todo el contenido de la memoria (y no solo el que se actualiza). Por este motivo, cuando se aumenta la cantidad de información mantenida en la memoria el coste de actualización se incrementa, incluso cuando la cantidad de información modificada sea la misma.

Según planteaban estos autores, los cambios rápidos requieren la protección de la interferencia de la información previa o de otros estímulos almacenados en la memoria de trabajo. La actualización global sería el proceso responsable de estabilizar las representaciones en la memoria de trabajo después de que se produzca la modificación de la información (que causa una desestabilización en el sistema de memoria). Esta estabilidad se llevaría a cabo integrando todos los ítems en una representación unitaria y compleja.

En un estudio posterior (Kessler y Meiran, 2008) propusieron la coexistencia del proceso de actualización global con un proceso de actualización local. Para evaluar este último proceso diseñaron una tarea que consistía en la presentación de una serie de estímulos que podían ser iguales al presentado en el ensayo previo (no requerían actualización) o distinto en alguno o todos sus ítems. Como en su estudio anterior, encontraron que el proceso de actualización se veía afectado por el número total de ítems lo que se interpretaba desde su idea de actualización global. Además encontraron que el proceso de actualización era sensible al número de ítems que debía modificarse. Por ejemplo, costaba más actualizar dos elementos de entre tres, que modificar un elemento de un conjunto de tres. Interpretaron que este último resultado reflejaba un proceso de actualización local. Según Kessler y Meiran (2008) el papel de la actualización local sería modificar la información de los ítems relevantes dejando intacto al resto. Este proceso proporcionaría flexibilidad a la MO para permitir cambios rápidamente.

La idea de una actualización local puede remontarse al trabajo de Vockenberg (2006), que encontró que el número de elementos a actualizar determina el tiempo de este proceso. Vockenberg utilizó en su estudio una tarea en la que aparecía un grupo de 5 letras en cada ensayo. El número de elementos que debía actualizarse iba variando progresivamente desde un elemento hasta cinco en cada ensayo. También había ensayos en los que no había que realizar ninguna actualización. Por ejemplo, cuando en el ensayo inicial aparecía “WUKOH” en el siguiente podía aparecer “WUKOH” (no actualización), “RUKOH” (actualización de un elemento), “BULOH” (actualización de dos elementos) y así hasta 5. Se informaba a los participantes que tenían que recordar el último grupo de letras que se les presentara. Los

resultados indicaron que conforme aumentaba el número de letras a actualizar en un ítem se incrementaba el tiempo de reacción. Estos resultados se consideraron como evidencia a favor de que la actualización depende del número de elementos actualizados.

En un estudio posterior, Kessler y Oberauer (2014) plantearon que el coste de actualización podría explicarse por el tiempo que conlleva el cambio en el modo de procesamiento de la memoria de trabajo, del mantenimiento de la información almacenada en la memoria a la sustitución. Estos investigadores proponen que cuando los participantes deben de actualizar toda la información, o parte de ella, realizan un proceso de revisión o barrido por orden de toda la lista. Cuando se encuentran con un ítem que ha de ser actualizado se produciría un cambio del modo de mantenimiento, en el que se encuentra inicialmente, al modo de sustitución, que conllevaría sustituir el ítem situado en esa posición por el ítem nuevo. Cuando los participantes se encontrasen con un ítem que coincidiese con el almacenado en la memoria (no actualización) se volvería al estado de mantenimiento. El cambio de un modo de procesamiento a otro conllevaría un coste temporal. Para poner a prueba su hipótesis, diseñaron una tarea en la que los participantes tenían que ir actualizando cuatro letras que aparecían en diferentes rectángulos e indicar al final, la última letra que había aparecido en cada uno de ellos. En esta tarea se consideraron un gran número de variables como el orden en el que aparecían los ítems que se actualizaban, el número de actualizaciones que se realizaban y el número de elementos que se mantenían en la memoria (carga). Los resultados de esta investigación mostraron que el número de veces que era necesario cambiar del modo de mantenimiento al modo de sustitución o viceversa influía en el coste de actualización.

En resumen, en los estudios que se han descrito se demuestra que en el proceso de actualización existe un proceso independiente, el de sustitución, que se evidencia cuando hay que reemplazar un contenido por otro en la memoria de trabajo. Previo a este reemplazo, la persona tiene que acceder al contenido de la memoria. A continuación, se describirán los estudios más relevantes relacionados con el acceso a la información en la memoria de trabajo.

2.2. El acceso a la información (cambio de objeto)

Uno de los componentes implicados en la actualización es el relacionado con el acceso, que se viene evaluando a través de tareas que implican el cambio de un contenido a otro en la memoria de trabajo. En numerosas tareas de actualización es necesario mantener simultáneamente distintos elementos, de los cuales, en un momento determinado, solo uno se actualiza, mientras que el resto se mantiene sin modificar. Si, tras haber actualizado un

elemento, la tarea exige actualizar otro elemento diferente, debe accederse a la información asociada a ese elemento. Para ello, se hace necesario cambiar el foco atencional de un elemento a otro.

Existen en la literatura diferentes investigaciones que se han interesado en el estudio de los procesos de cambio y cuyos resultados se alinean con la idea del foco atencional en la memoria de trabajo propuesto en los modelos de Cowan y Oberauer (Garavan, 1998; Mc Elree, 2001; Oberauer 2002). En todos ellos se ha demostrado que el acceso a la información almacenada implica un coste temporal que se refleja en un aumento en los tiempos de respuesta en las condiciones en las que es necesario acceder a contenidos previos frente a las que no es necesario.

Uno de los estudios más relevantes fue el realizado por Garavan (1998). La hipótesis planteada por este investigador es que en un momento determinado solo podemos focalizar la atención en un único elemento de la memoria de trabajo. Dada esta limitación, en las tareas de actualización, en las que hay que mantener varios objetos a la vez, es necesario contar con un mecanismo que cambie la atención de un elemento a otro. El propósito de la investigación de Garavan (1998) fue demostrar que requiere tiempo realizar el cambio atencional dentro de la memoria de trabajo. Para ello, utilizó una tarea de actualización de “doble contador”. Esta tarea consistía en pedir a los participantes que fuesen contando dos tipos de estímulos (triángulos y rectángulos) que aparecían de uno en uno en la pantalla del ordenador cada vez que el participante pulsaba una tecla. La tarea implicaba actualizar los valores asociados a cada uno de los estímulos a medida que aparecen en la pantalla. Garavan incluyó dos condiciones experimentales. En la primera condición (cambio) se presentaban consecutivamente las dos figuras: por ejemplo, un triángulo después de un rectángulo o un rectángulo después de un triángulo. En esta condición se requería realizar un cambio atencional entre los estímulos dado que los participantes tenían que cambiar de un contador a otro. En la segunda condición (no cambio), se presentaba consecutivamente la misma figura: por ejemplo, un rectángulo seguido de un rectángulo o un triángulo seguido de otro triángulo. En estos casos, en los que los participantes tenían que actualizar dos veces seguidas el mismo contador, no se produciría un cambio atencional.

Los resultados mostraron que los tiempos de respuesta cuando la figura que aparecía era distinta a la que había sido mostrada previamente eran mayores (483 ms) que cuando se volvía a presentar consecutivamente la misma figura. Garavan denominó a este efecto coste de cambio de objeto. Esto fue interpretado como una evidencia de la existencia de un mecanismo interno de cambio atencional en la memoria de trabajo que se encargaría de

mover los ítems dentro y fuera del foco atencional. Desde el modelo de Oberauer (2002) este resultado podría interpretarse como el tiempo que se tarda en seleccionar un nuevo elemento del conjunto de elementos mantenidos en la región de acceso directo y activarlo en el foco atencional.

Desde que se constató la existencia de este coste temporal al cambiar de un objeto a otro, diferentes estudios se han centrado en analizar la naturaleza de este proceso y los factores que podrían afectar al coste de cambio. En este sentido, algunos investigadores se han planteado si se puede separar el acceso al objeto de la recuperación de la información asociada a dicho objeto (Bialkova y Oberauer, 2010; Oberauer, 2003).

Oberauer (2003) analizó la posible existencia de dos procesos, uno de acceso al objeto y otro de acceso o recuperación del contenido, es decir de la información asociada al objeto. Este investigador comprobó que el coste de cambio se producía incluso cuando no había que acceder a la información asociada al objeto. En este estudio empleó una tarea en la que los participantes tenían que realizar operaciones aritméticas que aparecían dentro de distintas casillas. Finalmente, los participantes tenían que indicar el resultado de la última operación que aparecía en cada una de las casillas. Dado que en cada ensayo se presentaba la operación completa, los participantes no tenían que recuperar ninguna información de la memoria de trabajo. Los resultados aportados por Oberauer (2003) mostraron que el coste de cambio se producía, aunque para actualizar no fuese necesario acceder al contenido almacenado. Estos resultados, sugieren que el coste de cambio propuesto por Garavan (1998) no se debe únicamente al recuerdo selectivo de un elemento de la memoria de trabajo sino al tiempo que se tarda en cambiar el foco atencional de un elemento a otro.

Por su parte, Bialkova y Oberauer (2010) intentaron especificar cómo tienen lugar dos procesos asociados al cambio de objeto: la selección del objeto en función de la clave, por un lado, y la recuperación de la información asociada al objeto, por otro. Una posibilidad es que ambos procesos se realizaran separadamente, con lo que sería posible disociarlos experimentalmente. Otra posibilidad es que ambos procesos tuviesen lugar simultáneamente, de manera que cuando se selecciona un objeto también se accede simultáneamente a su información asociada. Para que esto último sea así, el contexto y el contenido asociado a un objeto estarían vinculados formando un todo. De este modo, se asume que una característica o propiedad del ítem (p.ej., color o localización espacial) sirve como clave para recuperar el contenido asociado a ese ítem. Cuando esa clave señala a otro objeto diferente del que anteriormente se presentó, esto conlleva un cambio de objeto. Pero además ha de recuperarse el contenido asociado a la clave de recuperación. Este proceso de recuperación

conlleva un tiempo adicional y el coste de cambio de objeto refleja al menos parte de ese tiempo. Por otra parte, otra posibilidad es que las representaciones de los objetos estarían formadas por el objeto en sí mismo (indicado por el color, su posición espacial, etc.) y su contenido (p.e.j un número). Ambos (objeto y contenido) conformarían un todo. De esta forma, el acceso al objeto implicaría simultáneamente el acceso al contenido del ítem. Para poner a prueba estas hipótesis llevaron a cabo dos experimentos en los que emplearon una tarea de actualización similar a la empleada en investigaciones previas (Oberauer, 2003). En esta tarea los ítems eran números de distinto color sobre los que había que realizar operaciones aritméticas sencillas (p.ej., $2+3$). Estos investigadores manipularon la recuperación o no de la información. Así en la condición de no acceso, se mostraba la operación completa (p.ej., $2+3$) por lo que no era necesario recuperar la información, mientras que en la condición de acceso la operación se mostraba incompleta (p.ej., $_ +3$) y los participantes tenían que recuperar el primer dígito. Además, en algunos ensayos se repetía el elemento a actualizar mientras que en otros cambiaba, manipulando así el cambio de objeto.

Desde la hipótesis de la separación de los procesos, se predeciría que el coste de cambio de objeto sería mayor en la condición de acceso que en la de no acceso. Sin embargo, desde la hipótesis de simultaneidad de los procesos, se predeciría que no habría diferencias en el coste de cambio entre la condición de acceso y la de no acceso puesto que la clave perceptual que indicaría el objeto que debe ser movido al foco implicaría el acceso al objeto y a todo su contenido. Por tanto, al acceder al objeto se accedería también al valor numérico. Estos investigadores encontraron que el coste de cambio era similar en la condición de acceso que en la de no acceso. A partir de los resultados obtenidos concluyeron que no existe un proceso de recuperación del contenido separado del cambio de objeto, confirmando por tanto la segunda hipótesis planteada. Una vez se produce la selección del ítem para ser introducido en el foco atencional, todo el contenido asociado al ítem estaría disponible para su procesamiento sin necesidad de ningún proceso adicional de recuperación. Esto implicaría que las representaciones mantenidas en la memoria de trabajo conforman un todo compuesto por el contexto y sus contenidos asociados.

Hay distintos factores que podrían influir en el coste de cambio de objeto, entre los que destacaría cierta facilitación propiciada por las características físicas de los estímulos. Según algunos autores tal facilitación podría explicar parte del coste de cambio (Gehring, Bryck, Jonides, Albin, y Badre, 2003; Li et al., 2006). Además, el coste de cambio podría verse afectado por otros factores que se describen a continuación.

A pesar de que Garavan (1998) descartase la existencia de un efecto de priming en el coste de cambio, algunos resultados posteriores permiten defender que una parte del coste podría deberse a este efecto (Gehring et al., 2003). Dicho coste incluiría, por una parte, el *priming* producido como consecuencia de actualizar varias veces el mismo objeto (*priming* de características físicas del estímulo) y, por otra parte, el *priming* de representaciones más abstractas asociadas a ese objeto. Para el estudio del cambio de objeto, Gehring et al. (2003) utilizaron una tarea en la que a cada objeto le correspondían dos claves (p.ej., & ó %). Con ello pretendían incluir una manipulación en la condición de no cambio en la que la clave podría ser idéntica (físicamente) a la que había aparecido previamente o diferente (aunque perteneciente al mismo objeto). Encontraron que los tiempos de respuesta eran menores en los ítems de no cambio en los que se repetía la clave asociada que en las que dicha clave era diferente. A la luz de los resultados obtenidos, estos investigadores concluyeron que el coste de cambio podría estar sobreestimado ya que en este estaría incluido el *priming* debido a la apariencia física de los estímulos. Además encontraron que las respuestas para el objeto que se presentaba en segundo lugar (contador 2) eran más rápidas en cada condición que las respuestas al primer objeto (contador 1). Estos investigadores explicaron este resultado basándose en la existencia de un *priming* de las representaciones asociadas a cada objeto. Tal y como suponía Garavan (1998), aunque él no llegó a comprobarlo empíricamente, este resultado podría deberse a que la activación tiende a decaer con el tiempo y, como el segundo objeto es el que ha sido repasado recientemente, por tanto, contará con una mayor activación que el primero, lo que propiciará que la respuesta sea más rápida.

Otros autores han intentado cuantificar la aportación del *priming* al coste de cambio. El objetivo del estudio de Li et al. (2006) consistía precisamente en analizar qué proporción del coste de cambio se debía a la existencia o ausencia de *priming*. Para tal fin emplearon una tarea en la que los participantes solo tenían que identificar figuras, sin necesidad de tener que mantener una cuenta en la memoria de trabajo como en el caso de la tarea empleada por Garavan (1998). Encontraron que aunque los tiempos de respuesta eran menores cuando la figura era idéntica a la anterior, esta facilitación solo suponía una pequeña proporción (menos de 1/5) comparado con la diferencia encontrada entre la condición de cambio y la condición de no cambio. Además, afirmaron que el efecto de *priming* encontrado por Gehring et al. (2003) podría deberse a las características intrínsecas de la tarea que emplearon. Concretamente, destacaron que el hecho de que existan dos claves distintas asociadas a cada contador requiere que los participantes un proceso de decisión extra sobre si tienen o no que cambiar el

foco atencional. Este proceso de decisión adicional podría ser el responsable del efecto de *priming* que Gehring et al. (2003) obtuvieron.

Por otra parte, Li et al. (2004) se cuestionaron si el coste de cambio entre dos objetos es independiente de la dirección en la que se produce el cambio (p.e., del objeto A al B en comparación con el cambio del objeto B al A). Otro objetivo adicional fue averiguar si existía un coste de la distancia en el cambio, es decir si el cambio de "A" a "C" implica el paso por el ítem intermedio "B". Para ello, utilizaron una tarea de "triple contador" en la que los participantes tenían que contar el número de figuras que aparecían de cada tipo (rectángulo, triángulo y elipse) en la cual manipulaban la existencia o no de cambio (p.ej., cambio AB versus no cambio AA), la dirección del cambio (AB versus BA) y por último, manipularon el efecto de la distancia en el cambio, analizando si en el cambio de "A" a "C" se pasaba por el paso intermedio "B". Los resultados mostraron un efecto de la dirección, es decir, el tiempo de respuesta era menor cuando se cambiaba de "A" a "B" que al contrario. Sin embargo, no encontraron el coste de la distancia en el cambio, concluyendo que el foco atencional salta directamente de un ítem a otro sin detenerse en pasos intermedios. Estos investigadores afirman que la asimetría encontrada en el cambio de objeto podría indicar que los ítems con diferente orden de repaso tienen un nivel o estatus de activación diferente.

El coste de cambio de objeto también puede generalizarse a otras tareas de diferente modalidad o contenido. Kübler et al. (2003) emplearon tres tareas diferentes: una tarea verbal donde los participantes tenían que contar cuadrados rojos y azules, una tarea espacial donde tenían que ir actualizando las posiciones en una matriz de un punto rojo y un punto azul, y una tarea combinada donde los participantes debían contar el número de cuadrados que aparecían y actualizar al mismo tiempo la posición de un punto en la matriz. Estos investigadores demostraron la existencia del coste de cambio en las distintas tareas de diferente modalidad (verbal y visoespacial). Además encontraron una correlación en el coste de cambio en las tres tareas que emplearon, lo que demostraba la existencia de un proceso de cambio atencional general y supramodal.

Se ha analizado si la activación de una propiedad o característica de un elemento en la memoria de trabajo implicaría su activación completa de todas las características asociadas a ese objeto (Bao, Li, y Zhang, 2007). De ser así, el coste de cambio entre características pertenecientes a un mismo elemento (cambio intra-objeto) sería menor que el coste de cambio entre características asociadas a elementos diferentes. Estos investigadores diseñaron una tarea en la que, al igual que en Kübler et al. (2003), los participantes tenían que actualizar información verbal y visoespacial que pertenecía a ítems diferentes y otra en la que los

participantes tenían que ir actualizando información verbal y visoespacial correspondiente a un mismo ítem. La hipótesis de estos investigadores consistía en que si la atención en la memoria de trabajo está basada en el objeto, atendiendo a una propiedad de un ítem aumentaría la atención o el nivel de activación de la otra propiedad de ese ítem integrado. Como resultado, el cambio atencional entre dos propiedades de un ítem integrado sería más rápido que entre dos propiedades memorizadas de manera separada. Los resultados mostraron que el cambio entre distintas propiedades de un mismo ítem u objeto (cambio intra-objeto) era más rápido que el cambio entre propiedades de ítems objetos diferentes. Estos resultados apoyan la teoría basada en el objeto. Cuando la atención se centra en una propiedad de un ítem o un objeto, todas las demás características o propiedades del objeto se activan y por tanto tienen un mayor grado de accesibilidad. Esto explicaría la facilitación intraobjeto encontrada en el cambio. Además estos autores encontraron que esta facilitación intraobjeto también se produce en una tarea visoespacial, lo que podría indicar que se debiese a una distancia espacial más corta entre las distintas propiedades de un mismo ítem. Por tanto, la facilitación que se produce en el cambio entre distintas propiedades de un mismo objeto podría estar basada tanto en el objeto como en la localización, lo que sugiere que pueden producirse distintos tipos de selección atencional en la memoria de trabajo.

2.3. La transformación de la información

En muchas tareas de actualización existe la necesidad de realizar una transformación de la información (p.ej., a través de una operación aritmética) que determinará el nuevo contenido que se debe almacenar en la memoria de trabajo. Como ya se ha comentado anteriormente al introducir los distintos componentes de la actualización, Ecker et al. (2010) estudiaron si el hecho de tener que realizar una transformación de la información influía en la actualización. Estos autores encontraron que este componente afectaba en mayor medida que la sustitución y la recuperación de la información a la ejecución en la tarea de actualización. No obstante, relacionaron este resultado con la velocidad de procesamiento general más que de manera específica con la actualización.

Las tareas de actualización pueden implicar además operaciones de distinta dificultad. Esto ha llevado a plantearse si la actualización podría verse afectada por la dificultad de las operaciones. Dado que las operaciones necesitan recursos, se ha planteado también que las operaciones más difíciles podrían consumir más recursos compartidos dejando menos disponibles para otros procesos de la actualización como el cambio atencional (Garavan, 1998).

Voigt y Hagendorf (2002) estudiaron el coste del cambio de objeto (*switching cost*) utilizando una tarea de actualización que implicaba distintos niveles de dificultad (contar hacia delante o hacia atrás). Estos investigadores pretendían determinar si, como sugirió Garavan, los recursos atencionales se comparten entre la operación implicada en la actualización y el cambio del foco. Para ello compararon el coste del cambio del foco atencional en las dos condiciones de actualización de distinta dificultad. Partían de la idea de que contar hacia delante es un proceso sobre-aprendido, de tal forma que los números siguientes a uno dado son generados más rápidamente que los anteriores. De esta manera, contar hacia atrás resultaría una condición de actualización más difícil (Barrouillet y Fayol, 1998). Plantearon que si el coste de cambio fuese mayor en la condición más difícil (contar hacia atrás) podría asumirse que se comparten los recursos entre la operación numérica y otros procesos como el cambio del foco. Los resultados mostraron que la manipulación de la dificultad de la operación numérica influye en el tiempo empleado en realizar la tarea tanto en la condición de cambio como en la de no cambio: la tarea contando hacia delante era más fácil que la tarea contando hacia atrás. Sin embargo, en contra de lo esperado, el coste de cambio fue significativamente menor en la condición de contar hacia atrás. Este resultado no es consistente con la hipótesis propuesta por Garavan (1998) en la que se planteaba que las operaciones más complejas pueden competir con los recursos limitados necesarios para procesos como el cambio o la actualización.

En otro experimento, Voigt y Hagendorf (2002) manipularon el rango de números en la tarea de actualización (1-20 y 21-40). Estos autores plantearon que mantener números mayores influiría en el tiempo de repaso porque estos tardan más en ser articulados, pero la magnitud de los números afectaría a la recuperación más que al cambio del foco atencional si estos procesos operaran independientemente. Sin embargo, si el tiempo para el cambio refleja una reorientación de la atención (Garavan, 1998) o una selección controlada y procesos de recuperación independientes del mantenimiento (Cowan, Wood, Wood, Keller, Nugent y Keller, 1998; Hulme, Newton, Cowan, Stuart, y Brown, 1999), entonces no deberían encontrarse cambios en el coste de cambio de objeto cuando se incrementaran los valores de los números. Los resultados mostraron que en los números mayores se empleaba más tiempo en realizar la actualización tanto en las condiciones de cambio como en las de no cambio. Sin embargo, el rango de números utilizados en la tarea no afectaba al coste de cambio. Estos resultados apoyaron el supuesto de independencia del cambio del foco atencional y el mantenimiento del material en la memoria por repaso.

Un estudio en el que indirectamente se ha examinado esta cuestión es el de Carretti, Cornoldi, y Pelegrina (2007). En este estudio se empleó una tarea de actualización numérica en la que el participante debía recordar los tres números más pequeños de una lista de 10 ítems presentados secuencialmente. En esta tarea era necesario realizar una comparación entre el número a actualizar y aquéllos que se mantenían en la memoria de trabajo. La tarea incluía dos condiciones de distinta dificultad. En la primera los ítems eran más próximos entre sí, mientras que en la segunda los ítems eran más distantes entre sí. Los estudios de comparación numérica en los que se emplean otro tipo de tareas han puesto de manifiesto que es más difícil comparar dos ítems más próximos que hacerlo con ítems más distantes (Moyer y Landauer, 1967). Los resultados pusieron de manifiesto que la manipulación de la dificultad para realizar la comparación podría influir en la ejecución en la tarea produciendo una disminución en el rendimiento. En concreto, estos autores encontraron que cuanto más próximos están los ítems de la lista más difícil resulta la actualización.

En resumen, de los anteriores estudios se concluye que la dificultad de las operaciones influye en el tiempo total empleado en la tarea. Además, el estudio de Voigt y Hagendorf (2002) muestra datos no del todo concluyentes que sugieren que la dificultad influye en el coste del cambio; aunque otros sugieren la independencia de ambos factores.

2.4. La inhibición

La inhibición es otro proceso que podría estar implicado en la actualización, encargándose de eliminar de manera activa la información que se ha quedado obsoleta. De esta manera dejaría espacio libre para almacenar nueva información. De no inhibirse, la información irrelevante ocuparía un espacio útil en la memoria de trabajo para otra información.

De acuerdo con la propuesta de Hasher (p.ej., Hasher, Zacks, y May, 1999) existen tres vías a través de las cuales la inhibición puede controlar los contenidos de la memoria de trabajo. Estas funciones son acceso, supresión y restricción. La primera de ellas implicaría controlar la entrada de la información a la memoria de trabajo, permitiendo únicamente la entrada a la información relevante para la tarea y evitando el acceso de información irrelevante. La segunda función suprimiría la activación de información irrelevante o información que había sido relevante pero que ahora no lo es. Finalmente, la tercera función serviría para prevenir y controlar las respuestas dominantes que se activan automáticamente permitiendo que se consideren otras respuestas menos probables. La función de inhibición

que aquí se plantea remite, por tanto, a la idea del mecanismo de supresión que planteó Hasher para la memoria de trabajo.

En muchas tareas de actualización se ha manipulado el número de ítems que dejan de ser relevantes a lo largo de la tarea para evaluar precisamente este proceso de inhibición. Por ejemplo, Palladino, Cornoldi, De Beni, y Pazzaglia (2001) comprobaron que el número de palabras irrelevantes en una tarea afectaba especialmente a las personas con pobre comprensión lectora y atribuyeron estas dificultades a un funcionamiento deficitario de los mecanismos inhibitorios encargados de suprimir la información irrelevante. La principal prueba de este déficit procedía del análisis de los errores de intrusión que se cometían en estas tareas. Las intrusiones son ítems que se presentaron durante la tarea pero que dejaron de ser relevantes, por lo que su recuerdo posterior muestra que estaban activos en la memoria de trabajo cuando no debían. Dentro de las intrusiones se distingue entre inmediatas, sucesivas y previas. Las dos primeras serían intrusiones de la misma lista. La diferencia entre ambas provendría del grado de activación conseguido. Las intrusiones sucesivas implicarían una mayor activación de la información debido a que provienen de ítems de la lista que habían sido relevantes y que pasan a ser irrelevantes; mientras que en las segundas, los ítems irrelevantes serían inmediatamente suprimidos sin que hayan experimentado una activación más prolongada. Estos dos tipos de intrusiones se relacionarían principalmente con la función de supresión descrita por Hasher. Por otro lado, las intrusiones previas hacen referencia a ítems recordados procedentes de listas anteriores, y, por tanto, irrelevantes para la lista actual. Estas intrusiones podrían aportar información sobre el control inhibitorio de información irrelevante procedente de la memoria a largo plazo (De Beni y Palladino, 2004). En resumen, se ha comprobado en distintos estudios que las personas con mecanismos inhibitorios ineficaces incluyen más información irrelevante en la memoria de trabajo.

No obstante, algunos autores como Oberauer (2005) defienden que los aparentes fallos al eliminar algunos contenidos irrelevantes de la memoria de trabajo, también pueden deberse a un déficit al representar qué contenido es relevante y cuál es irrelevante para el correcto desempeño de la tarea. Por tanto, una mala ejecución en tareas de actualización podría deberse a una capacidad limitada para enlazar (*binding*) las representaciones de distintos componentes en la memoria de trabajo.

Investigaciones más recientes destacan la existencia de un mecanismo de supresión como un proceso específico de la actualización en la memoria de trabajo planteando que el proceso de sustitución puede dividirse a su vez en la eliminación de la información obsoleta y

la codificación de la nueva información (Ecker, Lewandowsky, y Oberauer, 2014; Ecker, Oberauer y Lewandowsky, 2014).

Estos autores se basan en el modelo computacional (SOB: *serial-order in a box*) para conceptualizar el proceso de eliminación de la información irrelevante. Desde este modelo se asume que la información en la memoria de trabajo se representa en una red neural de dos capas en la que los ítems se representan en una de ellas y se asocian claves o marcadores contextuales (en concreto: la posición del ítem) que se representan en la otra capa. Asumen que la eliminación de un ítem durante la actualización implica la recuperación del ítem a través de su clave (p.ej., posición en la lista) y el desaprendizaje de la asociación entre el ítem y su posición. A continuación se codificará la nueva información. Desde este modelo se considera que la eliminación de la información irrelevante (desaprendizaje) y la codificación de la nueva información son dos procesos separados.

Teniendo en cuenta este planteamiento, Ecker, Lewandowsky et al. (2014) analizaron el componente de eliminación de manera separada y estudiaron además posibles diferencias individuales en dicho componente. Para ello, se basaron en la investigación realizada por Kessler y Meiran (2008), en la que utilizaban una tarea que consistía en ir actualizando el contenido que aparecía en diferentes rectángulos. Ecker, Lewandowsky et al. plantearon que en esta tarea, la medida de actualización incluye el tiempo en eliminar la información irrelevante y la codificación de la nueva información. Para intentar separar ambos procesos, en la tarea modificada se indicaba a los participantes con una clave qué ítems iban a tener que actualizarse antes de presentarles la nueva información. Según estos investigadores, el intervalo entre ambos sucesos (la clave y la presentación del nuevo ítem) serviría para eliminar la información obsoleta, por lo que variando la duración del intervalo, se modificaría también el tiempo disponible para la supresión de la información irrelevante. Basándose en esta premisa, su hipótesis de partida era que si efectivamente los participantes utilizasen este intervalo temporal para la eliminación de la información, intervalos más largos producirían menores tiempos de respuesta. Además, ciertos efectos de facilitación asociados al mantenimiento de información relacionada con la nueva información se atenuarían o desaparecerían, si se diera tiempo a eliminar la información inicial. Los resultados confirmaron su hipótesis inicial tanto con información verbal (Exp. 1) como con información numérica (Exp.2): los intervalos más largos hacían que la actualización se llevase a cabo más rápidamente. Es reseñable el hecho de que en el segundo experimento de este estudio emplearon la tarea desarrollada para el primer experimento de esta Tesis (Lendínez, Pelegrina y Lechuga, 2011) replicando así los efectos encontrados en este trabajo y que se comentarán

más adelante. Además, en el primer experimento encontraron que intervalos más largos producían una disminución del efecto de facilitación relacionado la repetición de la información. De la misma manera, en el segundo experimento se reducía la facilitación producida por la similitud de los ítems. Los resultados obtenidos en ambos experimentos corroboraron la existencia de un mecanismo específico de eliminación de la información que se encargaría de suprimir la información previa atenuando el efecto de facilitación producido por la similitud entre la información anterior y la nueva.

A la luz de los resultados obtenidos, estos investigadores destacaron la importancia de este subproceso encargado de eliminar información irrelevante para el funcionamiento de la memoria de trabajo que resultaría fundamental para minimizar la interferencia. Además, Ecker, Lewandowsky, et al. (2014) encontraron que la velocidad con la que se elimina información irrelevante no se relaciona con la capacidad de memoria de trabajo, corroborando los resultados obtenidos en investigaciones previas en relación a la habilidad general para llevar a cabo la sustitución (Ecker et al., 2010).

En otro estudio, estos investigadores encontraron evidencias adicionales de la importancia de este proceso de supresión en la actualización en la memoria de trabajo (Ecker, Oberauer et al., 2014). Así, estos investigadores encontraron que la ventaja proporcionada por el intervalo temporal que posibilitaba la eliminación de información no relevante no se producía cuando había que actualizar el conjunto completo de ítems almacenados en la memoria (actualización global) ni se incrementaba a medida que lo hacía el número de ítems a actualizar. La interpretación que hicieron de estos resultados es que los participantes utilizaban el intervalo para eliminar sólo un ítem aunque la tarea exigiese actualizar más de un ítem e incluso cuando se les daba a los participantes más tiempo para eliminar la información irrelevante asociada a cada uno de los ítems. Según Ecker, Oberauer et al. eliminando únicamente la información asociada a un ítem se evitaría el coste asociado al coste de objeto y además el coste que supone el cambio entre el mantenimiento y la sustitución de la información (Kessler y Oberauer, 2014). Estos investigadores concluyeron que la eliminación activa de la información es un proceso crucial en las tareas de actualización y además es específico de un ítem.

En conclusión, el análisis de los distintos subprocesos implicados en la actualización y los resultados obtenidos en diversas investigaciones demuestran que la eficacia con la que se realizan distintas tareas cognitivas complejas depende de la implicación de diversos subprocesos encargados de diferentes funciones específicas. Esta Tesis Doctoral tiene como objetivo principal el análisis del componente encargado de la sustitución de la información

obsoleta por nueva información relevante. Además se analizará la existencia de diferencias evolutivas en este componente y en el encargado de cambiar el foco atencional de un contenido a otro en la memoria de trabajo.

3. DIFERENCIAS INDIVIDUALES Y EVOLUTIVAS ASOCIADAS A LA ACTUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN EN LA MEMORIA DE TRABAJO

La actualización es un proceso sujeto a diferencias individuales y evolutivas. Tales diferencias se reflejan en la forma en que las personas realizan distintas tareas cognitivas. En este apartado se describirán, en primer lugar, los principales estudios que han analizado estas diferencias y han estudiado el rendimiento de diferentes grupos de personas empleando distintas tareas de actualización. Seguidamente, se detallarán algunos estudios que han analizado la capacidad para actualizar la información en personas con diferentes trastornos clínicos. Por último, se expondrán las investigaciones más relevantes que han analizado los cambios evolutivos en la actualización.

3.1. Diferencias individuales

Existe cierto acuerdo en la importancia específica del proceso de actualización a la hora de explicar diferencias individuales y evolutivas en el rendimiento en diversas tareas complejas. La capacidad para actualizar la información de forma rápida y exacta es decisiva para la realización de tareas cognitivas complejas como: la comprensión lectora, la realización de cálculos aritméticos, la resolución de problemas, y en general, aquellas tareas que contribuyen al rendimiento académico. Además, la actualización se ha revelado como el principal determinante de la ejecución en tareas de inteligencia (Friedman et al., 2006), siendo un factor crítico a la hora de predecir la ejecución en pruebas de inteligencia tanto en adultos como en niños (Belacchi et al., 2010; Brydges, Reid, Fox, y Anderson, 2012; Chen y Li, 2007; Duan, Wei, Wang, y Shi, 2010).

Resulta por tanto evidente la importancia de este mecanismo a la hora de explicar diferencias individuales en tareas relacionadas con el rendimiento escolar. Así, por ejemplo, distintas investigaciones han planteado que los déficits en comprensión lectora podrían asociarse a un déficit específico en el proceso de actualización, concretamente en el control de la información que deja de ser relevante para la tarea (p.ej., Borella, Carretti, y Pelegrina, 2010; Carretti, Cornoldi, De Beni, y Romano, 2005; Cornoldi, Drusi, Tencati, Giofrè, y Mirandola, 2012; Palladino et al., 2001). Los resultados de un meta-análisis realizado por

Carretti, Borella, Cornoldi, y De Beni (2009) sobre 18 estudios en los que se compara la ejecución de niños y adultos, con buena y baja comprensión lectora, confirman que la habilidad para mantener información relevante, inhibir la información obsoleta y actualizar el contenido de la memoria es peor en las personas con dificultades en comprensión.

La habilidad para actualizar el contenido de la memoria parece también ser determinante de la ejecución en la resolución de problemas matemáticos y la ejecución de cálculos numéricos. Así, se ha demostrado la implicación de los procesos de actualización en la resolución de operaciones aritméticas sencillas de suma y multiplicación (Deschuyteneer, Vandierendonck, y Myullaert, 2006). Por otra parte, Passolunghi y Pazzaglia (2004), comprobaron que los niños con alta habilidad para actualizar realizaban mejor problemas aritméticos. Estas mismas autoras demostraron que los niños con dificultades en resolución de problemas realizaban peor una tarea de actualización semántica (Passolunghi y Pazzaglia, 2005). Swanson y Beebe-Frankenberger (2004) también encontraron una peor ejecución en una tarea de actualización en niños con dificultades en matemáticas. De hecho, esta habilidad se considera el mejor predictor de las destrezas numéricas incluso en niños de cinco años de edad (Kolkman, Hoijtink, Kroesbergen, y Leseman, 2013). Por tanto, parece que en el área de las matemáticas también existe una clara relación entre la habilidad para llevar a cabo la actualización y la eficacia en la resolución de problemas y cálculos matemáticos.

Se ha planteado si las dificultades que presentan los niños con problemas de comprensión lectora y los niños con pobres habilidades en matemáticas en las tareas de actualización podrían ser específicas de dominio, es decir, si los primeros tendrían mayor dificultad en la ejecución de tareas con material verbal, y los segundos en la realización de tareas con material numérico. Pelegrina, Capodieci, Carretti, y Cornoldi (2014) llevaron a cabo una investigación en la que confirmaron que los niños con problemas de comprensión realizaban peor que los niños sin ninguna dificultad de aprendizaje (grupo control) una tarea de contenido verbal. En esta tarea los participantes debían de recordar, por orden, los tres objetos más pequeños que se les presentaban. Por su parte, los niños con pobres habilidades aritméticas tenían una peor ejecución que el grupo control cuando la tarea exigía el recuerdo de los tres números más pequeños en el mismo orden en que se presentaban. Estos resultados podrían explicarse atendiendo a las dificultades representacionales de cada grupo de niños. Así, los niños con problemas en matemáticas tendrían una mayor dificultad para la representación de los números, lo que explicaría su peor ejecución en la tarea de actualización numérica. Los niños con baja comprensión lectora presentarían más problemas a la hora de

recuperar las propiedades semánticas de los objetos, lo que afectaría a la ejecución de la tarea de actualización con material verbal.

Algunos investigadores han demostrado también la implicación de la actualización en el rendimiento de niños que presentan varias dificultades de aprendizaje al mismo tiempo (p.ej., Van der Sluis, de Jong y van der Leij ,2004) y en niños sin dificultades específicas y con un desarrollo típico (p.ej., St. Clair-Thompson y Gathercole, 2006; Van der Sluis, de Jong, y van der Leij ,2007). Van der Sluis et al. (2004) realizaron una investigación en la que examinaron diferentes funciones ejecutivas en niños con dificultades en cálculo aritmético, en niños con dificultades en lectura, y en un grupo de niños que presentaban ambos problemas y concluyeron que los déficits en actualización de los niños que presentan dificultades en ambas áreas no son de una naturaleza diferente a los que presentan los niños con una sola dificultad (bien de lectura o bien de habilidades aritméticas).

En relación al papel de los procesos de actualización en las tareas escolares en niños con un desarrollo típico, una de las investigaciones más relevantes es la que llevaron a cabo St. Clair-Thompson y Gathercole (2006). El objetivo de este estudio consistía en analizar si funciones ejecutivas como la actualización, se relacionan con el rendimiento académico en niños de 11 y 12 años. Estas autoras identificaron dos funciones ejecutivas independientes que contribuían a la explicación del rendimiento escolar: una relacionada con la actualización de la información relevante y otra relacionada con la inhibición de información irrelevante. Las autoras concluyeron que la actualización en la memoria de trabajo consiste en una habilidad de dominio general crucial en las tareas complejas. Utilizando una lógica similar, van der Sluis et al. (2007) también demostraron que la actualización contribuía de manera independiente y única a la ejecución en tareas de lectura, tareas aritméticas y tareas de razonamiento no verbal.

De los estudios revisados puede concluirse que la habilidad para actualizar el contenido de la memoria de trabajo es un determinante crítico del rendimiento académico, tanto en niños con dificultades específicas de aprendizaje como en niños con un desarrollo típico. Por tanto, estudiar el desarrollo de este proceso a los largo de la niñez podría aportar información con importantes implicaciones educativas.

Relacionado también con las diferencias individuales, distintos estudios han examinado si la capacidad para actualizar la información se ve afectada también en algunos trastornos clínicos. A este respecto, se ha encontrado un déficit en los procesos de actualización en pacientes depresivos (Harvey et al., 2004). Además, se ha encontrado que

estos pacientes muestran un mayor grado de interferencia del material negativo irrelevante cuando actualizan los contenidos de la memoria de trabajo (Joormann y Gotlib, 2008). En este último estudio observaron que la rumiación que presentan los pacientes depresivos estaría asociada a las dificultades en la actualización. Este resultado se ha constatado en estudios posteriores (Meiran, Diamond, Toder, y Nemets, 2011). También se ha observado un deterioro de la capacidad para actualizar la información en personas con esquizofrenia (Gallety, MacFarlane, y Clark, 2007). En un estudio con personas que padecían este trastorno se ha comprobado que la presencia de alucinaciones se relaciona con problemas a la hora de suprimir aquella información que deja de ser relevante para la tarea (Soriano, Jiménez, Román, y Bajo, 2009). También se ha encontrado un déficit a la hora de llevar a cabo la actualización en personas con la enfermedad de Alzheimer (Borgo, Giovannini, Moro, Semenza, Arcicasa, y Zaramella, 2003; Spieler, Balota, y Faust, 1996) y en personas con trastorno por déficit de atención e hiperactividad tanto en niños (Shallice, Marzocchi, Coser, Del Savio, Meuter, y Rumati, 2002) como en adultos (White y Marks, 2004).

3.2. Cambios evolutivos

Diversos estudios han demostrado la existencia de cambios evolutivos en la eficacia con la que se actualiza la información en la memoria de trabajo (p.ej., Garon, Bryson, y Smith, 2008; Huizinga, Dolan, y Van der Molen, 2006; Lechuga, Moreno, Pelegrina, Gómez-Ariza, y Bajo, 2006; Pelegrina, Borella, Carretti, y Lechuga, 2012). La existencia de mejoras relacionadas con la edad en el proceso de actualización también se ha constatado en distintos estudios utilizando la tarea n-back, en los que se plantea que las diferencias evolutivas obtenidas en las tareas de actualización pueden obedecer a la maduración de áreas cerebrales fronto-parietales (Kwon, Reiss, y Menon, 2002; Schleepen y Jonkman, 2010; Vuontela, Steenari, Carlson, Koivisto, Fjällberg, y Aronen, 2003).

Además del análisis de las diferencias evolutivas generales en la actualización, resulta relevante considerar procesos más específicos implicados en la actualización. En algunas investigaciones, las diferencias evolutivas encontradas se relacionan con el funcionamiento de los procesos inhibitorios. Por ejemplo, algunas investigaciones con personas mayores atribuyen el peor rendimiento en tareas complejas a una peor habilidad para suprimir o inhibir la información que ha dejado de ser relevante (De Beni y Palladino, 2004). Esta peor habilidad en las personas mayores se refleja en un mayor número de intrusiones (recuerdo de información irrelevante) que las personas jóvenes. En la niñez, también se han encontrado mejoras relacionadas con la edad en la actualización. A ese respecto, Lechuga et al. (2006)

encontraron que los niños más pequeños (8-9 años) eran menos eficaces a la hora de actualizar la información que los niños mayores (11-12 años) y estos últimos a su vez eran menos eficaces que los adultos. Los resultados mostraron cambios asociados a la edad tanto en el porcentaje de recuerdo como en el número de intrusiones. Estos autores consideraron que los cambios en la ejecución podrían interpretarse como un indicio de la mejora de los procesos inhibitorios (encargados de suprimir la información que deja de ser relevante) a medida que se incrementa la edad.

También se ha analizado el componente de acceso a la información para determinar si cambia con la edad. Hasta lo que conocemos, la totalidad de los estudios en este ámbito se han realizado con personas mayores. Así, Oberauer et al. (2003) encontraron diferencias entre un grupo de adultos jóvenes y un grupo de personas mayores en los tiempos de respuesta, a medida que se incrementaba el número de elementos a actualizar. Sin embargo, no encontraron diferencias entre ambos grupos en el coste de cambio, confirmando lo obtenido en sus investigaciones previas (Oberauer, Demmrich, Mayr, y Kliegl, 2001). Estos investigadores concluyeron que las personas mayores no tienen dificultades relacionadas con la velocidad para acceder a un elemento en la memoria de trabajo sino que los déficits que presentan en esta tarea se atribuirían con más probabilidad a una disminución de la habilidad para mantener los contenidos en la memoria de trabajo.

Por otra parte, Verhaeghen y Basak (2005) utilizaron una versión modificada de la N-back para analizar la existencia de diferencias evolutivas en el coste de cambio de objeto en adultos jóvenes y personas mayores. De la misma manera que Oberauer et al. (2003), no se encontraron diferencias entre jóvenes y mayores en el tiempo de acceso a los ítems fuera del foco atencional. Es decir, el proceso de cambio de objeto no se veía afectado por la edad en lo relativo a los tiempos de respuesta. Sin embargo, los resultados revelaron la existencia de diferencias entre ambos grupos en la exactitud del recuerdo en los ítems situados fuera del foco atencional, pero no en los ítems mantenidos en el foco. Este efecto parecía deberse únicamente al proceso de cambio ya que las diferencias en la exactitud del recuerdo no se incrementaban de N=2 a N=5.

Verhaeghen y Basak (2005) concluyeron que el proceso de cambio de los ítems dentro y fuera del foco no varía con la edad en la velocidad para realizar la operación, pero sí en la exactitud del recuerdo. Estos resultados fueron interpretados por los investigadores de la siguiente manera: en lo referente al proceso de cambio de objeto existen diferencias en la disponibilidad de los ítems una vez que estos salen del foco atencional pero no en el acceso a los ítems situados fuera del foco. Por otra parte, estos investigadores no encontraron

diferencias relacionadas con el proceso de actualización en sí mismo. Las diferencias en la actualización se examinaron comparando los tiempos de respuesta cuando el ítem no había de actualizarse (porque era idéntico al presentado N posiciones atrás) con los ítems en los que sí se exigía la actualización.

Verhaeghen y Hoyer (2007) obtuvieron resultados similares utilizando una tarea continua de cálculo. Así corroboraron la existencia de diferencias evolutivas entre los adultos jóvenes y las personas mayores en el cambio de objeto únicamente en la exactitud del recuerdo y no en los tiempos de respuesta. En un estudio posterior estos investigadores profundizaron en el análisis de las diferencias evolutivas en el proceso de cambio utilizando la N-back, pero incrementando su dificultad (Vaughan, Basak, Hartman, y Verhaeghen, 2008). Los resultados de estos experimentos replicaron lo obtenido en investigaciones previas respecto a la exactitud del recuerdo. La ausencia de cambios evolutivos en las personas mayores respecto a la velocidad con la que se accede al objeto situado fuera del foco atencional se ha comprobado también con otras tareas de actualización (Pelegrina et al., 2012).

Los resultados obtenidos en las distintas investigaciones confirman que la edad tiene un mayor efecto en la disponibilidad de los ítems que en el acceso. Además sugieren una explicación alternativa a las teorías que atribuyen las diferencias evolutivas a un enlentecimiento de los procesos básicos con el envejecimiento (Salthouse, 1996). Los resultados obtenidos por estos investigadores sugieren que un mecanismo específico, más allá de los efectos de un enlentecimiento general, sería necesario para explicar por qué las representaciones de los ítems fuera del foco atencional parecen ser vulnerables a la edad.

Otros estudios han revelado que el déficit para cambiar el foco atencional de un elemento a otro no solo se produce en adultos mayores sino se detecta ya en los adultos de mediana edad, de entre 50 y 60 años (Van Gerven, Meijer, y Jolles, 2007). Las diferencias evolutivas encontradas en este estudio iban en la línea de los estudios descritos previamente, observándose diferencias en la exactitud del recuerdo pero no en los tiempos de respuesta.

No se conocen, hasta la fecha, estudios que hayan intentado comprobar posibles cambios en este proceso en niños. Podría ser que los cambios evolutivos observados en tareas de actualización obedezcan en parte a posibles diferencias en este componente de la actualización. Por este motivo, uno de los objetivos de esta Tesis consiste en el análisis del proceso de cambio de objeto en niños de distintas edades y en adultos.

Aunque existen numerosas evidencias experimentales que demuestran la existencia de diferencias evolutivas en el proceso general de actualización, tampoco se conoce ningún

estudio que haya examinado diferencias específicas en el componente de sustitución. Por ello, otro de los objetivos de esta Tesis Doctoral consistía en investigar si la manera en la que se sustituye la información en la memoria de trabajo experimenta cambios con la edad.

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

4. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

La actualización no es un proceso unitario sino que está constituido por diferentes componentes. Uno de los objetivos de esta Tesis Doctoral se centraba en el análisis del componente de sustitución, que implica reemplazar el contenido de la memoria por información nueva.

En relación al proceso de sustitución, Kessler y Meiran (2006, 2008) plantean que cuando se lleva a cabo la actualización puede producirse la sustitución de parte de la información almacenada en la memoria de trabajo (actualización local). Así, cuando solo cambia un ítem de varios mantenidos en la memoria, solo se sustituiría dicho ítem. Esta actualización parcial proporcionaría cierta flexibilidad para que puedan producirse cambios rápidos en un momento determinado.

En esta Tesis se planteó la posibilidad de otro tipo de sustitución selectiva que actuaría no ya sobre los elementos mantenidos simultáneamente, sino sobre las distintas partes de un elemento, es decir, sobre una representación concreta mantenida en la memoria de trabajo. De este modo, esta sustitución parcial de la información podría producirse a un nivel más general (p.ej., sustitución de elementos) o a un nivel más elemental como de sus características. Según diversas concepciones sobre la memoria de trabajo, la información se representa a través de conjuntos de características que se activan al mismo tiempo (Nairne, 1988, 1990; Neath, 2000; Lewandowsky y Farrell, 2008; Oberauer y Kliegl, 2001, 2006). Según propuestas como la de Oberauer y Kliegl (2006), las características de los distintos ítems siempre se solapan en distinta medida, siendo el grado de solapamiento mayor cuanto más similares sean los ítems. Teniendo en cuenta esta idea general sobre la representación de la información en la memoria de trabajo, cabe plantearse la posibilidad de que cuando se produce una actualización, lo que se sustituiría no es el elemento en su totalidad sino algunas de sus características. Esto supondría que cuando hay que actualizar cierta información mantenida en la memoria de trabajo que comparte muchas características con la nueva presentada, será necesario activar un menor número de características porque algunas ya estarían activadas previamente. Esto, a la postre, podría reflejarse en la ejecución. De este modo, el mayor grado de características compartidas entre la información implicada en la actualización se traduciría en un efecto de facilitación. Es decir, la actualización se llevaría a cabo más rápidamente a medida que la información compartiese más características.

El objetivo del primer estudio (Lendínez et al. 2011) era determinar si la sustitución se ve afectada por el solapamiento representacional entre la información nueva y aquella que va

a ser sustituida. Para ello se realizaron dos experimentos. En el primero se manipuló la similitud entre los ítems implicados, asumiendo que a mayor similitud mayor grado de características compartidas. En este estudio, la similitud entre la información nueva y la sustituida se operacionalizaba a través de la distancia entre los números implicados en una tarea de actualización numérica. Se empleó una tarea en la que los participantes debían recordar el número más pequeño asociado a dos elementos u objetos diferentes. Si la similitud de la información influyese en la actualización, a medida que los números implicados en la comparación estuviesen más próximos entre sí, deberían disminuir los tiempos de respuesta, produciéndose el efecto de facilitación predicho.

En el primer experimento la decisión de actualizar o no dependía de una operación numérica que puede influir en la ejecución. Si la distancia afecta tanto a la operación como a la sustitución, la ejecución podría reflejar el efecto de la distancia en ambos procesos, aunque el más potente fuese el de la similitud. Puesto que en esta tarea se podía confundir el efecto que la distancia tiene en la actualización y en la comparación, era necesario comprobar que el efecto de facilitación en la actualización no se debía a la operación implicada. Una forma de hacerlo era evitando que las personas tuviesen que realizar la comparación. Este fue el objetivo del segundo estudio.

Por ello, el segundo experimento se realizó para excluir la posible influencia de la dificultad de las operaciones numéricas en la actualización. En este caso, los participantes no tenían que realizar ninguna comparación numérica sino que solamente se les indicaba si debían de sustituir la información almacenada por la nueva o no. Con esto se eliminaba el posible efecto de las operaciones y, por lo tanto, el efecto de la distancia podía ser atribuido exclusivamente a la similitud de la información.

El siguiente estudio de esta Tesis Doctoral (Lendínez, Pelegrina, y Lechuga, 2014) perseguía caracterizar mejor el efecto de la distancia encontrado en los experimentos previos, generalizar el resultado a un mayor número de situaciones y, en definitiva, obtener nuevas evidencias empíricas consistentes con la idea de un proceso de sustitución selectivo que actúa sobre representaciones. En concreto se pretendía demostrar que el efecto de facilitación en la actualización puede producirse a través de distintas dimensiones de similitud entre la información que se va a sustituir y la almacenada en la memoria.

Para ello, se llevaron a cabo tres experimentos en los que se manipulaban dos dimensiones de similitud: la distancia numérica y además la coincidencia entre los dígitos de los números implicados en la actualización. Así, en el primer experimento se consideraron dos

dimensiones de similitud: la distancia numérica y la decena a la que pertenecen los números implicados en el proceso de sustitución. Con tal fin, se manipuló además de la distancia entre los números, la pertenencia a una misma o diferente decena. Se esperaba encontrar que además de la distancia, la coincidencia de los números en la decena influyese en el coste de actualización. La contribución separada de ambas dimensiones en el proceso de actualización proporcionaría una evidencia adicional de que la actualización conlleva la sustitución selectiva de algunas partes de la representación numérica.

En un segundo experimento de este estudio se pretendía analizar la existencia de un efecto gradual de la distancia, que podría ser considerado otro apoyo adicional a la idea del papel de la similitud en la actualización. Para ello, se amplió el rango de distancias utilizado. Este experimento permitía también analizar por separado, el efecto de la distancia y del cambio de decena. Se esperaba que ambas dimensiones de similitud tuviesen un efecto en la actualización.

El último experimento de este estudio estaba dirigido a generalizar el efecto encontrado de similitud de los dígitos. Específicamente, se pretendía comprobar si el hecho de que dos dígitos compartan la misma unidad tiene un efecto similar al de compartir la misma decena. En este experimento se esperaba encontrar que la coincidencia en un dígito, independientemente de su posición, tuviese un efecto en la actualización.

El último estudio de esta Tesis (Lendínez, Pelegrina, y Lechuga, en prensa), pretendía fundamentalmente analizar las diferencias evolutivas en dos componentes de la actualización: la sustitución y acceso a la información. Además también se analizó si la similitud entre la información nueva y la que se mantiene en la memoria afecta de manera distinta a diferentes grupos de edad.

Como se ha comentado en el capítulo de diferencias evolutivas, diversas investigaciones han constatado que la eficacia con la que se actualiza la información mejora con la edad (Huizinga et al., 2006; Kwon et al., 2002; Lechuga et al., 2006; Vuontela et al., 2003). Además, algunos estudios han examinado las diferencias que se producen con la edad en el cambio de objeto comparando adultos jóvenes y personas mayores (Vaughan et al., 2008; Verhaegen y Basak, 2005). En estas investigaciones se ha planteado que en muchas tareas cognitivas que exigen cambios del foco atencional, las diferencias evolutivas encontradas en las mismas podrían deberse, en parte, a las diferencias en este componente de la actualización. Sin embargo, no se conocen hasta la fecha investigaciones que hayan analizado la contribución por separado de estos componentes en el proceso de actualización a

lo largo de la niñez. En este estudio se comparó la ejecución de niños de 8, 11 y 14 años, y adultos jóvenes en la tarea de actualización empleada en los estudios previos. En definitiva, en esta investigación se pretendía analizar si los componentes de sustitución y acceso a la información están sujetos a cambios con la edad. Si el cambio de objeto desempeñase un papel determinante en el desarrollo de la actualización debería producirse una mejora con la edad en la eficiencia con la que se lleva a cabo este proceso. De la misma manera, si la sustitución fuese un componente relevante en la actualización, debería producirse una mejora con la edad en la eficacia con la que se sustituye la información.

Junto a lo anterior, también se pretendía determinar los posibles cambios asociados a la edad en el efecto de interferencia producido por la similitud de la información que se mantiene simultáneamente en la memoria. La idea era contrastar el efecto de facilitación que tiene la similitud con el efecto de interferencia tradicionalmente asociado a la similitud y determinar posibles cambios evolutivos.

Un efecto clásico bien establecido consiste en que la similitud de la información mantenida en la memoria afecta negativamente al recuerdo (Baddeley, 1966; Conlin, Gathercole, y Adams, 2005; Conrad, 1964; Shah y Miyake, 1996; Wickelgren, 1965). El supuesto de que la información se representa en la memoria de trabajo a través de características ha servido para explicar la interferencia en la memoria de trabajo entre ítems que pertenecen a objetos diferentes (Nairne, 1990; Neath, 2000; Oberauer y Kliegl, 2006). Por tanto, en el caso de las tareas de actualización en las que se mantienen distintos elementos simultáneamente, se predeciría que el solapamiento de ciertas características entre dos elementos que han de mantenerse simultáneamente produciría no ya facilitación sino interferencia. En investigaciones previas se ha encontrado que las personas mayores son más susceptibles que los jóvenes a la interferencia producida por la similitud de las representaciones (Pelegrina et al., 2012). En este sentido, se esperaba encontrar diferencias en la susceptibilidad a este tipo de interferencia entre los distintos grupos de edad estudiados.

SECCIÓN EXPERIMENTAL

5. ESTUDIO 1: THE DISTANCE EFFECT IN NUMERICAL MEMORY-UPDATING TASKS

Lendínez, C., Pelegrina, S., y Lechuga, M. T. (2011). The distance effect in numerical memory-updating tasks. *Memory & Cognition*, 39, 675–685. doi: 10.3758/s13421-010-0047-y

5.1. Abstract

Two experiments examined the role of numerical distance in updating numerical information in working memory. In the first experiment, participants had to memorize a new number only when it was smaller than a previously memorized number. In the second experiment, updating was based on an external signal, which removed the need to perform any numerical comparison. In both experiments, distance between the memorized number and the new one was manipulated. The results showed that smaller distances between the new and the old information led to shorter updating times. This graded facilitation suggests that the process by which information is substituted in the focus of attention involves maintaining the shared features between the new and the old number activated and selecting other new features to be activated. Thus, the updating cost may be related to amount of new features to be activated in the focus of attention.

Keywords: Working memory; Updating; Numerical distance.

5.2. Introduction

Updating is a process which allows people to replace and modify the content of working memory (WM) in order to hold new information (Morris & Jones, 1990), and it is considered a fundamental executive function in cognitive architecture (Miyake, Friedman, Emerson, Witzki, & Howerter, 2000). To investigate this process, tasks have been designed which involved simultaneously maintaining different elements in memory, some of which have to be replaced by new information. Many studies have examined the mechanisms involved in the selective access to the content of WM or in replacing outdated information (Garavan, 1998; Gehring, Bryck, Jonides, Albin, & Badre, 2003; Li et al., 2006; Kessler & Meiran, 2006, 2008; Oberauer, 2002, 2003; Oberauer, Wendland, & Kliegl, 2003; Unsworth & Engle, 2008; Voigt & Hagendorf, 2002). However, little study has been given over to the possible role played by the relationship between the information maintained in memory and the new information that replaces it. This study aims to address this question by investigating how the numerical distance between the stored and the new numerical information influences the updating process.

Updating tasks have been used to study selective access in WM since Garavan (1998) introduced the double counter task. In this task, participants had to keep two counters in memory for two different figures. Participants updated the appropriate mental count by adding one unit when the corresponding figure was presented. Garavan's main finding was that the time used to update the information was longer when there was a switch from one counter to the other; that is, when the counter to be updated was different from the counter previously updated. These results suggest that people do not have simultaneous access to all of the content of WM, but can only attend to one stimulus at a time. This effect fits the theoretical models which conceive WM as a hierarchical system of active representations in long term memory (Cowan, 1995; Oberauer, 2002). In this system, Oberauer (2002) has proposed the existence of a focus of attention in WM which maintains the representation which a person is aware of at a given moment and on which the next cognitive operation is performed. Along the same lines, Oberauer found greater switching costs when the number of elements in WM increased (see also Oberauer, 2003; Oberauer et al., 2003; Voigt & Hagendorf, 2002). This indicates the greater difficulty in selecting one item to be focused from different candidates when the number of candidates increases. According to Oberauer's (2002) model, these different elements are thought to be activated in the direct access region,

which means that they are available and ready for selective access and processing in the focus of attention.

In previous studies updating and selective access were not dissociated, since in all the trials it was necessary to update information. Subsequent efforts have been made to differentiate the costs associated with selective access to contents and those associated with the actual updating of the information. Oberauer (2003) studied separately the processes of updating and selective access to working memory contents in order to determine their possible roles in the switching effect. His results showed that switching cost was present when the contents of WM had to be accessed but not updated, and also when updating was required but no retrieval of previous information was needed. Therefore, these experiments revealed that both selective access and updating influence the switching effect.

To further dissociate these processes, Kessler and Meiran (2006) manipulated simultaneously updating and object switching in a numerical task. Their results confirmed that even in non-updating trials there was an appreciable switching effect. In addition, the authors found an interesting result when they compared two conditions which did not require a switch of object: in one condition there was only one updateable element (simple lists); in the other condition there were two updateable objects (mixed lists), although only one of them was updated. The updating cost was higher when there were two updatable elements (mixed lists) than when there was only one updatable element (simple lists), even when in neither case object switching was required and only one object was updated in each trial. Based on this result, the authors considered that there is a global updating mechanism which acts on all the elements stored in WM, even though only one of them may be updated. This mechanism would give stability to the representations of the different objects held in WM.

In addition to global updating, Kessler and Meiran (2008) proposed a local updating mechanism that modifies only some elements in WM. They showed that the time required for updating was related to the number of items that had to be substituted. This selective updating would provide flexibility to WM, allowing modification of the information. It could be argued that selective updating occurs not only at the level of the different elements stored in WM, but also at the level of a representation associated to a single element or object in WM. Thus, updating could be affected by the relationship between the representation of an element in WM and the new representation. The more similar the new representation is to that previously stored, the faster the updating should be. This is the hypothesis which we aim to explore in this study.

The relationship between stored and new numerical information

Updating studies mentioned above have mostly used numerical information, and in fact new information is generally obtained after performing an operation based on stored information. New and stored information may be related to a greater or lesser extent through the operations carried out. For example, the easiest arithmetical operations give results which are closer to the previously stored information than do more difficult operations. It is possible that the proximity of the numbers involved in the updating may influence the time needed to carry out the updating.

Numerical distance has been found to be related to different effects in studies dealing with numerical cognition. It has been shown that the latency in naming a one-digit number is lower when a close prime is presented than when the prime is more distant (Brysbaert, 1995; Den Heyer & Briand, 1986; Koechlin, Naccache, Block, & Dehaene, 1999; Reynvoet, Brysbaert, & Fias, 2002). Distance is also involved in the split effect which is found in verification tasks of simple mental calculation. In these tasks, a simple arithmetical operation is presented (e.g., $4+2$), along with a number which may (e.g., 6) or may not (e.g., 7) be the correct solution. Results show that the response times for incorrect solutions are greater, and the accuracy is lower when the incorrect answers presented are close to the correct solution (e.g., 7) rather than more distant (e.g., 9) (Ashcraft & Battaglia, 1978; Ashcraft & Stazyk, 1981; Stazyk, Ashcraft, & Hamann, 1982; Zbrodoff & Logan, 1990). Similarly, in Stroop numerical tasks the degree of interference is inversely related to the numerical distance between the irrelevant digits and the number of items shown on screen (Pavese & Umiltà, 1998, 1999). In memory tasks as well the distance between the information stored in memory and that presented may also influence performance. Using the Sternberg recognition task, Morin, DeRosa and Stultz (1967) showed that the response times to negative probes decreased according to the distance of the negative probe from the member of positive set nearest in size. All the results described above may be due to the fact that numbers are represented as an ordered continuum, and that the activation of a number spreads along this continuum, affecting the other numbers which are used later in the task. Therefore, numerical distance may also influence updating based on numerical operations, since the number maintained in memory and the new one may be more or less distant.

From the results described, a possible hypothesis is that updating could be easier if the number presented is closer to the number stored in memory. This assumption can also be made from proposals which consider that the information in WM is represented as sets of features (Nairne, 1990; Oberauer & Kliegl, 2001, 2006). From this perspective, two items which

are stored in WM can overlap as long as their representations share certain features. It has been found that when two items have to be maintained simultaneously in WM, their representational overlap produces interference (Oberauer & Lange, 2008). This interference is the result of the competition between both representations for common features and of the subsequent degradation of the representation which loses these features. Nevertheless, in the case of updating, when one item replaces another, there should be a facilitation effect related to the number of shared features. In this case, the features which are common to both representations would remain active, whereas the new features which change with respect to the information stored in memory should be selectively activated and bound to the rest of features. Therefore, the higher the number of new features to be activated the greater the updating cost.

In a previous experiment (Lendínez, Pelegrina, & Lechuga, 2007) we used Kessler and Meiran's (2006) task in which new information to be memorized was obtained after an arithmetical operation was carried out on a value stored in memory. Participants had to maintain a digit number (e.g., 4) in memory, then an arithmetical operation (e.g., +1 or +2) indicated that the original number had to be replaced with the result of applying the operation (i.e., 5 or 6). Our results showed that numerical operations affected the time needed to update information. In the example shown, more time was spent with the operation +2 than with +1. This could indicate that in this task, more difficult operations increase the updating cost. However, although the operation +2 is more difficult than +1 (Aschraft, 1992), it should also be considered that these operations produce results which are more or less distant from the original (6 is further than 5 from 4). That is, it is possible that the results may be due to the numerical distance between the two numbers involved in the updating.

Present study

In the present study we aim to further investigate to what extent numerical distance between information stored in memory and newly presented information influence updating. To do this, the possible effect of numerical distance and the difficulty of the operations should be disentangled. To this end, in the first experiment we designed a task in which the difficulty of the operations was inversely related to numerical distance. Specifically, we used a numerical comparison as the basis for updating. Studies of mental arithmetic show that response times in numerical comparisons are faster as the distance between numerical values increases (Dehaene, Dupoux, & Mehler, 1990; Moyer & Landauer, 1967). Hence, in numerical comparisons difficulty and distance are inversely related because the most difficult operations involve the shorter distances. Therefore, if difficulty were to influence updating times, these

times should be higher when the distance is small. In contrast, if it is the similarity of the information which were to influence performance, then the updating times should be lower for closer numbers. The second experiment was designed to better exclude a possible role of the operations that are usually presented in numerical updating studies. In this experiment participants do not have to carry out any numerical operations; they simply have to memorize numbers which are more or less related to the information stored in memory. Therefore numerical distance was not associated to any numerical operation, and its possible effect would be due to the representational similarity.

5.3. First experiment

In the first experiment we used an updating task based on Carretti, Cornoldi, and Pelegrina (2007), in which the participants had to memorize the smaller number which appeared in each of two shapes. Here, the criterion for updating or not updating depends on a numerical comparison between the number maintained in memory and the number presented. Therefore, both updating conditions involve similar numerical comparisons, but differ in the need to replace information stored in memory with new information. The use of the same operations in the two updating conditions enables us to manipulate the distance in both.

If numerical distance were to influence performance through the similarity between the numerical representations stored in memory and that presented, the time needed should be lower with closer numbers, since they share more features. In addition, if representational similarity were to have a specific effect on updating, this effect should be more evident in the condition in which information must be substituted than in the non-updating condition. However, if distance were to affect performance through the difficulty of the comparison, more time should be spent in comparisons between closer numbers, and this effect should be equivalent in both updating conditions, as analogous comparisons are performed in both conditions.

This experiment follows the procedure used by Kessler and Meiran (2006) in which two types of lists are included: mixed and simple. In mixed lists two active elements which may be updated are stored in WM, so that the participant has to switch from one element to another throughout the list. In simple lists there is only one element which may be updated. The inclusion of these single lists in which all the cognitive operations are performed on the same element allows us to observe the possible distance effect without the influence of other effects involved in the switching or maintenance of various active elements in memory. In

addition, this condition is more similar to numerical tasks in which the participant has to compare a number on the screen with another number stored in memory (e.g., Dehaene et al., 1990).

Method

Participants

The participants were 24 psychology students (23 women) between the ages of 18 and 22 ($M = 18.92$; $SD = 1.50$). In all the experiments, they received course credits for their participations.

Materials

The task was made up of 90 lists of 12 items. Each item consisted of a shape (rectangle or triangle) in the centre of which was a number between 11 and 99. The first item was always a rectangle and the second a triangle. There were two types of lists; 30 simple and 60 mixed. In the simple lists, all the items following the initial ones had the same shape: either a rectangle or a triangle. Half the lists had a rectangle, while the other half had a triangle. The mixed lists contained items with both shapes (see Figure 1). In each experimental session the lists were organized in three blocks. The first and the third block had 15 simple lists each. The second block was made up of 60 mixed lists.

The items in each of the lists could be different types according to the switching and updating conditions. In the non-switching condition, the shape associated with an item was always the same as for the previous item, while in the switching condition the shape was different. In the simple lists all the items were nonswitch, whereas in the mixed lists half the items were of each type. In the updating condition each number was lower than the previous smallest number associated to the same shape. In the non-updating condition the number was larger than the previous smallest number.

In addition, the distance between the two numbers associated to the same shape was manipulated. Therefore, in each of the updating conditions, the distance could be large when the two numbers differed by 5 or 6 units, or small if the numbers differed by 1 or 2 units. Each of the lists had approximately the same number of items with large and small distance.

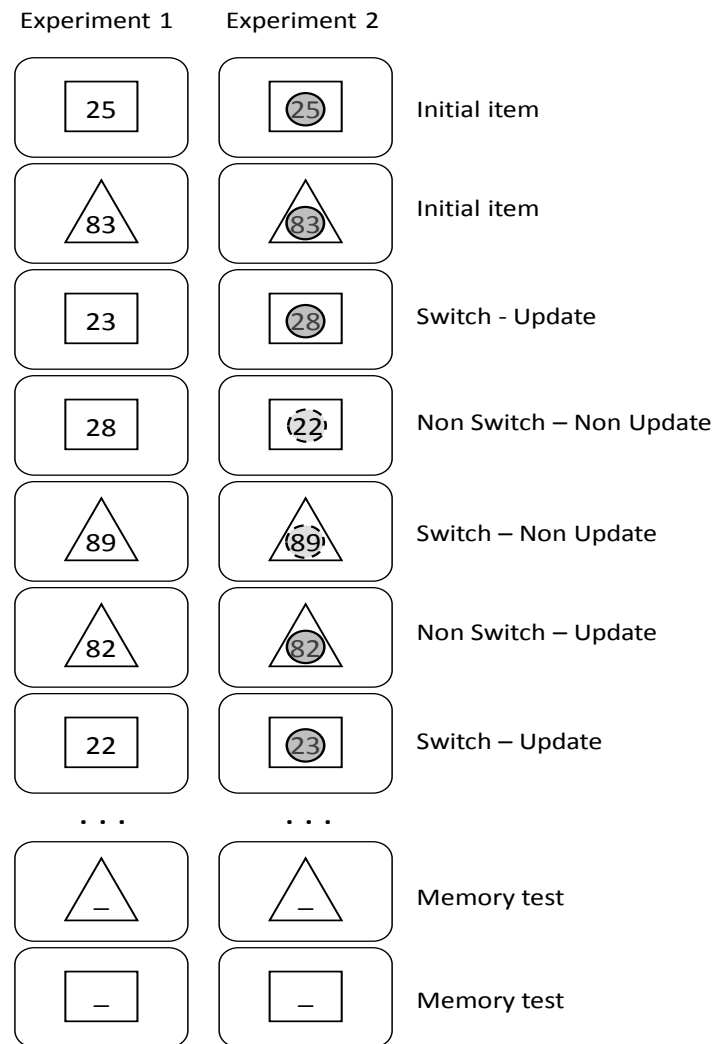


Figure 1. Schematic representation of a mixed list in Experiments 1 and 2. Initially, two items were presented with the initial values for each shape. Then a sequence of items was presented. In the first experiment (left) the participant had to compare the number presented inside the shape with the number maintained for the same shape in order to memorize the smallest number. In the second experiment (right), the participant had to memorize the number inside the shape according to the cue that masked the number. When the cue was green (represented as a circle with solid line) the number had to be memorized. With red cues (represented as a circle with broken line) the number did not have to be memorized. At the end of the list, participants had to type the final value associated with each shape.

Procedure

Each list began with the consecutive presentation of the two initial items, first a rectangle and then a triangle, both with a number in the centre. Once the participants had memorized the initial values associated to each shape they had to press a key. The rest of the items were then shown in sequence. For each one, the participants had to memorize the number when it was lower than that memorized for the presented shape, and then press a key. When participants pressed a key, a blank screen was shown for 250 ms followed by the next item (see Figure 1).

At the end of the list, each of the shapes was shown successively with an indicator (" _ ") which indicated to the participants that they should type the smallest number associated with that shape. As with the initial items, the rectangle was always shown first. After the results were recorded, the participant was informed of the number of correct answers. The latency between the moment each item was displayed and the moment the participant pressed a key was recorded. The presentation of the stimuli as well as the registration of latencies and responses were controlled using the program *E-prime* (Schneider, Eschman, & Zuccolotto, 2002).

The instructions indicated to the participants that they should perform the comparison and memorize the result as quickly as possible, while trying to be accurate. Before the experimental session, the participants performed eight practice trials with both types of lists, so that they were familiar with the procedure.

Results

The participants completed correctly 80.07% of the mixed lists and 85.97% of the simple lists. Response times from practice lists and from the incorrectly reported lists were excluded from analyses. Response times lower than 200 ms and those exceeding the participant's mean in each condition by more than 3.5 standard deviations were also removed from data analysis (1.22%).

A repeated measures ANOVA 3 (type of object switch) x 2 (updating) x 2 (distance) showed the main effects of type of object switch, $F(2, 46) = 231.41$, $p < .001$, $\eta^2 = .910$, updating, $F(1, 23) = 61.35$, $p < .001$, $\eta^2 = .727$, and distance, $F(1, 23) = 75.41$, $p < .001$, $\eta^2 = .766$. Moreover, the distance effect was qualified by a significant interaction with updating, $F(1, 23) = 160.68$, $p < .001$, $\eta^2 = .875$. Furthermore, there were significant interactions between type of object switch and updating, $F(2, 46) = 5.88$, $p < .005$, $\eta^2 = .204$, type of object switch and distance, $F(2, 46) = 18.78$, $p < .001$, $\eta^2 = .450$, and the third order interaction: type of object

switch x updating x distance, $F(2, 46) = 3.64$, $p < .05$, $\eta^2 = .137$. The results are shown in Figure 2.

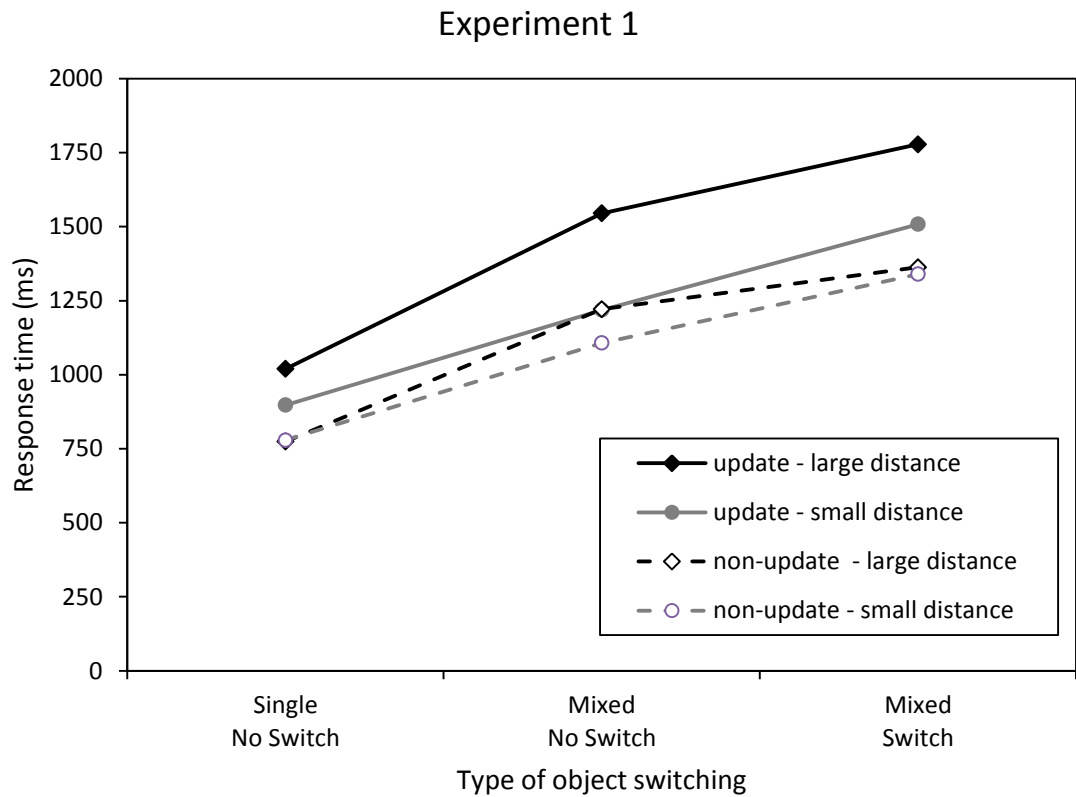


Figure 2. Response time as a function of type of object switching, updating and distance in Experiment 1.

The three way interaction was further specified with a separate two-way ANOVA 3 (type of object switch) x 2 (distance) for each condition of updating. The separate analysis for the updating trials showed that the main effects of type of object switch, $F(2, 46) = 161.73$, $p < .001$, $\eta^2 = .875$, and distance, $F(1, 23) = 143.41$, $p < .001$, $\eta^2 = .862$, as well the interaction, $F(2, 46) = 13.99$, $p < .001$, $\eta^2 = .378$, were significant. This interaction pointed to a differential effect of distance on each level of type of object switch. The difference between large and small distance was 122 ms in single lists, $F(1, 23) = 40.72$, $p < .001$, $\eta^2 = .639$; in non-switching condition in mixed lists was 326 ms, $F(1, 23) = 154.93$, $p < .001$, $\eta^2 = .871$; and in switching condition in mixed lists was 270 ms, $F(1, 23) = 41.83$, $p < .001$, $\eta^2 = .645$. The interaction was due to the fact that the distance effect in non-switching trials from mixed lists was higher than in non-switching trials from single lists, $F(1, 23) = 41.68$, $p < .001$, $\eta^2 = .644$.

The analogous analysis for the non-updating trials revealed the significant effects of type of object switch, $F(2, 46) = 208.79$, $p < .001$, $\eta^2 = .901$, and distance, $F(1, 23) = 7.74$, $p < .05$, $\eta^2 = .252$, as well as their interaction, $F(2, 46) = 9.09$, $p < .001$, $\eta^2 = .283$. Again this interaction indicated that there was a differential effect of distance on each level of type of object switch. Specifically, the difference between large and small distance was only significant for the non-switching condition in mixed lists (114 ms), $F(1, 23) = 15.85$, $p < .005$, $\eta^2 = .408$ (see Figure 2).

The inclusion of mixed and single lists allows for the analysis of two aspects inherent in these updating tasks. The first is the switching cost: the time necessary to carry out a cognitive operation increases when there is object switching in WM, compared to when the operation is carried consecutively on the same object. The second is the mixing cost: the response time increases with the number of active elements in WM, even when the number of updated elements remains constant. Previous analyses have indicated that the distance effect varied according to type of switch object. This could have an impact in switching and mixing costs. Additional analyses showed that the switching cost in updating trials in the large distance condition was 233 ms, whereas in the small distance condition it was 289 ms; although, these switching costs were not different statistically ($p > .2$). In non-updating trials, the switching cost was lower for the large (141 ms) than for the small distance condition (232 ms) since the interaction was significant, $F(1, 23) = 9.92$, $p < .005$, $\eta^2 = .301$. Regarding the mixing effect, in the updating trials and small distance condition the mixing cost was lower (321 ms) than in the large distance condition (526 ms), as indicated by the interaction, $F(1, 23) = 41.68$, $p < .001$, $\eta^2 = .644$. Also, in non-updating trials the mixing cost in the small distance condition was lower (329 ms) than in the large distance condition (447 ms), $F(1, 23) = 15.76$, $p < .005$, $\eta^2 = .407$. In sum, the mixing cost was higher in large distance trials than in small distance, whereas switching cost was greater in small distance than in large distance condition for the non-updating trials. The next experiment will give us the opportunity to replicate these results.

Discussion

The most important results are those related to the distance effect and its differential impact in both updating conditions. First, it has been shown that a smaller distance between the number stored in memory and the number presented implies a smaller time cost than when the distance is greater. This effect can be seen both in mixed lists and in simple lists. Simple lists represent a condition which is more similar to numerical comparison tasks in which a number (e.g., 55) stored in memory has to be compared with another presented number. These results cannot be explained by the difficulty effect observed in studies on numerical

comparisons, as in this case the comparisons with closer numbers produce longer response times. (e.g., Dehaene et al., 1990; Moyer & Landauer, 1967). Therefore, the manipulation of distance may reflect similarity-based facilitation.

Second, it has been found that distance affects the two updating conditions differently. In the updating trials, there was a clear distance effect, whereas in the non-updating trials, distance either had no influence (switch items in mixed lists and items in simple lists), or its effect was much less pronounced (non-switching items in mixed lists). This confirms that the distance effect is not solely due to the numerical comparisons performed, as if this were the case, this manipulation should have produced an opposite effect, and also should have been equally effective in both updating conditions in which similar comparisons had to be made. Furthermore, the consistent effect of distance in updating trials compared with non-updating trials suggests that this manipulation influences the storage of new information for future use.

5.4. Second experiment

The aim of the second experiment was to determine whether the distance between numbers affects the speed with which the updating is performed, even when the task does not require any numerical operation, and therefore does not have any associated difficulty. If the distance effect is obtained when no operation is necessary, this effect may be explained in terms of representational similarity.

To better rule out the possible effect of the numerical operations, a task was designed in which an external cue indicated whether or not update the information. The task is similar to other updating tasks such as the Keeping-Track task (Yntema & Mueser, 1962) or that used by Oberauer (2003, Exp. 2). The use of external cues avoids the need to access information stored in memory in order to decide when information has to be updated. Also, in this experiment the numbers to be stored are not necessarily the lowest, as they may also be higher than the number stored in memory

Method

Participants

The participants were 22 psychology students (19 women) between the ages of 18 and 28 ($M = 20.68$; $SD = 2.51$). None of them had participated in the previous experiment.

Materials

The task contained 36 simple lists and 72 mixed lists which were presented in three blocks: 18 simple, 72 mixed, and 18 simple. The lists were of different lengths to prevent participants from predicting the end of the list and therefore which item had to be recalled. As well as the two initial items, a third of the lists had four items, a third six items, and the remaining third had eight items. Each of the items was a shape (rectangle or triangle) with a number in the centre between 11 and 99. The type of object switch, and distance were manipulated as in the previous experiment. In this experiment, updating was also manipulated. However, in contrast to the previous experiment, the number to be updated could be lower or higher than the previous number associated to the same shape, as the updating was indicated by a signal.

Procedure

The procedure was similar to that of the previous experiment with some modifications because the participants did not have to perform comparisons. Each item was shown for 500 ms, during which the participant could read the number. Then a signal was superimposed on the number, which indicated whether or not this number should be recalled. The signal was a circle approximately 1 cm in diameter which covered the number completely, so it was impossible to read the number after its onset. If the number was to be updated, the circle was green, and for numbers which had to be disregarded immediately (non-updating), the circle was red (see Figure 1). The signal remained on the screen until the participant pressed a key. Then a blank screen was shown for 250 ms followed by the next item. The time elapsed between the presentation of the signal and the pressing of the key was recorded. In other respects the procedure was the same as in the previous experiment.

Results

The participants completed correctly 86.55% of the mixed lists and 87.50% of the simple lists. Response times from practice lists and from the incorrectly reported lists were excluded from analyses. Also, response times exceeding the participant's mean in each condition by more than 3.5 standard deviations or shorter than 200 ms were excluded from data analysis (2.46%).

The ANOVA 3 (type of object switch) x 2 (updating) x 2 (distance) yielded main effects for all factors: type of object switch, $F(2, 42) = 30.29$, $p < .001$, $\eta^2 = .591$, updating, $F(1, 21) = 107.52$, $p < .001$, $\eta^2 = .837$ and distance, $F(1, 21) = 46.44$, $p < .001$, $\eta^2 = .689$. Two way

interactions were found between type of object switch and updating, $F(2, 42) = 42.72$, $p < .001$, $\eta^2 = .670$, type of object switch and distance, $F(2, 42) = 6.08$, $p < .01$, $\eta^2 = .225$, and updating and distance, $F(1, 21) = 40.31$, $p < .001$, $\eta^2 = .657$. Also the three way interaction was significant, $F(2, 42) = 8.23$, $p < .005$, $\eta^2 = .282$. It is important to note that as in the previous experiment, but here without numerical operations, larger distance implied longer times (766 ms) than smaller distance (699 ms). Another result which is replicated is that the difference between large and small distance was greater in updating trials (123 ms) than in non-updating (11 ms). The results are shown in Figure 3.

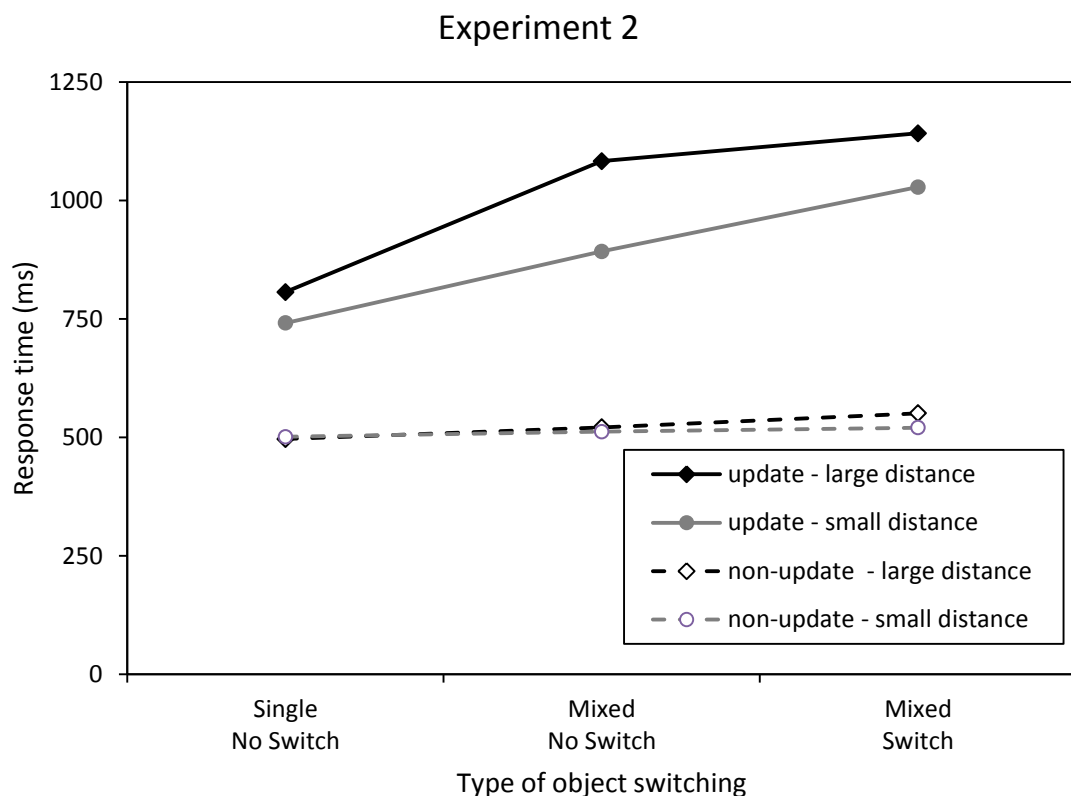


Figure 3. Response time as a function of type of object switching, updating and distance in Experiment 2.

The three way interaction was further examined by carrying out a separate two-way ANOVA 3 (type of object switch) $\times$ 2 (distance) for each condition of updating. For the updating trials, the ANOVA revealed the main effect for type of object switch, $F(2, 42) = 41.90$, $p < .001$, $\eta^2 = .666$, and distance, $F(1, 21) = 45.39$, $p < .001$, $\eta^2 = .684$, as well as their interaction, $F(2, 42) = 7.09$, $p < .005$, $\eta^2 = .253$. Subsequent analysis showed that the distance effect was significant in each condition of type of object switch. Specifically, the difference between the small and the large distance in switching condition in mixing lists was 113 ms, $F(1, 21) = 21.16$, $p < .001$, $\eta^2 = .502$; in non-switching condition in mixed lists that difference was 191 ms, $F(1, 21) = 34.45$,

$p < .001$, $\eta^2 = .621$; and in non-switching condition in single lists was 65 ms, $F(1, 21) = 9.07$, $p < .01$, $\eta^2 = .302$. The interaction was due to a greater distance effect in non-switching trials from mixed lists than that found both in switching trials from mixed lists, $F(1, 21) = 4.59$, $p < .05$, $\eta^2 = .180$, and in single lists, $F(1, 21) = 16.11$, $p < .005$, $\eta^2 = .434$.

For the non-updating trials, the ANOVA showed a main effect of distance, $F(1, 21) = 8.57$, $p < .01$, $\eta^2 = .290$, and the interaction between type of object switch and distance, $F(2, 42) = 4.76$, $p < .05$, $\eta^2 = .185$. The analysis of distance in each condition of object switching indicated that this effect was only significant in the switching condition from mixed lists, $F(1, 21) = 12.85$, $p < .005$, $\eta^2 = .380$. In this condition the difference between large and small distance was 30 ms.

As in the previous experiment, distance influenced the switching and mixing effects. In updating trials, the switching cost was lower in the large distance condition (59 ms), than in the small distance condition (136 ms), as indicated by the interaction between switching and distance, $F(1,21) = 4.59$, $p < 0.05$, $\eta^2 = .180$. In non-updating trials the switching cost was markedly reduced (19 ms), although it did not disappear completely, $F(1,21) = 7.95$, $p < .05$, $\eta^2 = .275$. However, in these trials the interaction with distance was not significant ($p > .09$). Regarding the mixing effect, in the updating trials, it was found that mixing cost increased with distance. In the small distance condition it was 151 ms, $F(1,21) = 19.26$, $p < .001$, $\eta^2 = .478$, while in the large distance condition it was 277 ms, $F(1,21) = 31.46$, $p < .001$, $\eta^2 = .600$. In non-updating trials neither the mixing and distance effects nor their interaction were significant ($p > .2$).

Discussion

The results again show a distance effect even when no numerical comparison is involved. As in the previous experiment, there was a clear distance effect when new information had to be updated, suggesting that it is related to the storage of new information. In contrast in non-updating trials, the distance effect was only found in switching trials and was much less marked. This could indicate a not entirely consistent priming effect through which the representations stored in memory make it easier to process the number presented.

Another interesting result is the switching effect obtained in updating trials even though, in this task, it is not necessary to retrieve the content of the object stored in memory. This confirms that in order to update information the participants need to access the object in memory even when they do not need to recall the information (Oberauer, 2003; Voigt & Hagendorf, 2002). This access may be necessary to bind the new information to the

appropriate object in WM. On the other hand, in non-updating trials the switching effect was much reduced. This contrasts with the switching effect obtained in the analogous condition in Experiment 1. In that experiment, access to the content of the object stored in memory was a necessary step in both updating conditions in order to decide whether or not the number should be updated. However, in the second experiment, with external cues, participants may simply interpret the non-updating signal as an instruction to press a key to present the following item. The absence of mixing cost in non-updating trials also supports the idea of disrupted access.

5.5. General Discussion

This study aimed to investigate whether the relationship between the information stored in memory and the new information presented has an effect on updating. Over two experiments we have analyzed the effect of numerical distance on updating. In the first experiment the updating was based on the result of a numerical comparison whereas in the second on an external signal, which removed the need to perform any numerical operation. In both cases we found that updating times were faster when the distance between the number stored in memory and the number replacing it was smaller than when this distance was large.

The first experiment showed that this effect did not depend on the difficulty of the numerical operation to be performed. In numerical comparisons the larger distance is associated with easier numerical comparisons (Moyer & Landauer, 1967). Therefore, if the distance effect were affected by the difficulty of the comparisons there should have been the opposite result. However, it was the larger distance which implied greater cost. The second experiment showed that the distance effect remained even when the task required no numerical operations, but only to memorize the number shown with the corresponding signal. These results support the idea that the distance effect is not due so much to the processing difficulty, but rather to the relationship between the information stored in memory and the information presented.

Another main result is that the distance effect is modulated by updating. In the updating condition the distance effect is consistently present, whereas in the non-updating condition the effect is less evident, and in some conditions is not even clearly present. The slight facilitation effect in the non-updating trials may occur in the identification stage of the numbers presented, whereas the greater effect in the updating trials would also involve the storage of the new information. Prior information in memory may pre-activate to a greater or lesser extent the new information to be presented regardless if an updating is requested. Thus,

the facilitation effect in non-updating trials would be similar to that obtained in other numerical tasks which did not involve memorizing new information, such as priming tasks (Brysbaert, 1995; Den Heyer & Briand, 1986; Koechlin, et al., 1999; Naccache & Dehaene, 2001; Reynvoet & Brysbaert, 1999, 2004; Reynvoet, et al., 2002) and even recognition tasks in short term memory (Morin, et al., 1967). We can assume that these effects are due to the overlapping of the representations of the numbers involved. Other authors have found a facilitation effect which is associated not to the number, but to the physical appearance of the stimuli used to identify the object (the shape) to be updated (Gehring et al., 2003; Li et al., 2006).

The previous priming effect may influence both updating and non-updating trials. However, in updating trials the distance effect cannot be due merely to factors such as the facilitation in the identification of the numbers, as in that case the effect would be similar to that observed in non-updating trials. In addition, it is noteworthy that this effect is found irrespective of whether the person has to use the content of memorized information in order to perform an operation (Experiment 1) or whether this is not necessary (Experiment 2). This suggests that an additional mechanism is involved, which is related specifically to how information is updated.

We propose that such a mechanism may operate on information represented in WM in terms of features, enabling these features to be updated selectively. In the context of WM, some authors consider that information in WM is represented by sets of features which are activated at the same time (Nairne, 1988, 1990; Neath, 2000; Oberauer & Kliegl, 2001, 2006). Given that the sets of features of two items overlap to various extents, the more similar the items, the greater the degree of overlap. When it is necessary to update a number which shares many features with that stored in memory, the process can be performed more quickly, as fewer features of the second number need to be activated, because all shared features are already activated. The idea of a selective process of updating is in line with the results obtained by Kessler and Meiran (2008) (see also, Vockenberg, 2006 with other material), showing that updating cost increased along with the number of new items to be memorized. It is noteworthy that in our case, there was only one item to be updated in each trial. However, this item could be more or less similar to the information previously stored in memory. Therefore, we can assume that selective updating here acts not so much on various elements stored independently in WM, but rather on a subset of features of the representation associated to a single element. A selective process of updating of features may be also present in visual short-term memory. Ko and Seiffert (2009) found that updating affects exclusively the

visual features which have to be replaced. Specifically, they showed that after updating there was facilitation for recognition of the updated features, but not for the rest of the features of the object.

In addition, certain results suggest that updating an element in memory may be affected by other content stored simultaneously in the WM. In both experiments we have found that the distance effect is higher in the non-switching condition in mixed lists. It is possible to suppose that the more marked effect in this condition may be due to the fact that the quantity of information which is active may be more than in the other conditions. This non-switching condition differs from the non-switching condition in simple lists in that an additional item needs to be stored (that associated with the other object). In addition, in this condition more information associated with an object may be active at the same time than in the switching condition in mixed lists. When two consecutive items associated with the same object are presented, some irrelevant information related to the first of the two items (i.e., the number previously substituted) may maintain a certain degree of residual activation when the second item is shown. Oberauer (2001, 2005) concluded that more than one second is necessary to eliminate information which has been active in the direct access area of WM. Therefore, this additional load in the non-switching condition in mixed lists may interfere with the new information, and this may happen to a greater extent when the new and stored information is more different. This effect could therefore be considered as a case of proactive interference between the contents of WM, in which outdated information which is still active in WM interferes with new information. This interference would take place over a short time window: the time during which the features which are no longer relevant retain some residual activation.

Implications for WM

The results obtained have implications for understanding how the information elements stored at various levels of WM interact among themselves and with the new information presented during the task. The similarity-based facilitation obtained is a consequence of the representational overlap between the information which has been activated in the focus of attention and that associated with new presented stimulus. This proactive and graded facilitation indicates that what is substituted in the focus of attention is not a whole representation (i.e., of the new number), but the new features that are not present in the old representation. Thus when an item is substituted by another, the shared

features will remain in a state of activation while a subset of new features will be activated. Then the set of features which are finally activated has to be bound together and also to the context in order to form a unitary representation of the object differentiated from other objects stored at other levels (i.e. the direct access region). This mechanism could be generalized beyond updating tasks and numerical information such as those analyzed in this study. Indeed, it could be applied to situations which involve merely the storage of new information in the focus of attention (cf. Jonides et al., 2008, p. 203). In general, this situation would represent a very low similarity condition in which the majority of the features to be activated would be new.

Our results indicate that the overlap between the information held in the focus and the new information leads to facilitation in response time. In contrast, the representational overlap between the information stored simultaneously in the direct access region has a detrimental effect on recall accuracy. This overlap may be present between the material in a processing task (distracter) and that which has to be stored in WM (Lange & Oberauer, 2005; Oberauer & Lange, 2008, Exp. 1; Oberauer, 2009) or it may be found among the different items to be remembered in a list (Oberauer, 2009, Exp 2). Consistent with this idea, our findings also suggest that it is more difficult to activate the appropriate features in the focus of attention in the presence of other sets of different activated features. This may reflect a competition between the representations active in the focus of attention and other representations for shared features. These other representations may come from the direct access region (e.g., other numbers maintained) or from outdated information with a certain level of residual activation.

In summary, our results indicate that updating in WM occur faster when the numerical information to be updated is closer to that stored in memory, probably owing to a representational effect of shared features. A future objective will be to determine the nature of the features which play a role in the distance effects and to quantify their effect in relation to updating. The information in WM which is associated with an item is stored in the form of multiple traces, containing features which are semantic, visual, orthographic, phonological, articulatory, etc. The distance effect may be due to the activation of features of different types, such as semantic or phonological.

Acknowledgments

The research reported here was supported by a grant from the Spanish Ministry of Science and Technology to Santiago Pelegrina (PSI2009-11344) and a grant from the Spanish Ministry of Science and Innovation (CSD2008-00048) in the CONSOLIDER-INGENIO 2010 programme.

Experiments reported in the paper were part of the Doctoral Thesis by the first author.

We thank Pedro Macizo and Barbara Carretti for their very helpful comments to earlier versions of this manuscript.

5.6. References

- Ashcraft, M. H. (1992). Cognitive arithmetic: A review of data and theory. *Cognition*, 44, 75-106. doi:10.1016/0010-0277(92)90051-I
- Ashcraft, M. H., & Battaglia, J. (1978). Cognitive arithmetic: Evidence for retrieval and decision processes in mental addition. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 4, 527-538. doi:10.1037/0278-7393.4.5.527
- Ashcraft, M. H., & Stazyk, E. H. (1981). Mental addition: A test of three verification models. *Memory & Cognition*, 9, 185-196.
- Brysbaert, M. (1995). Arabic number reading: On the nature of the numerical scale and the origin of phonological recoding. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124, 434-452. doi:10.1037/0096-3445.124.4.434
- Carretti, B., Cornoldi, C., & Pelegrina, S. (2007). Which factors influence number updating in working memory? The effects of size distance and suppression. *British Journal of Psychology*, 98, 45-60. doi:10.1348/000712606X104175
- Cowan, N. (1995). *Attention and Memory. An integrated framework*. New York, NY: Oxford University Press.
- Dehaene, S., Dupoux, E., & Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 626-641. doi:10.1037/0096-1523.16.3.626

- Den Heyer, K., & Briand, K. (1986). Priming single digit numbers: Automatic spreading activation dissipates as a function of semantic distance. *American Journal of Psychology*, 99, 315-340.
- Garavan, H. (1998). Serial attention within working memory. *Memory & Cognition*, 26, 263-276.
- Gehring, W. J., Bryck, R. L., Jonides, J., Albin, R. L., & Badre, D. (2003). The mind's eye, looking inward? In search of executive control in internal attention shifting. *Psychophysiology*, 40, 572-585. doi:10.1111/1469-8986.00059
- Jonides, J., Lewis, R. L., Nee, D. E., Lustig, C. A., Berman, M. G., & Moore, K.S. (2008). The mind and brain of short-term memory. *Annual Review of Psychology*, 59, 193-224. doi:10.1146/annurev.psych.59.103006.093615
- Kessler, Y., & Meiran, N. (2006). All updateable objects in working memory are updated whenever any of them are modified: Evidence from the memory updating paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 32, 570- 585. doi:10.1037/0278-7393.32.3.570
- Kessler, Y., & Meiran, N. (2008). Two dissociable updating processes in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34, 1339-1348. doi:10.1037/a0013078
- Ko, P. C., & Seiffert A. E. (2009). Updating objects in visual short-term memory is feature selective. *Memory & Cognition*, 37, 909-923. doi:10.3758/MC.37.6.909
- Koechlin, E., Naccache, L., Block, E., & Dehaene, S. (1999). Primed numbers: Exploring the modularity of numerical representations with masked and unmasked priming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1882-1905. doi:10.1037/0096-1523.25.6.1882
- Lange, E., & Oberauer, K. (2005). Overwriting of phonemic features in serial recall. *Memory*, 13, 333-339. doi:10.1080/09658210344000378
- Lendínez, C., Pelegrina, S., & Lechuga, M.T. (2007). *The role of the numerical operations involved in updating memory tasks on updating costs*. Paper presented at the XV Meeting of the European Society for Cognitive Psychology, Marseille, France.
- Li, Z. H., Bao, M., Chen, X. C., Zhang, D. R., Han, S. H., He, S., & Hu, X. P. (2006). Attention shift in human verbal working memory: Priming contribution and dynamic brain activation. *Brain Research*, 1078, 131-142. doi:10.1016/j.brainres.2006.01.032

- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., & Howerter, A. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "Frontal Lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41, 49-100. doi:10.1006/cogp.1999.0734
- Morin, R. E., DeRosa, D. V., & Stultz, V. (1967). Recognition memory and reaction time. *Acta Psychologica*, 27, 298-305.
- Morris, N., & Jones, D. M. (1990). Memory updating in working memory: the role of central executive. *British Journal of Psychology*, 81, 111-121.
- Moyer, R. S., & Landauer, T. K. (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature*, 215, 1519-1520. doi:10.1038/2151519a0
- Naccache, L., & Dehaene, S. (2001). Unconscious semantic priming extends to novel unseen stimuli. *Cognition*, 80, 223-237. doi:10.1016/S0010-0277(00)00139-6
- Nairne, J. S. (1988). A framework for interpreting recency effects in immediate serial recall. *Memory & Cognition*, 16, 343-352.
- Nairne, J. S. (1990). A feature model of immediate memory. *Memory & Cognition*, 18, 251-269.
- Neath, I. (2000). Modeling the effects of irrelevant speech on memory. *Psychonomic Bulletin and Review*, 7, 403-423.
- Oberauer, K. (2001). Removing irrelevant information from working memory: A cognitive aging study with the modified Sternberg task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 27, 948-957. doi:10.1037//0278-7393.27.4.948
- Oberauer, K. (2002). Access to information in working memory: Exploring the focus of attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28, 411-421. doi:10.1037//0278-7393.28.3.411
- Oberauer, K. (2003). Selective attention to elements in working memory. *Experimental Psychology*, 50, 257- 269. doi:10.1027//1618-3169.50.4.257
- Oberauer, K. (2005). Binding and inhibition in working memory: Individual and age differences in short-term recognition. *Journal of Experimental Psychology*, 134, 368-387. doi:10.1037/0096-3445.134.3.368
- Oberauer, K. (2009) Interference between storage and processing in working memory: Feature overwriting, not similarity-based competition. *Memory & Cognition*, 37, 346-357. doi:10.3758/MC.37.3.346

- Oberauer, K., & Kliegl, R. (2001). Beyond resources: Formal models of complexity effects and age differences in working memory. *European Journal of Cognitive Psychology*, 13, 187-215. doi:10.1080/09541440042000278
- Oberauer, K., & Kliegl, R. (2006). A formal model of capacity limits in working memory. *Journal of Memory and Language*, 55, 601-626. doi:10.1016/j.jml.2006.08.009
- Oberauer, K., & Lange, E. B. (2008). Interference in verbal working memory: Distinguishing similarity-based confusion, feature overwriting, and feature migration. *Journal of Memory and Language*, 58, 730-745. doi:10.1016/j.jml.2007.09.006
- Oberauer, K., Wendland, M., & Kliegl, R. (2003). Age differences in working memory. The roles of storage and selective access. *Memory & Cognition*, 31, 563-569.
- Pavese, A., & Umiltà, C. (1998). Symbolic distance between numerosity and identity modulates stroop interference. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24, 1535-1545. doi:10.1037/0096-1523.24.5.1535
- Pavese, A., & Umiltà, C. (1999). Further evidence on the effect of symbolic distance on stroop-like interference. *Psychological Research*, 62, 62-71. doi:10.1007/s004260050040
- Reynvoet, B., & Brysbaert, M. (1999). Single-digit and two digit Arabic numerals address the same semantic number line. *Cognition*, 72, 191-201. doi:10.1016/S0010-0277(99)00048-7
- Reynvoet, B., & Brysbaert, M. (2004). Cross-notation number priming investigated at different stimulus onset asynchronies in parity and naming tasks. *Experimental Psychology*, 51, 81-90. doi:10.1027/1618-3169.51.2.81
- Reynvoet, B., Brysbaert, M., & Fias, W. (2002). Semantic priming in number naming. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55A, 1127-1139. doi:10.1080/02724980244000116
- Schneider, W., Eschman, A., & Zuccolotto, A. (2002). *E-Prime users's guide*. Pittsburgh, PA: Psychology Software Tools, Inc.
- Stazyk, E.H., Ashcraft, M. H., & Hamann, M. S. (1982). A network approach to mental multiplication. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 8, 320-335. doi:10.1037/0278-7393.8.4.320
- Unsworth, N., & Engle, R. W. (2008). Speed and accuracy of accessing information in working memory: an individual differences investigation of focus switching. *Journal of*

Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 34, 616-630.
doi:10.1037/0278-7393.34.3.616

Vockenberg, K. (2006). *Updating of representations in working memory*. Unpublished doctoral dissertation, University of Potsdam.

Voigt, S., & Hagendorf, H. (2002). The role of task context for component processes in focus switching. *Psychologische Beiträge*, 44, 248-274.

Yntema, D. B., & Mueser, G. E. (1962). Keeping track of variables that have few or many states. *Journal of Experimental Psychology*, 63, 391-395. doi:10.1037/h0045706.

Zbrodoff, N. J., & Logan, G. D. (1990). On the relation between production and verification tasks in the psychology of simple arithmetic. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16, 83-97. doi:10.1037/0278-7393.16.1.83

6. ESTUDIO 2: THE ROLE OF SIMILARITY IN UPDATING NUMERICAL INFORMATION IN WORKING MEMORY: DECOMPOSING THE NUMERICAL DISTANCE EFFECT

Lendínez, C., Pelegrina, S., y Lechuga, M. T. (2014). The role of similarity in updating numerical information in working memory: decomposing the numerical distance effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67, 16-32. doi: 10.1080/17470218.2013.793375

6.1. Abstract

The present study investigates the process of updating representations in working memory (WM) and how similarity between the information involved influences this process. In WM updating tasks, the similarity in terms of numerical distance between the number to be substituted and the new one facilitates the updating process. We aimed to disentangle the possible effect of two dimensions of similarity which may contribute to this numerical effect: numerical distance itself and common digits shared between the numbers involved. Three experiments were conducted in which different ranges of distances and the coincidence between the digits of the two numbers involved in updating were manipulated. Results showed that the two dimensions of similarity had an effect on updating times. The greater the similarity between the information maintained in memory and the new information that substituted it, the faster the updating. This is consistent both with the idea of distributed representations based on features, and with a selective updating process based on a feature overwriting mechanism. Thus, updating in WM can be understood as a selective substitution process influenced by similarity in which only certain parts of the representation stored in memory are changed.

Keywords: Working memory; Updating similarity; Feature overwriting; Numerical distance.

6.2. Introduction

Working memory (WM) is conceived as a memory system for temporary storage and manipulation of information (Baddeley, 1986; Baddeley & Hitch, 1974). The hallmark characteristic of WM is its limited capacity, which means that its content needs to be continually updated in order to function efficiently. The updating process allows WM content to be replaced or modified in order to accommodate new information (Morris & Jones, 1990), and is considered a fundamental executive function in cognitive architecture (Miyake, Friedman, Emerson, Witzki, & Howerter, 2000).

The process involved in an updating task can be decomposed in more elemental operations. Ecker, Lewandowsky, Oberauer and Chee (2010) on the basis of a task analysis identified three subprocesses: retrieval or access, transformation, and substitution of information in WM. The manipulation of these components in the same task allowed them to conclude that the different subprocesses take place serially and that, when all components are present, they make an independent and additive contribution to the general updating performance. The substitution component involves the replacement of memory content with new information which should be available for future operations. According to Ecker et al. (2010), substitution is the specific component that differentiates updating tasks from other short term memory tasks (e.g., serial recall) in which the information to be memorized does not have to replace other previously stored information.

The process of substitution has also been divided into different components. Following Kessler and Meiran (2008), working memory updating, to be useful, must provide flexibility and stability to the content of the memory. Thus, the information must be represented in WM in a form flexible enough to allow for rapid changes of some elements, but at the same time after a substitution the resulting representation must have enough stability to overcome interference from other representations and to be useful for other processes. These conflicting goals must be accomplished through two different processes. First, Kessler and Meiran (2008) proposed a local updating process by which certain items maintained in memory are selectively replaced. In their experiments, participants had to memorize sets of items that were presented sequentially. Some of the items in each set coincided with others maintained in memory, whereas other items were new. They found that updating times were longer as the number of new items in a set increased. This suggests that during the updating some items remain unchanged, those previously memorized, and only new items are replaced. Thus by replacing only the elements that have undergone modifications the process has more

flexibility. In addition to the local updating, these authors postulated the existence of a global updating process (see also Kessler & Meiran, 2006). They assumed that the modification of some of the elements creates some instability in the global representation that must be countered. The process of global updating would involve some sort of synchronization that provides stability to the elements eventually stored in memory by generating bindings between them.

Selective updating and similarity

The selective substitution process may occur not only at the level of the different items or elements stored in WM but also at the level of the most basic units of information associated with an element in WM. For example, a visual element is made up of discrete parts such as shape, texture, color or orientation; the phonological representation of a word is constituted by more elemental parts such as syllables or phonemes; a representation of a two-digit number can be decomposed into tens, units, or even into more molecular features. Therefore, the idea of selective substitution could be applied not only to the different objects maintained in working memory but also to the features that make up each representation. Thus, the updating of an element in WM could entail the substitution of some features (i.e., phonemes, digits, visual parts, etc.) while others would remain unmodified. In the context of visual short-term memory, Ko and Seifert (2009) have indeed shown that some features of a visual object may change while others remain the same.

A mechanism for updating information based on the substitution of features is consistent with short-term memory models in which items are assumed to be represented as distributed feature-based codes (e.g., Lewandowsky & Farrell, 2008; Nairne, 1988, 1990; Neath, 2000; Oberauer & Kliegl, 2001, 2006). That is, the information associated with each stored element, rather than a single unit, is made up of multiple features that are jointly maintained active. The substitution process in updating would be similar to the overwriting mechanism included in some of these models of WM to account for interference. Thus, it could be assumed that when updating in working memory occurs, what is replaced is not the whole of the element, but only some of its features. The shared features between the old and the new item would remain activated and the unique features of the new item would be adopted. Models that posit the existence of an overwriting mechanism may have slightly different views about how such a process in WM is performed. For instance, Nairne (1990) argues that overwriting occurs only between two successive items in a list. Oberauer and Kliegl (2006) maintain that overwriting may take place between all the items simultaneously held in WM (see also Oberauer & Lange, 2008). We advocate this idea, because feature overwriting in

an updating task may involve both the new and the old information maintained in memory even when they have been studied at different times with other items presented in the interval between them.

Similarity among the representations maintained in working memory determines the degree of feature overwriting and hence the updating process. Given that the sets of features of two items always overlap to different extents, the more similar the two elements involved in updating the smaller the number of features which have to be replaced. As a consequence the substitution process should be faster for similar items. Furthermore, it is important to note that the degree of overlap or the similarity between two representations could depend on different dimensions and, ultimately, require activation of different types of features. Nairne (1990) identifies the features with the different dimensions of a stimulus, although dimensions can also be understood as a continuum along which the features can be ordered. In this way, the similarity between two stimuli could be defined by the degree of shared features along different dimensions in a multidimensional space. We are particularly interested in investigating whether similarity along different dimensions influences updating.

We have obtained preliminary evidence that an element is substituted faster according to the degree of similarity with the new item that replaces it (Lendínez, Pelegrina, & Lechuga, 2011). Specifically we found that the similarity in terms of numerical distance between the substituted number and the new one affected the updating process. The task consisted of initially memorizing two numbers. Then, new numbers were presented which had to replace the memorized ones, providing that the new numbers were lower than those stored in memory. There were two distance conditions depending on the difference between the numbers involved in the updating. A small distance condition was defined when the numbers differed by 1 or 2 units (e.g., 27 and 26) and a large distance condition when the numbers involved differed by 5 or 6 units (e.g., 27 and 21). Results showed that less time was spent when the numbers involved in the updating process were closer than when they were more distant. Because the task included both updating and non-updating trials, it was shown that numerical similarity affected to a greater extent the condition in which information had to be substituted. As the time needed to substitute a number varied according to the distance with the new number, it was suggested that what is replaced is not the number as a whole but a part of the numerical representation held in WM.

This numerical effect can be readily explained by the selective substitution mechanism previously described by which the amount of features replaced depends on the similarity between both numbers. In addition, it is possible that various underlying dimensions of

similarity influence the selective substitution process. In this regard, we consider that the numerical updating effect may be due to two dimensions. First, it may be related to the representation of the numbers on the number line. It is widely accepted that numerical magnitudes are represented on a number line on which each number would occupy a specific place and share representational features with other numbers (Dehaene & Cohen, 1995; see Verguts, Fias, & Stevens, 2005, for a review of the different concepts of the number line). This representational overlap between two numbers is greater when the numbers are closer. Therefore, the closer and more similar the numbers involved in updating, the faster the substitution. Second, it must be considered that two-digit numbers which are close to each other may be more similar than distant numbers because they have a higher probability of sharing a common digit. This is because, with the considered distances, there is a greater probability that two close numbers share the same decade than do two distant numbers. Thus, it may be easier to replace a number with another with which it shares the decade digit.

Overview of experiments

We aim to better understand the updating process and to determinate whether the selective substitution mechanism is influenced by different similarity dimensions between the information involved. Specifically, we seek to disentangle the possible effect of two dimensions of similarity: numerical distance itself and shared digits, which may contribute to the overall distance effect in updating numerical information found previously (Lendínez et al., 2011).

To this end, three experiments were carried out in which different ranges of distances and the coincidence between the digits of the two numbers involved were manipulated. All experiments used the updating task in which participants memorized numbers that later had to be substituted by other numbers depending on their magnitude (Lendínez et al., 2011; Pelegrina, Borella, Carretti, & Lechuga, 2012). This task has the advantage of including both updating and non-updating conditions in which the same numerical operations are performed, and differ only in the requirement to substitute the information. This characteristic is important because it makes it possible to determine the extent to which the different manipulations affect specifically the substitution of information process. Similarity may have different effects on the various processes involved in the task. For example, the comparison process is faster as the numerical distance increases (Dehaene, Dupoux & Mehler, 1990; Moyer & Landauer, 1967), although at the same time the updating process is slower with larger distances (Lendínez et al., 2011). By including both updating conditions, it is possible to

control the similarity in other processes involved in the task and to isolate the specific similarity effect on updating.

The first experiment aimed to determine whether the two dimensions of similarity described earlier contribute independently to the facilitation effect. We manipulated both the distance and the decade, that is, whether the numbers involved in updating shared or not the decade digit. A separate effect of both dimensions on updating times would provide converging evidence that updating involves the selective substitution of some parts of the numerical representation, and also that such substitution depends on the similarity between the previously maintained and the new information in different dimensions.

In the second experiment the overall distance effect was investigated with a wider range of distances (1 to 9) in both updating and non-updating trials. By overall distance effect we mean the distance effect without separating any underlying similarity dimensions. This experiment avoided certain bias in the selection of the numbers which was inherent to the experimental conditions used in the previous experiment. A graded effect of distance on updating times could be considered as additional evidence for the role of similarity on updating. In this experiment, it was still possible to estimate the separate contribution of both sources of similarity. Therefore, if the effect of sharing the decade could be distinguished from the distance effect, the idea of a process of selective substitution influenced by different dimensions of similarity would be supported.

The third experiment was conducted to extend previous results in two directions. First, we wanted to know whether sharing the unit digit in the numbers involved has an equivalent effect to sharing the decade digit found in the previous experiments. We expected that the coincidence in a digit, regardless of their position, would facilitate the updating of two-digit numbers, generalizing the previous findings. Second, we aimed to analyze the distance effect using greater distances.

6.3. Experiment 1

The purpose of the first experiment was to determine whether the facilitation effect on updating could be obtained by using two orthogonal manipulations of numerical similarity: distance and decade. The numerical distance between the new number and the number maintained in memory was manipulated, so that in some cases the difference between the numbers was 1 or 2 units, while in other cases this difference was 5 or 6 units. The decade of the two numbers was simultaneously manipulated: in one condition the new number and that

maintained in memory belonged to the same decade, while in the other condition they were from different decades and therefore they had different decade digits. Thus, there were four conditions resulting from crossing the previous variables. If updating depends on the similarity between the numbers involved, we should find that both similarity manipulations affect updating cost. This implies that both similarity effects should be greater for updating than for non-updating trials. Empirical support for this hypothesis would suggest that updating in WM involves the selective substitution of features from different dimensions.

Method

Participants

A total of 24 psychology students (15 female) with a mean age of 22.62 years ($SD = 5.4$) participated in this experiment and received course credit.

Materials

There were 60 lists of 12 items. Each item was a two-digit number (from 11 to 99) which appeared inside one of two possible shapes: a rectangle or a triangle. The first item was always a rectangle and the second a triangle. Across all lists, both figures appeared the same number of times¹. The two initial numbers were always from different decades. The remaining 10 items were from different types according to their updating, decade and distance conditions. In the updating condition the number was smaller than the previous smallest number associated with the same shape. In the non-updating condition the number was larger than the previous smallest number. Across all lists, there was the same number of items from each updating condition.

There were two similarity manipulations: the distance and the decade, which depended on the relationship between the current number and the smallest previous number associated to the same shape. In the large distance condition the current number and the smallest previous number differed by 5 or 6 units whereas in the small distance condition both numbers differed by 1 or 2 units. There were also two decade conditions. In the same decade condition the two numbers were from the same decade and in the different decade condition the numbers were from different decades. Thus, there were the following four conditions: same decade – large distance (e.g., 58 - 53); same decade – small distance (e.g., 58 - 56); different decade – large distance (e.g., 51 - 46) and different decade - small distance (e.g., 51 -

¹ When two consecutive items had different figures, there was an object switching which involves a time cost (e.g., Garavan, 1998). Given that object switching was not of central interest in this study, the effect related to this process would be not reported.

49). An effort was made to equate the amount of items in each of the four conditions resulting from crossing the two similarity variables as much as possible through the whole list set. However, since each number had to be based on a previous number, there were more possibilities of obtaining a number with a different decade in the large distance condition than in the small distance condition; and likewise there were more possibilities of obtaining a number with the same decade in the small distance condition than in the large one. As a consequence, from a total of 600 items, 28.5% items were from the large-distance and different-decade condition, 21% from large-distance and same-decade, 21% from the small-distance and same-decade, and 29% from small-distance and same-decade.

Procedure

Participants were presented successively with the two initial items, one for each shape (triangle and rectangle). After memorizing the number for each shape, participants pressed a key and then 10 self-paced trials with a new item appeared. For each new item, participants had to memorize the number inside the shape when it was lower than that memorized for the same shape. After memorizing the number and pressing a key, a blank screen was presented for 250 ms followed by then next item. At the end of the list the two shapes were presented successively with a cue inside each (underscore “_”) which signaled to the participants that they had to type the smallest numbers for each shape on the keyboard. As with the initial items, the rectangle was always shown first. After the two responses were typed, participants received feedback about the number of correct answers. Responses, as well as latencies from the presentation of each item until a key was pressed were registered. E-prime (Schneider, Eschman, & Zuccolotto, 2002) was used for the presentation of stimuli and to register response times and accuracy.

Participants were given instructions to be as fast and accurate as possible. Before the experimental session, participants worked through six practice lists, so that they were familiar with the procedure.

Results

The data of one of the participants was excluded, as there were errors in more than 80% of the lists. The participants completed correctly 83.12% of lists. Response times from practice lists and from the incorrectly reported lists were excluded from analyses. Response times lower than 200 ms and those exceeding the participant's mean in each condition by more than 3.5 standard deviations were also removed from data analysis. This represented 1.22% of observations. Mean response times for each condition are presented in Figure 1.

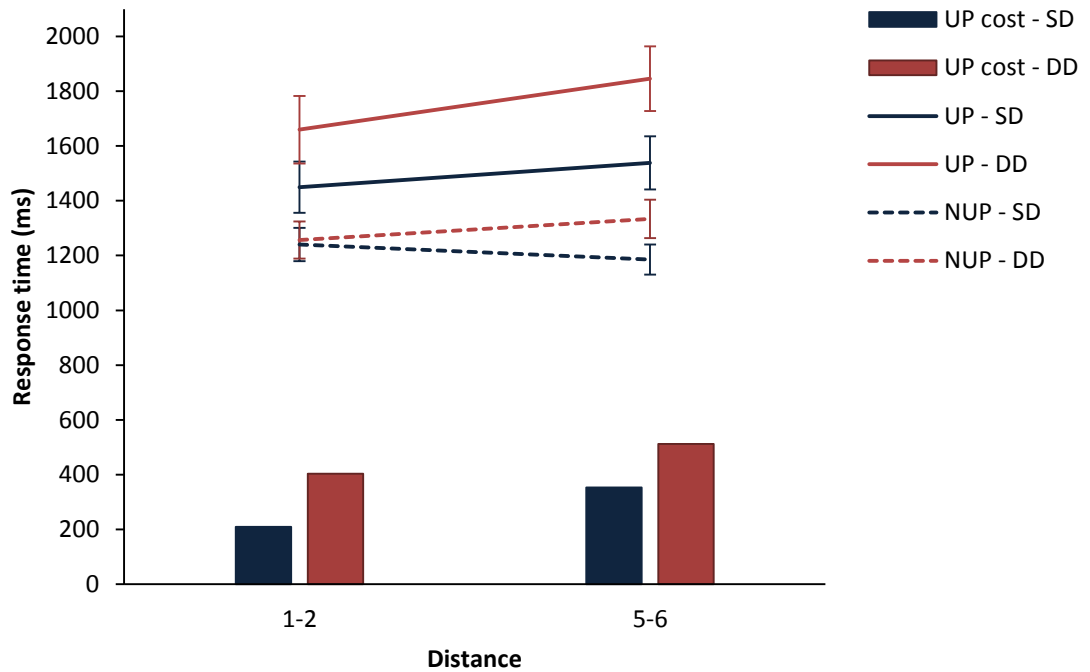


Figure 1. Response time as a function of updating, distance, and decade in Experiment 1. Bars represent updating cost. Error bars represent two standard errors of the mean. UP = updating; NUP = non-updating; SD = same decade; DD = different decade.

A three-way ANOVA was conducted with updating (updating, non-updating), distance (small distance, large distance) and decade (same, different) as within-participants variables. This analysis showed the main effects for updating, $F(1, 22) = 40.67$, $MSE = 154350.42$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .65$; distance, $F(1, 22) = 20.69$, $MSE = 12279.15$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .48$, and decade, $F(1, 22) = 48.63$, $MSE = 27509.28$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .69$. These main effects were qualified for second order interactions.

The two manipulations on similarity had a differential effect on updating. As expected, the interaction updating by distance was significant, $F(1, 22) = 13.66$, $MSE = 13439.47$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .38$. The distance effect in the updating trials (137 ms) was significant, $F(1, 22) = 19.19$, $MSE = 22664.80$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .47$, whereas in the non-updating trials this effect was reduced to a non-significant 11 ms, $F(1, 22) < 1$. As can be seen in Figure 1, this means that the updating cost was lower when the distance between the numbers was smaller than when the distance was larger.

Equally importantly, the analogous interaction with the other similarity variable, decade by updating, was also significant, $F(1, 22) = 36.53$, $MSE = 9791.97$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .62$, indicating that the decade manipulation also had an influence on updating cost. In the updating trials the decade effect was 258 ms, $F(1, 22) = 56.76$, $MSE = 27118.07$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .72$, whereas in the non-updating trials the effect was smaller (82 ms) but still significant, $F(1, 22) = 15.32$, $MSE = 10183.19$, $p = .001$, $\eta_p^2 = .41$. As a consequence, when the numbers were from the same decade updating cost was lower than when they were from different decades (see Figure 1).

Finally, the interaction decade by distance was significant, $F(1, 22) = 38.52$; $MSE = 3954.48$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .64$. We were particularly interested in determining whether the effect of distance on updating was present when the decade was controlled. Separate analyses of distance in each condition showed that in the updating trials, distance contributed to an increase of response times both in the different decade condition, $F(1, 22) = 31.49$, $MSE = 12687.69$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .59$, and in the same decade condition, $F(1, 22) = 6.36$, $MSE = 14244.41$, $p = .019$, $\eta_p^2 = .22$. However, in the non-updating trials, distance had opposite effects depending on the decade. Response times increased with distance in the different decade condition, $F(1, 22) = 17.80$, $MSE = 3879.84$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .48$, but decreased in the same decade condition, $F(1, 22) = 11.09$, $MSE = 3159.67$, $p = .003$, $\eta_p^2 = .33$.

Discussion

The most relevant results relate to the effects of both similarity manipulations and their interaction with updating. With regard to similarity, the distance effect was obtained as in a previous study (Lendínez et al., 2011). Thus, less time was used when the distance between the to-be-updated number and the new number was smaller. The decade manipulation also had an effect in line with the distance effect. Specifically, less time was spent when the two belonged to the same decade than when they were from different decades, and were therefore less similar. Together, both effects indicate that the more similar the information, the faster it is updated. It is particularly important that the distance facilitation effect was found even when the decade effect was controlled because this indicates that both similarity dimensions are separable and can be processed independently of each other.

Both similarity manipulations had differential effects on the two updating conditions. These interactions are informative about the updating mechanism. The fact that both similarity dimensions had a higher effect on the updating condition than the non-updating

condition suggests that the similarity of the information has a specific impact on the substitution of new information for future use.

With regard to the non-updating conditions, the decade was found to have a significant effect. Even when there was no substitution, more time was needed in the different decade than in the same decade condition. This effect could be due to a priming effect, in which, when the new number shares the decade digit with the number maintained in memory, its processing is faster. On the other hand, it is possible that the presentation of a new number interfere in some extent with the number maintained in memory. After processing and eventually discarding each new number, the representation of the stored number would have to be reactivated. This would be more evident to the extent in which the numbers are more different.

With regard to the distance effect in the non-updating trials, there were two different trends depending on the decade condition. For the different decade condition, response times increased with distance; but for the same decade, response time decreased. This last result is not in line with the absence of or small positive distance effects previously found in the non-updating condition (Lendínez et al., 2011). The next experiments will give us the opportunity to further analyse this unexpected effect.

6.4. Experiment 2

The second experiment aimed to investigate the effects obtained in the previous experiment using a wider range of distances: 1 to 9. This allows us to obtain the overall distance effect to which the two sources of similarity analyzed contribute. We expected to find a gradual increase in updating times according to the overall distance.

In the previous experiment, it was difficult to estimate the overall distance effect because, in order to obtain an enough number of observations per condition, the natural probability of the distances belonging to the same or to a different decade condition was modified. This led to a decrease in the number of items belonging to most frequent conditions (i.e., small distance in same-decade) and to an increase of items in the less frequent condition (i.e., large distance in same-decade). To avoid this bias, in this experiment the distance for a given number was selected at random between 1 and 9; and as a result changes in the decade digit occurred with a different probability depending on the distance. Thus, for example, there was a higher probability that larger distances involved numbers with different decades.

In addition to examining the overall distance effect, we also aimed to confirm the separate contributions of the two sources of similarity considered. We expected to replicate the earlier results of Experiment 1, showing, with this wider interval of distances, the role of both the distance and the change of the decade digit on updating cost. That is, both effects should be greater in updating than in non-updating trials.

Method

Participants

Thirty-six psychology students (30 females) with a mean age of 22.72 years ($SD = 1.92$) participated in this experiment in exchange for course credit.

Materials and Procedure

A total of 76 lists of 12 items were constructed, of which 4 were used for practice. For the two initial items, two numbers were selected at random from values larger than 20 and with a minimum distance between them of 20. The first number was associated to the rectangle and the second to the triangle. A computer program selected at random the figure for each item of the list. There were 50% rectangles and 50% triangles. For each item, the program selected a distance between -9 and 9, excluding 0. Distances were randomly chosen without replacement, so that none was repeated until all of them had been used. Negative distances would result in updating items while positive distances would produce the non-updating items. To determine the number for each item, the program added the distance to the smallest number in the list for the corresponding figure. With this procedure, there may be some repeated items with the constraint that only two repeated items were allowed in a list, provided that these numbers did not appear in consecutive items. Across the lists, there were 6.5% repeated items, which were always in the non-updating condition. In this experiment, instead of using the same set of lists for all the subjects, a different list set was produced for each participant.

The procedure was the same as in Experiment 1.

Results

The participants performed correctly 86.61% of the lists. Response times in practice lists and those in which the participants committed at least one error were excluded from analyses. Response times lower than 200 ms and those which exceeded the participant's mean in each condition by more than 3.5 standard deviations were also disregarded. This resulted in a loss of 0.68% of the data. Mean response times for each condition are presented in Figure 2.

A first analysis was conducted to determine the overall distance effect over the entire range considered. A two-way ANOVA with updating (updating, non-updating) and distance (nine levels: 1 to 9) as within-participants variables showed main effects of updating, $F(1, 35) = 44.97$, $MSE = 720607.74$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .56$, and distance, $F(8, 280) = 24.89$, $MSE = 13877.56$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .42$, and a significant interaction between distance and updating, $F(8, 280) = 11.26$, $MSE = 14927.26$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .24$.

In updating trials the distance effect was significant, $F(8, 280) = 23.66$, $MSE = 20454.08$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .40$. A trend analysis indicated significant effects for the linear, $F(1,35) = 83.91$, $MSE = 44007.24$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .71$, and cubic, $F(1,35) = 4.19$, $MSE = 17432.49$, $p = .048$, $\eta_p^2 = .11$, components. The linear component accounted for 95% of variance. The difference between response times for distances 1 and 9 was 358 ms.

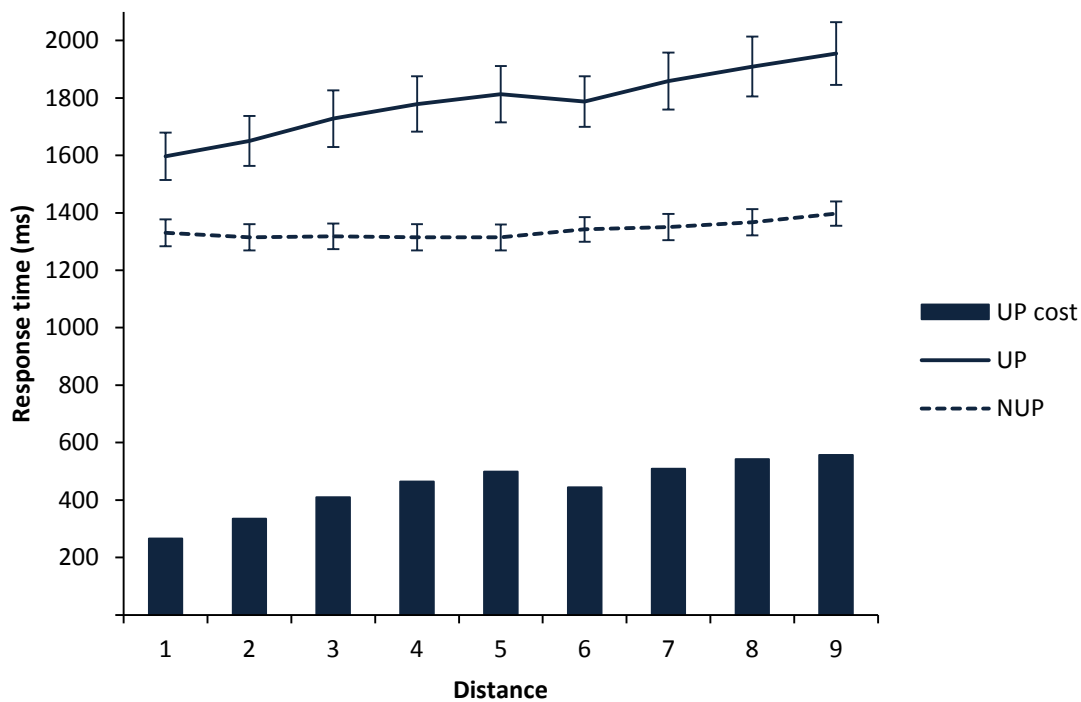


Figure 2. Response times as a function of updating and distance in Experiment 2. Bars represent updating cost. Error bars represent two standard errors of the mean. UP = updating; NUP = non-updating.

In non-updating trials there was also a significant effect of distance, $F(8, 280) = 3.56$, $MSE = 8351.10$, $p = .001$, $\eta_p^2 = .09$. The trend analyses revealed that the linear, $F(1, 35) = 11.16$, $MSE = 14257.56$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .24$, and quadratic, $F(1, 35) = 8.57$, $MSE = 8197.82$, $p = .006$, $\eta_p^2 = .2$, components were significant. The linear component accounted for 67% of variance. The

difference between the time used on trials with distances 1 and 9 was only 67 ms. The quadratic component, which accounted for 30% of variance, may reflect that the slight increase in time was only evident with distances greater than 6.

To estimate the influence of distance and change of decade on response times we carried out regression analyses following the method of repeated measures data as proposed by Lorch and Myers (1990). Separate individual regression analyses for updating and non-updating trials were performed with numerical distance, decade change (coded as same decade = 0 and different decade = 1) and their interaction as predictor variables and response times as the predicted variable. Subsequently, *t* test was performed to determine whether the means of the regression weights for each predictor variable differed significantly from zero. In updating trials, both the means of the individual regression weights for the decade change, $t(35) = 6.85$, $SE = 37.89$, $p < .001$, $d = 1.14$, and for the distance, $t(35) = 3.05$, $SE = 4.59$, $p = .004$, $d = 0.51$, were different from zero; and the interaction term was non-significant. Thus, the resulting regression equation was: $RT = 1595.94 + 259.53 (\text{DecChang}) + 13.97 (\text{Distance})$. Therefore, this analysis showed the contribution of distance and the change of decade when the two similarity dimensions were entered simultaneously in the regression. Observed times and regression lines are shown in Figure 3.

In non-updating trials, the means of the regression weights for the decade change, $t(35) = 2.83$, $SE = 29.02$, $p = .008$, $d = .47$, distance, $t(35) = 3.34$, $SE = 3.37$, $p < .001$, $d = 0.82$, and their interaction, $t(35) = 3.38$, $SE = 5.04$, $p = .002$, $d = 0.57$, differed significantly from zero. The regression equation obtained was: $RT = 1333.41 + 82.18 (\text{DecChang}) - 16.50 (\text{Distance}) + 17.05 (\text{DecChang} \times \text{Distance})$. To analyze the interaction in more detail, two regression analyses were performed separately for each decade condition following the method previously described. In the same decade condition the mean of the individual regression weights for distance was different from zero, $t(35) = 4.98$, $SE = 3.37$, $p < .001$, $d = 8.16$. The regression equation was: $RT = 1333.41 - 16.5 (\text{Distance})$. It should be noted that the mean of the distance *b*-weights was negative, meaning that the distance effect in these trials is opposite to that obtained for updating trials. In contrast, in the different decade condition, the mean of the individual regression weights was not different from zero, $t(35) < 1$. The mean of the individual intercepts for these trials was 1415 ms. In sum, in non-updating trials, there was a decrease in response times with distance when the decade remained the same, but there was no such effect when the decade changed. Observed times and regression lines on non-updating trials for each decade are shown in Figure 3.

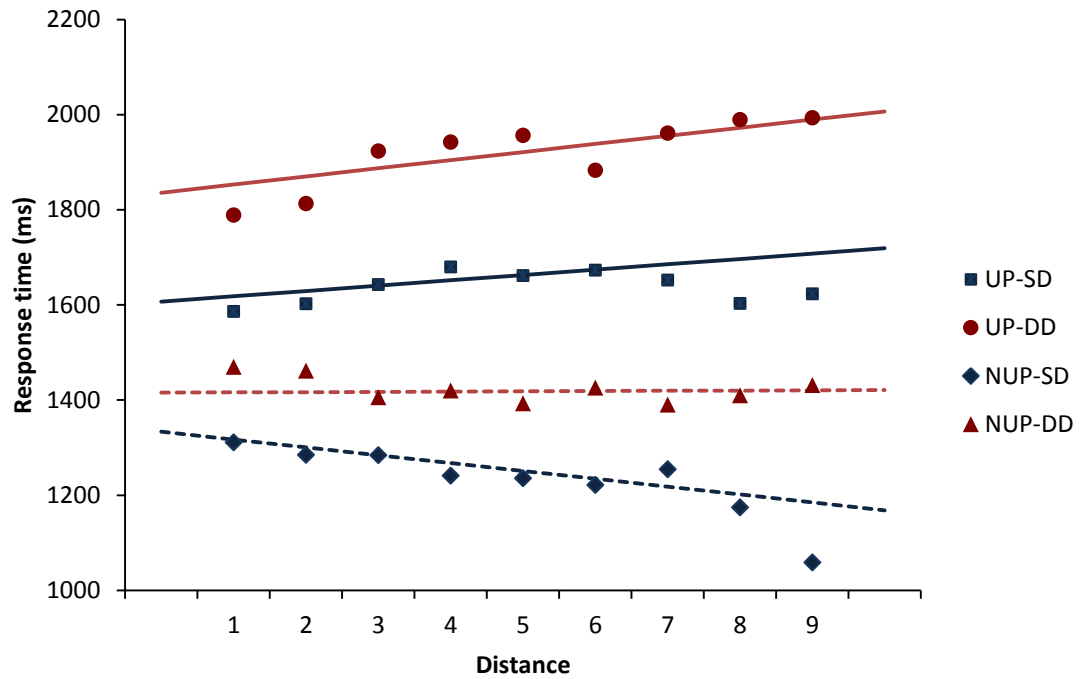


Figure 3. Observed response times and regression lines according to distance, decade and updating in Experiment 2. UP = updating; NUP = non-updating; SD = same decade; DD = different decade.

Discussion

The most relevant results involve the two different patterns obtained depending on whether the decade change was or was not controlled. When the overall distance was analyzed without controlling decade change, updating cost increased as the distance between the numbers increased. This expected result occurred because of a steep increase in updating times, along with a slight increase in response times in non-updating trials which was evident at greater distances.

When the effects of both types of similarity were determined, it was found that the previous pattern arose from the independent contributions of the two dimensions. With respect to distance, the updating cost increased with the distance between the number maintained and that presented; nonetheless this global effect was produced by opposite effects in each updating condition. On the one hand, updating times increased about 14 ms per unit of distance. This is in line with previous results and shows that the closer the numbers the faster the substitution.

On the other hand, in the non-updating trials, there were two different trends depending on the decade. For the different decade trials, response times did not change; but for the same decade trials response times decreased with distance, which is also in line with the result for the same decade condition in Experiment 1. Although not entirely consistent, this pattern could be due to a greater ease to perform the numerical comparison. Previous studies have shown that comparisons with larger distances produce faster response times (e.g., Dehaene, et al., 1990; Moyer & Landauer, 1967). In addition, Verguts and De Moor (2005) have found that this distance effect is present only when the numbers involved in the comparison belong to the same decade, which fits with the result obtained in the present experiment. If this explanation were correct, this effect should be present also in the updating trials, although masked by the greater and opposite effect related to the substitution of the information. This would show the advantage of including updating and non-updating trials in the same task.

As regards the second similarity dimension, it was found that when the decade was the same, response times were faster than when the decade changed. This type of similarity led to a facilitation both in the updating and in the non-updating trials, although the effect was larger in the former than in the latter. It should be noted that, in this experiment again, the change of decade affected non-updating times. Given the considerable magnitude of this effect, it may be due to some interference between the new and the stored numbers.

Also, as in the previous experiment, the difference between the times spent in the two decade conditions gives rise to an updating cost that could be attributed to the substitution of the decade digit in the updating condition.

6.5. Experiment 3

The goal of the third experiment was to determine whether the effect due to the shared digit is obtained not only with the decade digit, but also when the unit digit is substituted. In this experiment the following distances were considered: 1, 2, 10, 11, 12, 20, 21 and 22. The distance 0 was not used because it entails a repetition condition and it may be not comparable to other distances which require a comparison with different numbers. Some of the selected distances arise from numbers that share a digit: either the decade (distances 1 and 2) or the unit (distances 10 and 20), while other distances involve numbers that do not share any digit (11, 12, 21, and 22). By comparing conditions with and without common digits it is possible to determine the effect of the shared digit in each position. As in the previous experiment, we expected to obtain the effect due to the common decade digit, and also to

generalize this effect to the unit digit. Thus, numbers with the same unit digit would be updated faster than numbers without any common digit.

A second goal was to further examine the extent of the distance effect. Other numerical effects decrease gradually or even exponentially as numerical distance increases (e.g., Brysbaert, 1995). Therefore, it is necessary to ascertain whether the effect still occurs with larger distances between the numbers involved. The largest distance included in the previous experiment was 9 units. In this experiment, the use of larger distances, up to 22 units, allowed us to determine whether the effect extends beyond the range used previously.

Method

Participants

Thirty-six psychology students (25 females) with a mean age of 22.19 years ($SD = 5.9$) participated in this experiment in exchange for course credit.

Materials and procedure

As in the previous experiment, 76 lists (4 for practice) were constructed for each participant using the same method. The only difference was that the considered distances were: 1, 2, 10, 11, 12, 20, 21 and 22; and their corresponding negative values. The procedure was the same as in the previous experiments.

Results

The participants recalled correctly 84.8% of the lists. *Only response times* for correct recalled lists were considered for analysis. Response times lower than 200 ms and those which exceeded the participant's mean in each condition by more than 3.5 standard deviations were also excluded. This resulted in a loss of 1.08% of the data. Mean response times for each condition are shown in Figure 4.

A two-way ANOVA was carried out with updating (updating, non-updating) and distance (1, 2, 10, 11, 12, 20, 21, and 22) as within-participants variables. Both main effects were significant: updating, $F(1,35) = 76.76$, $MSE = 275885.49$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .69$, and distance, $F(7,245) = 8.72$, $MSE = 12718.73$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .20$, as was the crucial interaction updating by distance, $F(7,245) = 15.39$, $MSE = 11590.18$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .31$.

Two sets of analyses were performed to determine the distance effect on the level of decades and units, as well as to examine the effect of sharing the decade or the unit digit between the numbers involved.

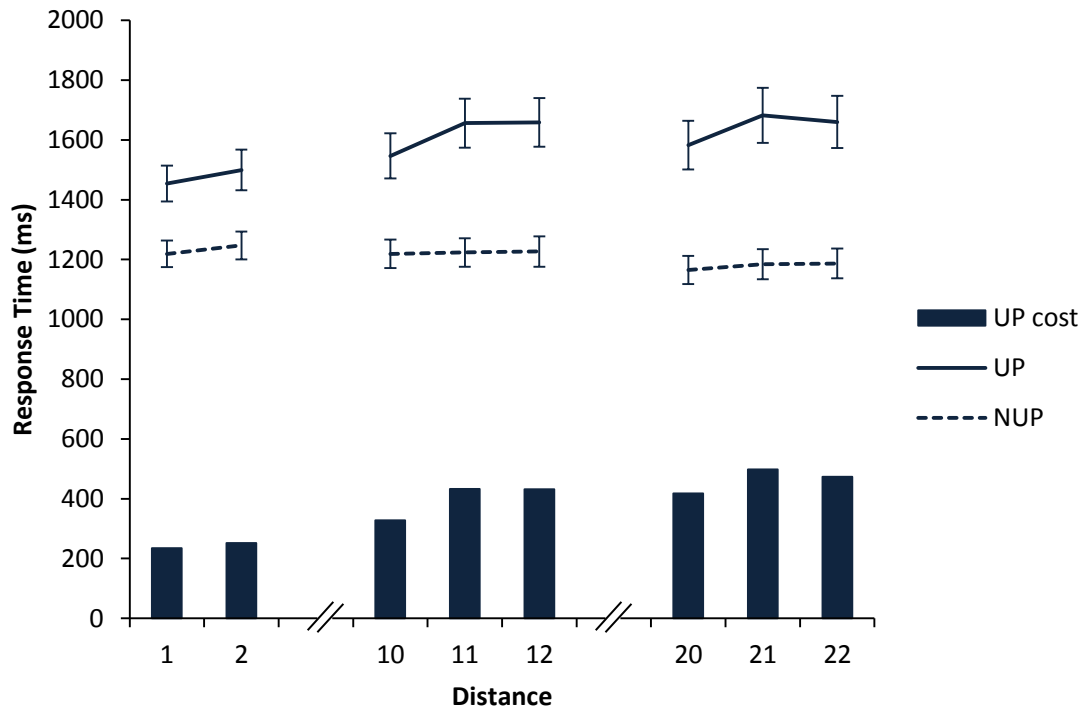


Figure 4. Response times as a function of updating and distance in Experiment 3. Bars represent updating cost. Error bars represent two standard errors of the mean. UP = updating; NUP = non-updating.

Decades

The first set of analyses was carried out to determine the effect of the three decades included (0s, 10s and 20s) on response times. To obtain the decade 0 condition, response times for distances 1 and 2 were averaged; for the decade 10s, times for distances 11 and 12 were used; and for the decade 20s, the corresponding times to distances 21 and 22 were included. The two-way ANOVA with the updating factors (updating and non-updating) and decade (0s, 10s and 20s) performed on the response times revealed that the two main effects were significant: updating, $F(1,35) = 80.34$, $MSE = 101262.04$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .70$, decade, $F(2,70) = 13.48$, $MSE = 11538.09$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .28$, as well as the interaction between them, $F(2,70) = 30.32$, $MSE = 9536.16$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .46$.

Separate analyses on updating trials and post hoc Bonferroni tests showed that updating times were shorter for the decade 0 ($M = 1478$, $SD = 381$) than for decade 10s ($M = 1658$, $SD = 485$), $t(35) = 7.48$, $SE = 56.04$, $p < .001$, $d = 1.18$; while the time spent in the decades 10s and 20s ($M = 1672$, $SD = 531$) did not differ, $t(35) = 0.52$, $SE = 26.34$, $p = 1.0$, $d = 0.06$. Therefore, in updating trials the rise in the response times depended on whether the two

numbers had different decades; but once that the decade digit had changed, the distance did not have any additional effect. The analogous analysis on non-updating trials also showed differences in response times, but in contrast to the results found for the updating trials, the time spent on decades 0 ($M = 1233$, $SD = 269$) and 10s ($M = 1225$, $SD = 292$) did not differ, $t(35) = 0.44$, $SE = 17.88$, $p = 1.0$, $d = 0.07$. However, response times in the 20s decade ($M = 1186$, $SD = 294$) were shorter than those in the 10s decade, $t(35) = 3.01$; $SE = 13.01$, $p = .014$; $d = 0.50$. This pattern could contribute to an increase in the updating cost as the decade increases.

Units

The second set of analyses aimed to determine the effect of the units: 0, 1 and 2 on both updating conditions. Response times for distances 10 and 20 were averaged to obtain the unit 0 condition; distances 11 and 21 were used to yield the unit 1 condition; and distances 12 and 22 for the unit 2 condition. The two-way ANOVA involving updating (updating, non-updating) and unit (0, 1 and 2) revealed the main effects of updating, $F(1,35) = 76.01$, $MSE = 131307.60$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .68$, unit, $F(2,70) = 11.79$, $MSE = 6185.71$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .25$, and the interaction between them, $F(2,70) = 7.64$, $MSE = 5603.56$, $p = .001$, $\eta_p^2 = .18$. *Bonferroni adjusted post hoc comparisons between the three unit conditions in updating trials indicated that less time was used in unit 0 ($M = 1566$, $SD = 465$) than in unit 1 ($M = 1668$, $SD = 509$), $t(35) = 5.25$, $SE = 19.44$, $p < .001$, $d = 0.86$, which in turn did not differ from unit 2 ($M = 1657$, $SD = 501$), $t(35) = 0.45$, $SE = 23.03$, $p = 1.0$, $d = 0.07$. These differences contrast with the results obtained in non-updating trials, where response times to unit 0 ($M = 1192$, $SD = 281$) did not differ from unit 1 ($M = 1204$, $SD = 291$) $t(35) = 1.06$, $SE = 11.27$, $p = .88$, $d = 0.17$, and neither did times to unit 1 differ from unit 2 ($M = 1206$, $SD = 297$), $t(35) = 0.12$, $SE = 17.34$, $p = 1.0$, $d = 0.02$.*

Unit vs. Decades

Previous analyses have shown that the time required to update the information increased when either the unit digit or the decade digit changed. The substitution of the decade digit seemed to have, however, a greater effect on response times than the substitution of the unit digit. To test this, the time spent on distances for which only the unit digit changed (1, 2) was compared with the time spent on distances for which only the decade digit changed (10, 20). The two-way ANOVA with updating (updating, non-updating) and digit (unit, decade) give the main effects: updating, $F(1,35) = 67.76$, $MSE = 50708.47$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .66$, digit, $F(1,35) = 4.68$, $MSE = 9743.21$, $p = .04$, $\eta_p^2 = .12$, and the interaction between them,

$F(1,35) = 18.88$, $MSE = 8075.68$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .35$. For updating trials, more time was spent when the decade digit changed ($M = 1566$, $SD = 465$) than when the unit digit did, ($M = 1465$, $SD = 370$), $F(1,35) = 14.81$, $MSE = 12322.24$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .29$. For non-updating trials, no differences were found between decades ($M = 1191$, $SD = 281$) and units ($M = 1221$, $SD = 263$), $F(1,35) = 2.85$, $MSE = 5496.66$, $p = .10$, $\eta_p^2 = .07$.

In sum, with the distances considered in this experiment, once the change of digits was controlled, distance did not have a separate influence on updating times. However, the substitution of the decade digit required more time than the substitution of the units, which may be due to the difference in numerical distance.

Number of digits and distance

As in the previous experiment and following the analytical approach by Lorch and Myers (1990), for each participant two regression equations were calculated separately for updating and non-updating trials. Because in this experiment both the decade and the unit digits could change, the number of different digits was used instead of the decade change. Thus, number of different digits (1 or 2), numerical distance and their interaction were entered as predictors, and response times as the predicted variable. For updating trials, means of regression weight of both numbers of digits, $t(35) = 6.44$, $SE = 15.94$, $p < .001$, $d = 1.07$, and distance $t(35) = 3.32$, $SE = 1.62$, $p = .002$, $d = 0.55$, were different from zero, but not their interaction, $t(35) = 1.74$, $SE = 1.53$, $p = .087$, $d = 0.37$. The regression equation was $RT = 1368.99 + 102.71 (\text{Number of digits}) + 5.37 (\text{Distance})$. In the case of non-updating trials, the means of the regression weight and number of digits, $t(35) = 2.82$, $SE = 10.85$, $p = .008$, $d = 0.47$, and distance, $t(35) = 4.14$, $SE = 0.89$, $p < .001$, $d = 0.69$, were also different from zero. The interaction did not reach significance, $t(35) = 1.74$, $SE = 1.63$, $p = .087$, $d = 0.37$. The regression equation was: $RT = 1207.32 + 30.6 (\text{Number of Digits}) - 3.69 (\text{Distance})$. The effect of the number of digits coincides with results obtained in previous analyses. The distance effect would reflect the fact that the substitution of the decade digit takes more time than the substitution of the units.

Discussion

This experiment has replicated the earlier finding that the substitution of the decade digit incurred a time cost. Most importantly, this effect has been generalized to the unit digit, as more time was required when this digit had to be replaced. In addition, it has been found that the time needed to substitute the unit digit was shorter than the time taken to replace the decade digit. It may be reasonable to assume that this difference is due to the numerical

distance in which both conditions differ. However, as these conditions also differ in the position of the common digit, it is not possible to state unequivocally that the difference is clearly due to a distance effect or other factors related to the position of the digits.

Once the digit change occurred, either in the unit or in the decade, the numerical distance within the range considered did not seem have any effect on updating times. For instance, there were no differences between the decades 10s and 20s. This result suggests that from a certain distance the numeric similarity no longer has an impact on the substitution of the information. It could be argued that the small number of shared features between two distant numbers does not imply enough of an advantage to have an appreciable effect on updating times because there would be comparatively many more non-shared features to be activated. In spite of this, it is necessary to consider that for non-updating trials, a slight but significant decrease related to the distance was observed. This is in line with the result obtained in Experiment 2, which was interpreted as due to the ease of the numerical comparison (e.g., Dehaene et al., 1990). If this were the case, the same effect should occur in the updating trials. Thus, the absence of effect on updating times between the decades 10s and 20s could be the result of a compensation between the increase due to the substitution and the small decrease due to the ease of the comparison. The two opposite trends in both updating conditions would result in a slight increase in the updating cost with larger distances. This observation was indeed supported by the significant interaction between updating (updating and non-updating) and decade (10s vs. 20s), $F(1,35) = 4.59$, $MSE = 9501.32$, $p = .04$; $\eta_p^2 = .12$.

6.6. General discussion

The purpose of this study was to investigate how information is updated in WM and the role that similarity plays in this process. Specifically, we aimed to disentangle two types of similarity that may underlie the distance effect on numerical updating tasks. Previous results showed that numerical similarity in terms of distance produces a facilitation effect when updating information (Lendínez et al., 2011). This effect could be attributed both to the numerical distance itself as well as to the change of decade. In three experiments we have presented evidences that both similarity dimensions play a role in updating information in WM. As predicted, when the numbers involved in updating were more similar, either in numerical distance or because they shared a digit, the substitution was carried out more quickly.

The numerical updating task used in this study makes it possible to examine some of the components involved in updating in WM and to determine how the similarity of the information influences them. Updating begins with an event that triggers the process of substitution. That event leads to a modification in the functioning of WM, from an active maintenance mode to a replacement of information mode (Hazy, Frank, & O'Reilly, 2006, 2007). The event may be external, such as a change in the environment, or it may be the result of an internal process (Kessler & Meiran, 2008). In the numerical updating task, the substitution comes as a result of a numerical comparison. This operation may vary in difficulty and therefore may affect or even compromise the outcome of the updating (Carretti, Cornoldi, & Pelegrina, 2007). This may be similar to the way that in which the transformation component affects some updating tasks (see Ecker et al., 2010). Indirect evidence of this may be the result obtained in the non-updating trials, showing that easier comparisons involving a greater distance lead to shorter response times. It can be assumed that this effect occurs also in the updating condition in which there are the same operations.

Once it is determined that an update has to be done, there are the double functional demands to maintain certain contents of the WM and modify others. A remarkable result from this study is that selective updating may occur on two levels: that of the element maintained and also at the more molecular level of a part of a representation. On the one hand, in each updating trial, one item should remain unmodified, while the other should be replaced by new information, leading to local updating. Following the argument proposed by Kessler and Meiran (2008), the partial substitution of information provides flexibility to the content of memory, allowing for rapid changes in information. On the other hand, in each trial there was a graded substitution by which some parts of a single element are replaced while other parts remain unchanged. This graded substitution was inferred from the effects on updating times obtained from two different dimensions of similarity: numerical distance and shared digits.

As regards the first dimension, it was found that distance had an effect on updating times after the decade effect or the number of shared digits was controlled. In all cases, the closest the maintained number to the new number, the faster was the updating. This effect is assumed to rely on the numerical magnitude or semantic representation of the numbers which are ordered along a number line. Closer numbers in the number line share more representational units than those numbers that are further apart (e.g., Verguts, et al., 2005).

The second similarity dimension that has an influence on the updating process is whether there are or not shared digits between the two numbers involved. In the first two experiments, the new numbers were updated more quickly when they shared the decade digit

with the stored number. Experiment 3 has shown that the effect of a shared digit is not limited to the decade, but also occurs when the units in the new number and in the number held in memory coincide. The similarity effect related to the common digit may have diverse origins that are not mutually exclusive. First, two numbers with the same decade or unit digit are semantically similar because they share the magnitude. In fact, if the numerical effect reported here relies solely on magnitude representation the results would be compatible with the view that two-digit numbers are processed as decomposed representations of tens and units (Nuerk, Weger, & Willmes, 2001; see Nuerk & Willmes, 2005, for a review). Nonetheless, the numerical effect may also depend on visual and verbal representations (e.g., Dehaene, 1992; Dehaene & Cohen, 1995). Thus, the numbers which share a digit are also visually more similar. Recently it has been argued that even the perceptual similarity between single numbers may account for part of the distance effect (Cohen, 2009; García-Orza, Perea, Mallouh, & Carreiras, 2012). Finally, in many languages, when two numbers belong to the same decade the first syllables are usually alike, and likewise, when the numbers share the unit digit their last syllables are usually the same. In both cases the phonological similarity of the numbers would be greater.

In sum, previous results have shown that the overall distance effect could be decomposed in, at least, two dimensions of similarity. Theories in cognitive psychology such as exemplar-based models of memory and categorization (e.g., Logan 2002; Nosofsky, 1986) or feature-based models of memory (e.g., Nairne, 1990; Neath, 2000) share the assumption that similarity is functionally related to the distance between objects in a multidimensional psychological space (Shepard, 1964). Following these models, updating could be understood as a process driven by similarity between representations. Items that are closer in the multidimensional space to the item maintained in memory are more easily updated.

The feature overwriting mechanism, used initially to account for interference (e.g., Oberauer & Kliegl, 2006), can also be applied to explain the graded similarity effects found in updating. From this approach, when an element stored in memory has to be replaced by another similar element with which it shares many features, the process will take place more quickly, as a smaller number of new features have to be activated. This implies that when updating takes place, the old information is not completely eliminated and replaced by the new information, but rather that parts of the information are replaced. In sum, updating does not imply a discrete substitution, in which a whole representation is changed as a complete unit, but rather a graded substitution. In a hypothetical condition in which the information presented matches that stored in memory, the time necessary for the substitution would be

minimal. Results which are consistent with this idea have been found in repetition conditions in some updating tasks (Ecker et al., 2010).

The process outlined requires, in addition to the activation of individual features, a low-level binding to associate a feature with another (e.g., Oberauer & Lange, 2009). In fact, a way to update the representation would be to unbind the no-longer necessary features and establish new bindings with other features from the new item. This binding has to use some tag to bind the individual features. A possible neural tag of this sort could be the time: features bound together would fire in synchrony with one another as a unit. Thus, selective substitution would involve a new group of features beginning to fire with a pattern temporally correlated with the common firing rate of another previously active set of features. A possible function of maintaining some integrated features of an object over time, instead of disregarding the whole representation, would be to give continuity to the object in WM and preserve its identity even in the face of rapid changes, as occurs in updating situations. This low-level binding should be distinguished from other higher-level binding between elements and the context which is also necessary for updating (Artuso & Palladino, 2011; Ecker et al., 2010; Kessler & Meiran, 2008). In this case, its function would be to provide stability to the representations by creating a global representation of all the contents stored in memory after the substitution (Kessler & Meiran, 2006, 2008).

Our results suggest therefore that maintaining or reusing some parts of a previously-held representation is adaptive, as the substitution of the information can occur more quickly by employing the usable parts and bindings of the representation which is stored at the time of updating. However, the previous activation of some sets of features does not always facilitate updating. A drawback may be seen when obsolete information maintains a certain degree of activation. This may result in the proactive interference observed in some updating tasks (e.g., Artuso & Palladino, 2011; Palladino, Cornoldi, De Beni & Pazzaglia, 2001; Szmalec, Verbruggen, Vandierendonck, & Kemps, 2011). Another situation is when various elements have to be simultaneously maintained in an updating task. In this case, similarity between the new information and an element that has to be maintained unmodified produces interference instead of facilitation (Pelegrina et al., 2012). This interference can be also accounted for by the amount of shared features between the representations of each object.

To conclude, this study showed that the numerical distance effect on a numerical updating task can be decomposed in two similarity effects, one related with the numerical distance and the other related to the shared digits between the numbers involved. The effects obtained with each dimension are consistent with the idea of distributed representations

based on features, and with the existence of a feature overwriting mechanism which accounts for the interaction between information in WM. Consequently, updating in WM can be understood as a selective substitution process influenced by similarity in which only certain parts of the representation stored in memory are changed.

Author Note

The research reported here was supported by a grant from the Spanish Ministry of Science and Technology to Santiago Pelegrina (PSI2009-11344) and a grant from the Spanish Ministry of Science and Innovation (CSD2008-00048) in the CONSOLIDER-INGENIO 2010 programme.

We are grateful to Rocío Linares for her help in participant testing.

Experiments reported in the paper were part of a doctoral dissertation by the first author.

6.7. References

- Artuso, C., & Palladino, P., (2011). Content–context binding in verbal working memory updating: On-line and off-line effects. *Acta Psychologica*, 136, 363–369. doi:10.1016/j.actpsy.2011.01.001
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford: Clarendon.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: advances in research and theory* (vol. 8, pp. 47-90). New York: Academic Press.
- Brysbaert, M. (1995). Arabic number reading: On the nature of the numerical scale and the origin of phonological recoding. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124, 434-452. doi:10.1037/0096-3445.124.4.434
- Carretti, B., Cornoldi, C., & Pelegrina, S. (2007). Which factors influence number updating in working memory? The effects of size distance and suppression. *British Journal of Psychology*, 98, 45–60. doi:10.1348/000712606X104175
- Cohen, D. J. (2009). Integers do not automatically activate their quantity representation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16, 332–336. doi:10.3758/PBR.16.2.332

- Dehaene S. (1992) Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1-42. doi:10.1016/0010-0277(92)90049-N
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1, 83-120.
- Dehaene, S., Dupoux, E., & Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 626-641. doi: 10.1037/0096-1523.16.3.626
- Ecker, U. H. K., Lewandowsky, S., Oberauer, K., & Chee, A. E. H. (2010). The components of working memory updating: an experimental decomposition and individual differences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36, 170-189. doi: 10.1037/a0017891
- Garavan, H. (1998). Serial attention within working memory. *Memory & Cognition*, 26, 263-276. doi:10.3758/BF03201138
- García-Orza, J., Perea, M., Mallouh, R.A., & Carreiras, A. (2012). Physical similarity (and not quantity representation) drives perceptual comparison of numbers: Evidence from two Indian notations. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19, 294-300. doi:10.3758/s13423-011-0212-8
- Hazy, T. E., Frank, M. J., & O'Reilly, R. C. (2006). Banishing the homunculus: making working memory work. *Neuroscience*, 139, 105–118. doi:10.1016/j.neuroscience. 2005.04.067
- Hazy, T. E., Frank, M. J., & O'Reilly, R. C. (2007). Towards an executive without a homunculus: Computational models of the prefrontal cortex / basal ganglia system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 362, 1601–1613. doi: 10.1098/rstb.2007.2055.
- Kessler, Y., & Meiran, N. (2006). All updateable objects in working memory are updated whenever any of them are modified: evidence from the memory updating paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 32, 570–585. doi:10.1037/0278-7393.32.3.570
- Kessler, Y., & Meiran, N. (2008). Two dissociable updating processes in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34, 1339-1348. doi:10.1037/a0013078
- Ko, P. C., & Seiffert, A. E. (2009). Updating objects in visual short- term memory is feature selective. *Memory & Cognition*, 37, 909– 923. doi:10.3758/MC.37.6.909

- Lendínez, C., Pelegrina, S., & Lechuga, T. (2011). The distance effect in numerical memory-updating tasks. *Memory & Cognition*, 39, 675-685. doi: 10.3758/s13421-010-0047-y
- Lewandowsky, S., & Farrell, S. (2008). Short-term memory: New data and a model. *The Psychology of Learning and Motivation*, 49, 1-48. doi:10.1016/S0079-7421(08)00001-7
- Logan, G. D. (2002). An instance theory of attention and memory. *Psychological Review*, 109, 376-400. doi: 10.1037/0033-295X.109.2.376
- Lorch, R. F., & Myers, J. L. (1990). Regression analyses of repeated measures data in cognitive research. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 16, 149-157. doi:10.1037/0278-7393.16.1.149
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., & Howerter, A. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "Frontal Lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41, 49-100. doi:10.1006/cogp.1999.0734
- Morris, N., & Jones, D. M. (1990). Memory updating in working memory: the role of central executive. *British Journal of Psychology*, 81, 111-121. doi: 10.1111/j.2044-8295.1990.tb02349.x
- Moyer, R. S., & Landauer, T. K. (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature*, 215, 1519-1520. doi:10.1038/2151519a0
- Nairne, J. S. (1988). A framework for interpreting recency effects in immediate serial recall. *Memory & Cognition*, 16, 343-352. doi:10.3758/BF03197045
- Nairne, J. S. (1990). A feature model of immediate memory. *Memory & Cognition*, 18, 251-269. doi:10.3758/BF03197045
- Neath, I. (2000). Modeling the effects of irrelevant speech on memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 7, 403-423. doi:10.3758/BF03214356
- Nuerk, H. C., Weger, U., & Willmes, K. (2001). Decade breaks in the mental number line? Putting the tens and units back in different bins. *Cognition*, 82, B25-B33. doi: 10.1016/S0010-0277(01)00142-1
- Nuerk, H. C., & Willmes, K. (2005). On the magnitude representation of two digit numbers. *Psychology Science*, 47, 52-72.

- Nosofsky, R. M. (1986). Attention, similarity, and the identification-categorization relationship. *Journal of Experimental Psychology: General*, 115, 39-57. doi:10.1037/0096-3445.115.1.39
- Oberauer, K., & Kliegl, R. (2001). Beyond resources: formal models of complexity effects and age differences in working memory. *European Journal of Cognitive Psychology*, 13, 187-215. doi:10.1080/09541440042000278
- Oberauer, K., & Kliegl, R. (2006). A formal model of capacity limits in working memory. *Journal of Memory and Language*, 55, 601-626. doi:10.1016/j.jml.2006.08.009
- Oberauer, K., & Lange, E. B. (2008). Interference in verbal working memory: distinguishing similarity-based confusion, feature overwriting, and feature migration. *Journal of Memory and Language*, 58, 730-745. doi:10.1016/j.jml.2007.09.006
- Oberauer, K., & Lange, E. (2009). Activation and binding in verbal working memory: A dual process model for the recognition of nonwords. *Cognitive Psychology*, 58, 102-136. doi:10.1016/j.cogpsych.2008.05.003
- Palladino, P., Cornoldi, C., De Beni, R., & Pazzaglia, F. (2001). Working memory and updating processes in reading comprehension. *Memory & Cognition*, 29, 344-354. doi:10.3758/BF03194929
- Pelegrina, S., Borella, E., Carretti, B., & Lechuga, M. T. (2012). Similarity-based interference in a numerical memory-updating task: age-related differences between young and older adults. *Experimental Psychology*, 59, 183-189. doi:10.1027/1618-3169/a000142.
- Schneider, W., Eschman, A., & Zuccolotto, A. (2002). *E-Prime users's guide*. Pittsburgh: Psychology Software Tools, Inc.
- Shepard, R. N. (1964). Attention and the metric structure of the stimulus space. *Journal of Mathematical Psychology*, 1, 54-87. doi:10.1016/0022-2496(64)90017-3
- Szmales, A., Verbruggen, F., Vandierendonck, A., & Kemps, E. (2011). Control of interference during working memory updating. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 37, 137-151. doi:10.1037/a0020365
- Verguts, T., Fias, W., & Stevens, M. (2005). A model of exact small-number representation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 66-80. doi:10.3758/BF03196349
- Verguts, T., & De Moor, W. (2005). Two-digit comparison. Decomposed, holistic, or hybrid?. *Experimental Psychology* 52, 195-200. doi:10.1027/1618-3169.52.3.195

7. ESTUDIO 3: AGE DIFFERENCES IN WORKING MEMORY UPDATING. THE ROLE OF INTERFERENCE, FOCUS SWITCHING AND SUBSTITUTING INFORMATION

Lendínez, C., Pelegrina, S., y Lechuga, M. T. (en prensa). Age differences in working memory updating. The role of interference, focus switching and substituting information. *Acta Psychologica*. doi: 10.1016/j.actpsy.2015.02.015

7.1. Abstract

Working memory updating (WMU) tasks require different elements in working memory (WM) to be maintained simultaneously, accessing one of these elements, and substituting its content. This study examined possible developmental changes from childhood to adulthood both in focus switching and substituting information in WM. In addition, possible age-related changes in interference due to representational overlap between the different elements simultaneously held in these tasks were examined. Children (8- and 11-year-olds), adolescents (14-year-olds) and younger adults (mean age=22 years) were administered a numerical updating memory task, in which updating and focus switching were manipulated. As expected, response times decreased and recall performance increased with age. More importantly, the time needed for focus switching was longer in children than in adolescents and younger adults. On the other hand, substitution of information and interference due to representational overlap were not affected by age. These results suggest that age-related changes in focus switching might mediate developmental changes in WMU performance.

Keywords: Working memory updating; Focus switching; Interference; Numerical updating.

7.2. Introduction

Working memory (WM) is a limited capacity system that entails the active maintenance of representations necessary for the cognitive task being performed. Given the continuous flow of information to be processed and its limited capacity, a mechanism is necessary that allows WM content to be constantly updated (Morris & Jones, 1990). This mechanism is considered a fundamental executive function in cognitive architecture (Miyake, Friedman, Emerson, Witzki, & Howeter, 2000) with clear implications in a wide range of complex cognitive tasks, such as reading comprehension (e.g., Carretti, Cornoldi, De Beni, & Romano, 2005; Cornoldi, Drusi, Tencati, Giofrè, & Mirandola, 2012), arithmetic calculations and mathematical problem solving (e.g., Passolunghi & Pazzaglia, 2004, 2005; Swanson & Beebe-Frankenberger, 2004; Pelegrina, Capodieci, Carretti, & Cornoldi, 2014), and intelligence (e.g., Friedman, Miyake, Corley, Young, DeFries, & Hewitt, 2006).

Working memory updating (WMU) is a complex process that can involve several more basic processes. Ecker, Lewandowsky, Oberauer, and Chee (2010) have recently identified different component processes that make independent contributions to updating performance: retrieval, transformation and substitution. It is also possible to add those mechanisms responsible for inhibiting or eliminating no-longer-relevant information (Ecker, Lewandowsky, & Oberauer, 2014; Palladino, Cornoldi, De Beni, & Pazzaglia, 2001).

The efficiency with which WM content is updated improves during childhood and adolescence as shown in different studies employing a range of updating tasks (e.g., Belacchi, Carretti, & Cornoldi, 2010; Garon, Bryson, & Smith, 2008; Huizinga, Dolan, & Van der Molen, 2006; Kwon, Reiss, & Menon, 2002; Lechuga, Moreno, Pelegrina, Gómez-Ariza, & Bajo, 2006; Schleepen & Jonkman, 2010; Vuontela, Steenari, Carlson, Koivisto, Fjallberg, & Aronen, 2003). This developmental pattern may be due to changes in the more basic components involved in updating tasks. The present study aimed to analyze potential developmental changes during childhood and adolescence across some component processes involved in WMU. Specifically, we sought to investigate possible developmental differences in the efficiency with which information is substituted in WM. In addition, we aimed to determine possible age changes in the susceptibility to interference due to the representational overlap between the different elements simultaneously held in the updating task. Finally, we sought to identify possible age changes in focus switching that allows accessing information to be updated.

Substitution

A key element in WMU is the substitution of specific content maintained in WM for new information. Substitution is a process sensitive both to the number of to-be-substituted items (Kessler & Meiran, 2008) and to the similarity between the information involved. Lendínez, Pelegrina, and Lechuga (2011, 2014) have found that numerical updating is faster when the information involved in the substitution process is more similar in terms of numerical distance. This facilitation effect can be explained by considering substitution as a selective process that replaces some parts of a representation while others are left unchanged. Information in WM may be represented as groups or sets of features (Nairne, 1990; Oberauer & Kliegl, 2006). Thus, two representations would share a certain number of features depending on their similarity. When a representation is substituted by another similar, a large number of common features would be maintained and only a small number of new features must be replaced. Hence, the greater the similarity and in turn the fewer to-be-substituted features, the faster the updating.

An aim of this study was to determine whether the time needed to substitute information in WM changes throughout childhood and adolescence. A decrease in the updating cost with age could contribute to explaining the greater efficiency with which information is updated as children get older. Furthermore, it was of interest to assess possible age-related differences in the effect of similarity-based facilitation.

Similarity-based interference

WMU in addition to flexibility must provide stability to memory representations (Kessler & Meiran, 2008, see also Hazy, Frank, & O'Reilly, 2006). One factor which can threaten this stability is interference derived from different contents simultaneously held in WM. Pelegrina, Borella, Carretti, and Lechuga (2012) have found that similarity between the different elements maintained in a numerical updating task hinders performance. This similarity-based interference may also be explained by the idea that information in memory is represented as sets of features. When overlap occurs between two representations, competition arises between them owing to their shared features, and in the end one of them loses some of these features to the other (Nairne, 1990; Neath, 2000; Oberauer & Kliegl, 2006). This loss of features leads to a degradation of representations and a decrease in recall performance.

There are several situations where the overlap between representations increases, and hence the interference between the items held in WM. On the one hand, interference is

related to memory load. When the number of simultaneously stored items increases, so too does the number of shared features, thus leading to representational overlap. On the other hand, the more similar the information maintained, the higher the number of shared features, which would also lead to greater interference.

The study of similarity-based interference during childhood is of particular relevance given that some authors have specifically suggested that interference may be related to age differences in WMU. Thus, Schleepen and Jonkman (2010) have attributed age differences in n-back task performance to an improvement in interference control. As children get older they could better manage the interference, especially in the higher WM load conditions. However, other studies have found no evidence that susceptibility to interference related to the increase in WM load changes throughout childhood. Göthe, Esser, Gendt, and Kliegl (2012) administered verbal and visuospatial updating tasks to 7- and 11-year-old children in order to assess the extent to which a specific interference model of WM (Oberauer & Kliegl, 2006) fitted to the performance of the different age groups. One of the estimated parameters was feature overwriting, which was related to memory load. It was assumed that a greater load produces a higher degree of overlap and consequently more interference by overwriting. Göthe et al. (2012) did not find age differences in this parameter among children aged 7 and 11 years. Rodríguez-Villagra, Göthe, Oberauer, and Kliegl (2013) obtained an analogous result with a visuospatial updating task, where no differences were found among 10-year-old children and adults in the feature overwriting parameter.

The present study aimed to further address this question by using another manipulation that affects representational overlap and in turn interference. Thus, instead of manipulating the memory load (or the number of maintained items), similarity between the two representations that should be simultaneously stored in WM was directly manipulated. Findings from a previous study with older adults revealed that this manipulation resulted in age-related differences. Specifically, similarity affected older participants' recall more than younger individuals' recall (Pelegrina et al., 2012). The present study employed the same task to determine whether susceptibility to similarity-based interference decreases throughout childhood.

Focus switching

Another process involved in WMU tasks is focus switching. Normally, in updating tasks there are different items that have to be maintained simultaneously in WM and that are susceptible of being replaced at some point of the task. This requires a mechanism to access

each of the to-be-updated elements. Garavan (1998) showed that there was a cost for selecting one of the items maintained in WM for immediate processing. In his study, Garavan used a continuous counting paradigm whereby participants had to keep two counters in memory for two different figures (a triangle and a rectangle). Participants updated the appropriate mental count adding one unit when the corresponding figure was presented. Garavan's main finding was that the time to update the information was about 300 to 500 ms slower when there was a switch from a counter to the other, that is, when the counter to be updated was different to the counter previously updated (e.g., triangle after a rectangle). This switching cost showed that not all the items in WM are equally accessible.

The focus-switching mechanism acquires special significance in WM embedded-processes models, where WM is considered a temporarily activated subset of long-term memory representations (e.g., Cowan, 1995, 1999). Oberauer (2002) has suggested that of all the elements in WM, one of them has a privileged status by being held in the focus of attention, meaning that this representation is immediately available for processing (see also McElree, 2001; McElree & Doshier, 1989). On a second level, referred to as the direct-access region, a limited number of representations would be held in a state of availability to be retrieved in the focus of attention. The focus-switching mechanism is responsible for selecting and accessing items maintained in the direct-access region, activating them in the focus of attention. Only information activated in the focus of attention can be selected as the object of a cognitive operation.

Some studies carried out on young and older adults have observed age-related changes in focus switching. In fact, Verhaeghen and colleagues view focus switching as an executive process that contributes to WM performance deficits in older adults (Vaughan, Basak, Hartman, & Verhaeghen, 2008; Verhaeghen & Basak, 2005; Verhaeghen & Hoyer, 2007). Similarly, efficiency in accessing information in the focus of attention could change throughout childhood and adolescence. This improvement may help to explain the overall changes obtained in updating tasks. In fact, focus-switching accuracy seems to predict verbal working memory in typically developing children (Magimairaj & Montgomery, 2012). Therefore, an aim of this study was to determine to what extent focus-switching efficacy changes throughout childhood and adolescence.

7.3. The present study

This study aimed to determine to what extent information substitution and focus switching in WM change during childhood and adolescence. It is possible that improvement in updating performance across childhood and adolescence is, to a certain degree, due to greater efficiency in the substitution and focus-switching processes.

This study employed a numerical updating task where participants had to maintain and update the values associated with two different items (Lendínez et al., 2011, 2014). During the updating trials, one of the values required modification according to a criterion, while the other would remain unchanged. There were also non-updating trials where both values were to continue unmodified. The inclusion of both types of trials makes it possible to determine the updating cost. The criterion for updating was the result of a numerical comparison between the new number presented and another previously memorized (Carretti, Cornoldi, & Pelegrina, 2007). This procedure allowed us, in addition to examining the numerical distance effect, to determine whether the updating cost and the similarity based-facilitation was age-invariant or changed with age.

The need to maintain two elements that could be updated throughout the task requires a differentiation of their representations. The closer, or more similar, the numbers the greater the representational overlap, and hence the difficulty to differentiate them. In this study, similarity between the information involved was manipulated, making both numbers have the same or different decade. Based on previous findings (Pelegrina et al., 2012), similarity between the numbers was expected to produce interference. Furthermore, if susceptibility to this type of interference was to change during childhood and adolescence, then differences should be observed in the similarity effect across the different age groups under consideration.

The task used in this study required continuous access to information related to one or another element. This meant that in some trials the information to be updated was active in the focus of attention, while in other trials that information had to be retrieved from the direct-access region. By comparing both types of trials, it was possible to estimate the focus-switching cost and to determine possible changes across the age groups considered. It could be expected that age-related improvements would occur in the efficiency of the focus-switching process.

Method

Participants

A total of 140 children and university students took part in this study. They were selected from four age groups. The first group included 35 children aged 8 (21 boys and 14 girls) with a mean age of 8.28 (SD= 0.46). The second group comprised 35 11-year-olds (15 boys and 20 girls) with a mean age of 11.26 (SD= 0.44). The third group included 35 children aged 14 (16 boys and 19 girls) with a mean age of 14.54 (SD= 0.70). The fourth and final group was made up of 35 university students (3 men and 32 women) with a mean age of 21.68 (SD= 2.99), who received course credit for their participation. All parents of participating children and adolescents gave their informed consent. Four children in the 8-year-old group did not complete the first session and were not tested in the second session, and three children in the 14-year-old group did not attend the second session. Those participants with incomplete data were excluded from analyses.

Materials

Sixty-four lists were constructed for this task. Each list was made up of two initial items and ten additional items. Each item consisted of a two-digit number that appeared inside one of two possible figures: a rectangle or a triangle. In each list, the first item was a triangle and the second one a rectangle. The remaining items could be from different types depending on their switch, updating and distance conditions (see Figure 1).

In the non-switching condition the figure of an item was the same as for the previous item, whereas in the switching condition the figure was different to that of the item before. In the updating condition the current number was lower than the previous smallest number associated with the same figure, whereas in the non-updating condition the current number was larger than the previous smallest number for the same figure. In addition, the distance between the current number and the smallest number associated with the same figure was manipulated. Thus, in the small-distance condition the two numbers differed by 1 or 2 units (e.g., 47 and 46), whereas in the large-distance condition both numbers differed by 5 or 6 units (e.g., 47 and 42). Switching, updating and distance conditions were manipulated within-lists, and across the lists there were the same number of items for each condition. This means that each list comprised 50% of items from each condition.

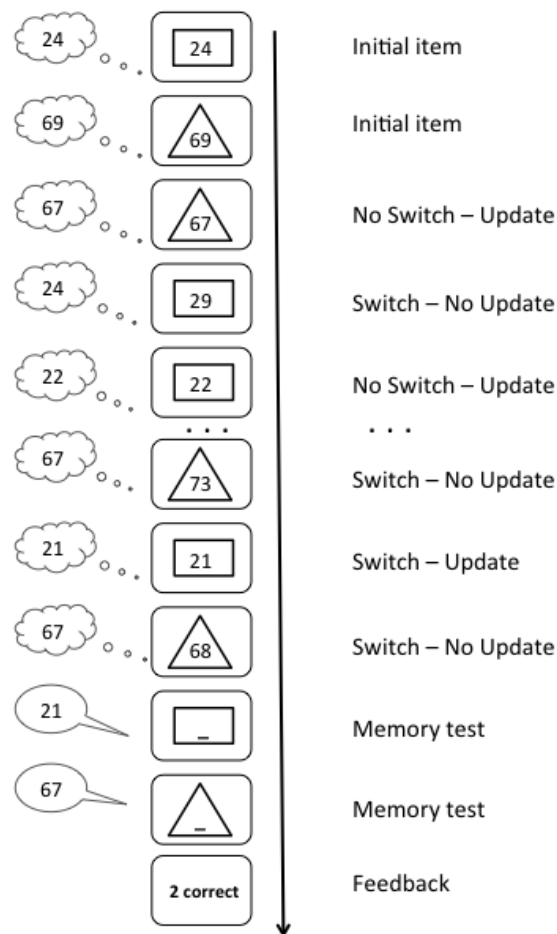


Figure 1. Schematic representation of a low-overlap list. Two items were initially presented with a number inside each figure (rectangle and triangle). Participants had to memorize these initial values. This was followed by a sequence of items with a number inside one of the figures. For each item, participants had to compare the number previously memorized for the corresponding figure and the new number. If the new number was smaller than the one previously maintained for the same figure, participants had to update the number. At the end of the list, participants had to recall the smallest number for each figure after which feedback was given.

In addition to the aforementioned within-list manipulations, a between-list manipulation was included. Specifically, there were two types of lists depending on the overlap

condition. For half of the lists there was a high overlap between the numbers associated with the two figures, given that both initial numbers were from the same decade (e.g., 65 for the triangle and 62 for the rectangle). As a consequence, there was a high probability of decade overlap for the rest of the items in these lists, since most numbers shared the decade. Moreover, the to-be recalled numbers in these lists were both from the same decade. As for the other half of the lists, there was a low degree of overlap between the numbers associated with the two figures, since the initial numbers were from different decades (e.g., 64 for the triangle and 27 for the rectangle). All numbers in a list were different across both conditions. Lists for each condition were presented to each participant in random order with the constraint that, in a block of 10 successive lists, the same number of lists were included for each overlap condition.

Procedure

Participants were presented successively with the two initial items, one for each figure (triangle and rectangle). After memorizing the number for each shape, participants pressed a key and then 10 self-paced trials with a new item appeared. For each new item, participants had to memorize the number inside the figure when it was lower than that memorized for the same shape. After memorizing the number and pressing a key, a blank screen was displayed for 250 ms followed by the next item. At the end of the list the two figures were presented successively with a cue inside each (underscore “_”), which signalled to the participants that they had to type the smallest numbers for each shape on the keyboard. As with the initial items, the rectangle was always shown first. After the two responses were typed, participants received feedback about the number of correct answers (see Figure 1).

Responses, as well as latencies from the presentation of each item until a key was pressed, were registered. E-prime (Schneider, Eschman, & Zuccolotto, 2002) was used for the presentation of stimuli and to register response times and accuracy. Participants were given instructions to be as fast and accurate as possible. Before the experimental session, participants worked through four practice lists, so that they were familiar with the procedure.

Participants performed the task individually during two 45-min sessions (approximately) carried out on different days. During the first session each participant completed half of the lists, that is 30, and in the second session the other half. To prevent fatigue, each participant could take a short break when they completed 10 lists. Children were tested in a quiet room at their school, and adult participants were tested at the university campus's psychology laboratory.

Results

Response times

Response times from practice lists and from incorrectly recalled lists were discarded. Seven 8-year-old children were excluded from the time analyses due to low recall accuracy (< 35%), which led to a small number of observations in each condition. Those times lower than 200 ms and higher than the participant's mean by condition by more than 3.5 standard deviations were also excluded. Raw response times were log-transformed prior to analysis in order to adjust for age-group differences in processing speed and to rule out that some age differences were due to the general decrease in response time with age.

Substitution of information

A 2 (updating) x 2 (distance) x 2 (overlap) x 4 (age group) ANOVA was conducted in order to analyze the effects related to updating on the different age groups. All factors were manipulated within-subject except for the age-group variable which was manipulated between-groups. Response times are shown in Table 1.

Table 1. Means and standard deviations for response times (ms) as a function of age group, updating, distance and overlap conditions.

	Low distance				High distance			
	Low overlap		High overlap		Low overlap		High overlap	
	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
8 years								
No updating	2246	445	2246	488	2414	555	2344	559
Updating	2745	957	2912	954	3264	1156	3417	1041
11 years								
No updating	1730	405	1753	389	1768	412	1826	416
Updating	1945	459	2120	454	2313	450	2476	622
14 years								
No updating	1288	333	1346	249	1333	350	1362	267
Updating	1482	424	1599	387	1749	513	1861	456
Younger adults								
No updating	1260	290	1371	357	1348	376	1393	362
Updating	1419	369	1550	435	1717	494	1829	536

The analysis revealed that all the main effects were significant. There was a strong updating effect due to more time spent on the updating trials compared with the non-updating ones, $F(1, 122) = 314.17$, $MSE = .01$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .72$. Distance had a clear effect given that large distances took more time than small distances, $F(1, 122) = 310.85$, $MSE = .001$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .72$. Overlap also influenced response times with longer times for the low-overlap than for the high-overlap condition, $F(1, 122) = 14.13$, $MSE = .004$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .10$. Finally an age effect was found as response times decreased with age, $F(3, 122) = 38.07$, $MSE = .08$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .48$. Thus, the mean times for each age group were: 2698 ms for 8-year-olds, 1991 ms for 11-year-olds, 1502 ms for 14-year-olds, and 1486 ms for younger adults. Helmert contrasts, which compare each age level with the mean of subsequent levels, showed significant differences between 8-year-old children and all other groups, $F(1, 122) = 82.16$, $MSE = .08$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .40$, and between 11-year-old children and the older groups, $F(1, 122) = 32.96$, $MSE = .08$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .21$, but not between adolescents and younger adults ($F < 1$).

The interaction between updating and distance reached statistical significance, $F(1, 122) = 144.64$, $MSE = .002$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .54$. This was due to the updating cost (as the difference between the updating and non-updating conditions) being lower when the distance between the numbers involved in updating was small (316 ms) than when it was large (604 ms). This facilitation effect in updating due to numerical similarity is in line with the results previously obtained with adults (Lendínez et al., 2011, 2014).

It was especially relevant to determine whether the effects related to updating changed with age. In this regard, neither interaction between updating and age group, $F(3, 122) = 1.99$, $MSE = .01$, $p = .119$, $\eta_p^2 = .04$, nor interaction between distance and age group, $F(3, 122) = 1.26$, $MSE = .01$, $p = .290$, $\eta_p^2 = .03$, were significant. The third-order interaction between updating, distance and age group was also not statistically significant ($F < 1$). There was, therefore, no evidence that the information substitution process and the similarity-based facilitation effect change with age.

The interaction between updating and overlap was significant, $F(1, 122) = 32.38$, $MSE = .001$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .21$, due to a higher updating cost in the high-overlap condition (515 ms) than in the low-overlap condition (405 ms); that is, when the numbers belonging to different objects shared the same decade, the updating cost was greater. The interaction between distance and overlap was found to reach significance, $F(1, 122) = 5.82$, $MSE = .001$, $p = .02$, $\eta_p^2 = .05$, due to the somewhat higher distance effect in the low-overlap (224 ms) than in the high-overlap condition (201 ms). However, at this time we cannot provide an entirely satisfactory explanation for this result.

The interference effect was similar across different age groups given the non-significant interaction between overlap and age group ($F < 1$). The third-order interaction between updating, overlap and age group was also not statistically significant, $F(3, 122) = 2.28$, $MSE = .01$, $p = .082$, $\eta_p^2 = .05$. Thus, results showed that similarity-based interference was not affected by age. The remaining possible interactions failed to reach significance, whether they were third order: distance, overlap and age group ($F < 1$), or fourth-order: updating, distance, overlap and age group ($F < 1$).

Focus switching

To determine possible age differences in focus switching, a 2 (switching) x 4 (age group) ANOVA was conducted, in which switching was manipulated within-subject and age between-groups. The results showed that the main effects of switching, as switching trials took more time than no-switching trials, $F(1, 122) = 898.51$, $MSE = .001$, $p < .001$, $\eta^2 = .88$, and age

group, $F(3, 122) = 38.30$, $MSE = .02$, $p < .001$, $\eta^2 = .49$, were significant. Mean response times are shown in Figure 2.

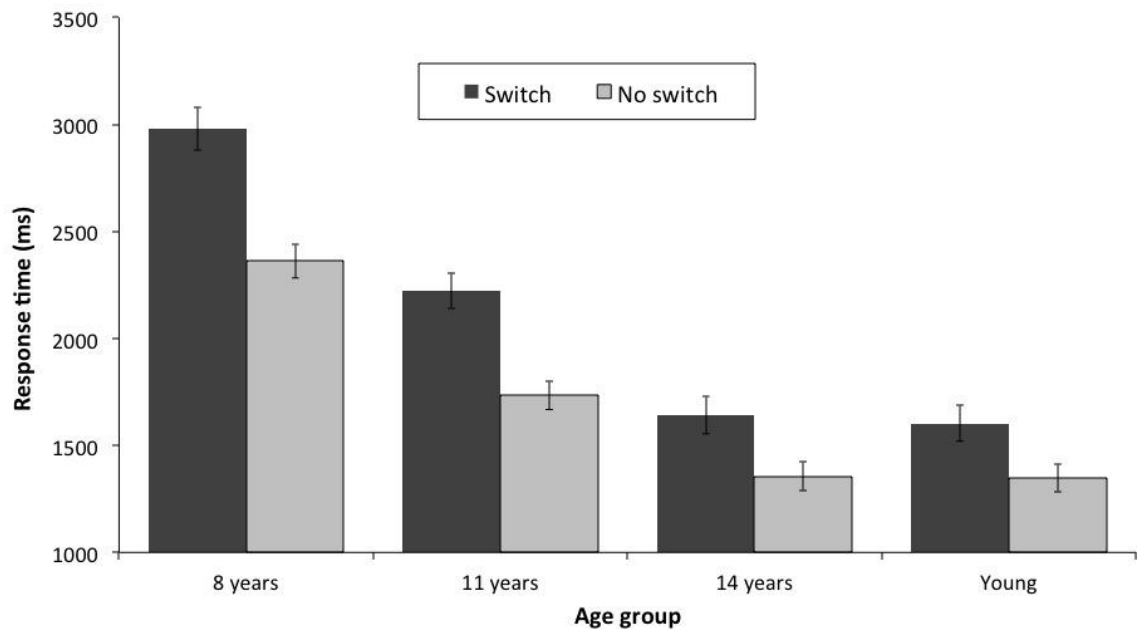


Figure 2. Response times (ms) as a function of switching and age group. The error bars represent two standard errors of the mean.

Importantly, the interaction between switching and age group was significant, $F(3, 122) = 7.62$, $MSE = .001$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .16$. The switching cost, considered the difference between the switching and no-switching conditions, for each group was: 618 ms for 8-year-olds, 490 ms for 11-year-olds, 286 ms for 14-year-olds, and 254 ms for younger adults. Further analyses revealed differences in the switching cost between both groups of children and the older groups. Thus, on the one hand, significant differences were also observed between switching cost for 8-year-old children and adults, $F(1, 57) = 8.45$, $MSE = .001$, $p = .005$, $\eta_p^2 = .13$. There was no difference in the switching cost between the younger age groups (8- and 11-year-olds), $F(1, 57) = 1.01$, $MSE = .001$, $p = .321$, $\eta_p^2 = .02$, and the cost between 8-year-old children and adolescents also failed to reach the conventional level of significance, $F(1, 54) = 3.34$, $MSE = .001$, $p = .073$, $\eta_p^2 = .06$. On the other hand, the switching cost was significantly greater for 11-year-olds than for adolescents, $F(1, 65) = 10.54$, $MSE = .001$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .14$, and for adults, $F(1, 68) = 20.86$, $MSE = .001$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .24$. Finally, no significant differences for switching cost emerged between adolescents and adults, $F(1, 65) = 1.09$, $MSE = .001$, $p = .30$, $\eta_p^2 = .01$.

To summarize, children incurred a higher switching cost than the older age groups. However, the switching cost was similar between 8- and 11-year-olds on the one hand, and between adolescents and younger adults on the other.

Recall

Recall was assessed at the end of each list. Given that updating, distance and switching were manipulated within-lists, recall could not be analyzed for these factors. The between-lists manipulation of overlap makes it possible to analyze recall differences between both conditions across the different age groups. A 2 (overlap) x 4 (age group) ANOVA on the percentage of recalled items revealed the main effect of overlap, $F(1, 129) = 22.97$, $MSE = 37.78$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .15$, given that recall was lower in the high-overlap condition (72.63%) than in the low-overlap condition (76.24%). The main effect of age group was also found to reach significance, $F(3, 129) = 22.62$, $MSE = 525.53$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .34$. Helmert contrast comparisons showed that 8-year-olds' recall was significantly lower compared to all other groups, $F(1, 129) = 58.63$, $MSE = 525.53$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .31$. In addition, 11-year-olds' recall was significantly lower than that of older groups, $F(1, 129) = 5.32$, $MSE = 525.53$, $p = .023$, $\eta_p^2 = .04$. Differences between adolescents and younger adults did not reach the conventional level of significance, $F(1, 129) = 3.51$, $MSE = 525.53$, $p = .063$, $\eta_p^2 = .03$. Recall means are shown in Figure 3.

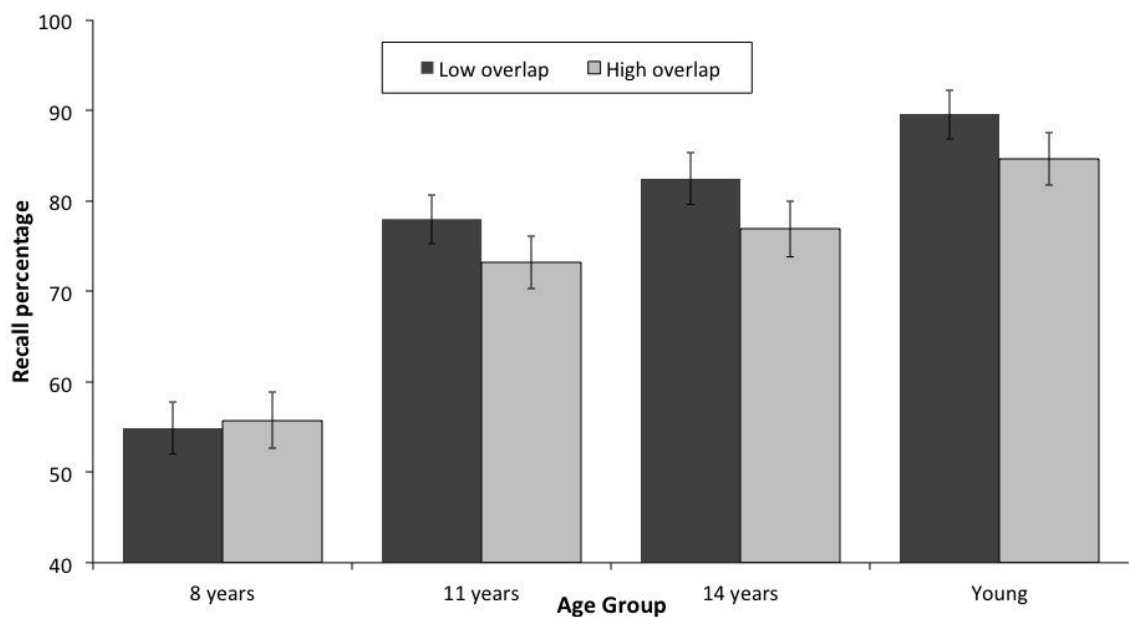


Figure 3. Recall percentage as a function of overlap and age group. The error bars represent two standard errors of the mean.

The interaction between overlap and age was statistically significant, $F(3, 129) = 3.68$, $MSE = 37.78$, $p = .01$, $\eta_p^2 = .08$. Further analyses revealed that the overlap effect was significant across all age groups except in the 8-year-old group ($F < 1$). Thus, differences between both overlap conditions were found for: 11-year-olds, $F(1, 34) = 8.97$, $MSE = 44.93$, $p = .005$, $\eta_p^2 = .21$; 14-year-olds, $F(1, 31) = 11.18$, $MSE = 44.29$, $p = .002$, $\eta_p^2 = .26$; and younger adults, $F(1, 34) = 26.01$, $MSE = 16.25$, $p < .001$, $\eta_p^2 = .43$.

7.4. Discussion

This study aimed to analyze possible developmental changes from childhood to adulthood in WMU and specifically in accessing and substituting information in WM. The results revealed age-related differences in task performance for both recall and response times that are in line with patterns found with other updating tasks such as: semantic updating task (e.g., Belacchi et al., 2010; Lechuga et al., 2006), keeping track (Tamnes, et al., 2010), mental counters task (e.g., Huizinga et al., 2006), and n-back task (Schleepen & Jonkman, 2010; Vuontela et al., 2003). In addition to assessing this general pattern on updating performance, this study aimed to examine possible developmental changes in the component process of substituting and accessing information in WM.

Substitution

Results showed an increase in response times when updating was required as opposed to when information was not modified. Furthermore, it was also shown that similarity between the information involved facilitates updating, where the closest numbers are updated the fastest, which confirms a previous finding (Lendínez et al., 2011, 2014). The updating of a representation involves the partial substitution of its modified parts. This requires the global representation initially maintained in WM to be dismantled in order to bind the new information to the context and to the other elements (Artuso & Palladino, 2011, 2013; Kessler & Meiran, 2006, 2008). In addition, it involves a low-level binding to associate the previously activated but still useful features to the new ones (Lendínez et al., 2014).

The results obtained indicate the absence of age-related changes for both similarity-based facilitation and the updating cost. This is a relevant finding because, although numerous studies have identified clear developmental differences in updating tasks, to our knowledge, possible age-related differences when comparing updating and non-updating conditions have not yet been investigated.

Similarity-based interference

Another aspect that influences updating task performance is the interference between the different representations involved. In this study similarity-based interference caused a slowing-down in response times and a decrease in accuracy (see also Pelegrina et al., 2012). This effect may be understood as a result of the overwriting of shared features between the two overlapping representations. In this case, one of the representations would lose some common features in favour of the other, leading to certain representation degradation (e.g., Nairne, 1990; Oberauer & Kliegl, 2006).

The similarity-based interference effect was similar across the different age groups except among 8-year-olds, where this was observed in response times but not in recall. Göthe et al. (2012) and Rodríguez-Villagra et al. (2013) have found no evidence that representational interference caused by an increase in the number of to-be-maintained items in memory decreases throughout childhood. The absence of age-related changes associated with interference in this study, which includes a greater number of age groups, extend previous findings to the case of similarity-based interference. It should be considered that other types of interference may undergo changes across childhood. An example is the resistance to distractor interference assessed using the flanker task as seen in the Schleepen and Jonkman (2010) study.

The results found during childhood are in contrast to what occurs as people get older, where a higher susceptibility of older adults to representational interference has been observed (Pelegrina et al., 2012; Rodríguez-Villagra et al., 2013). The absence of an age-related decrease during childhood for this type of interference, suggests that the quality of the representations generated and maintained in WM during childhood and adolescence confers a similar protection against representational interference. This may have certain implications when it comes to understanding the origin of developmental differences in short-term memory and WM. Although interference is considered a main cause of forgetting in short-term memory (e.g., Nairne, 2002), the age-related differences in WM during childhood and adolescence are not likely to be mediated by this type of representational interference.

Focus switching

Finally, this study aimed to determine possible developmental changes in focus switching in WM. It was observed that object switching led to an increase in response times in line with the results obtained in previous studies with younger adults (Lendínez et al., 2011, 2014). The switching-cost effect in this numerical updating task can be added to that obtained

using a variety of procedures such as counter tasks (Garavan, 1998), arithmetic operations (Oberauer, 2002, 2003), and the n-back task (McElree, 2001; Verhaeghen & Basak, 2005). This effect supports the idea of a focus of attention holding a single item in a privileged state for processing (Oberauer, 2002).

A main finding of this study was the age-related changes in focus switching consisting of a reduction in the switching cost with age over and above the general decrease in processing speed. The younger groups needed comparatively more time on this process than adolescents and adults. This suggests that focus switching is a late-developing process that increases in efficiency over the course of childhood and adolescence.

The age-related changes in focus switching found in this study could be added to other situations where age differences in the time needed to retrieve information from WM have also been observed. In particular, focus switching may be related to the attentional mechanism which makes it possible to switch the attention back and forth from processing to storage. This enables the refreshing of memory traces in complex WM tasks through reactivation by attentional focusing. Without such mechanism, a considerable amount of information maintained in WM would disappear before it could be used or recalled (Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004; Barrouillet, Bernardin, Portrat, Vergauwe, & Camos, 2007; see Barrouillet, Portrat, & Camos, 2011 for a review). These authors have provided evidence of developmental changes in the speed with which the attention can switch from one process to another in a WM task (e.g., Barrouillet, Gavens, Vergauwe, Gaillard, & Camos, 2009).

Furthermore, developmental differences have also been identified in the speed of retrieval of information from WM at the time of recall. According to Cowan et al. (1998), the process of searching among all items stored in WM and retrieving them in the focus of attention determines the duration of the silent pauses between words during recall. Cowan (1992, Cowan et al., 1998) has found that the duration of these pauses in a STM task decreases with age. A similar pattern has also been observed in WM tasks (Cowan et al., 2003).

In short, adding to the previous situations where there was a developmental increase in the speed with which information is retrieved from WM (switching between processing and storage, and retrieval of information at the time of recall), a new situation has been described in this study. This occurs when some content needs to be accessed in WM in order to carry out a cognitive operation and specifically to update information. The speed for accessing information outside of the focus of attention may play a role in the resolution of complex WM tasks which involve multiple processing and storage demands, given that these tasks require

frequent focus switching. So the less efficient this process, the possibility that retrieving information outside of the focus of attention decreases. This would result in task performance being negatively affected.

The changes during childhood and adolescence in the focus-switching process differ from those found in aging studies where, despite the general slowing-down observed in older adults, there were no age differences in the speed of focus switching. In contrast, older adults show less accuracy when it comes to retrieving information maintained outside the focus of attention (Dorbath, Hasselhorn, & Titz, 2011; Dorbath & Titz, 2011; Vaughan et al., 2008; Verhaeghen & Basak, 2005; Verhaeghen & Hoyer, 2007). This brings up the distinction between accessibility and availability. Whereas the former term refers to information retrieval speed in WM, availability denotes the accuracy with which information is retrieved (McElree, 2001). Thus, changes in accessibility could occur during childhood and adolescence, whereas that aspect is not affected with aging. However, the availability of information could be reduced specifically in older adults.

In addition to switching the focus of attention to the different elements held in WM, there are other possible mechanisms that could contribute to the age-related differences found in WM updating performance. Selective updating involves changing between two functioning modes of WM: maintenance, which preserves and gives stability to the information; and updating itself, which confers flexibility to WM by enabling the substitution of some elements (Ecker, et al., 2014; Kessler & Oberauer, 2014; O'Reilly & Frank, 2006). Changing between maintenance and updating takes time and it seems to be an effortful process. It is possible that the ability to alternate between both modes changes with age. Younger children might find it more difficult to switch fluently or could take longer to complete this process than older children.

Also inherent to WM updating is the creation and modification of associations between a new element and other elements and the context (e.g., position in the lists). Hence, the greater the number of to-be-substituted items, the more time spent on this process (Kessler & Meiran, 2008; Artuso & Palladino, 2011, 2013). It is possible that younger children may also experience comparatively more difficulty than older children when the number of elements to be substituted increases and therefore the complexity of establishing new bindings among elements. The present study was not designed to investigate potential age-related trends in these processes. Nonetheless, it may be worthwhile to study in more detail the development of these updating mechanisms.

Conclusion

In conclusion, this research has shown an improvement in updating performance during childhood through to adolescence. Furthermore, it has been observed that one of the processes involved in updating tasks, namely focus switching, undergoes significant changes during both childhood and adolescence. This finding is relevant given that the developmental differences in updating may be due, at least in part, to young children being less efficient at accessing information in WM. In contrast, no developmental differences have been found associated with substituting a representation for another or in terms of interference between the different representations maintained. In future research, it would be relevant to study possible age-related differences in other component processes involved in updating tasks.

Author Note

The research reported here was supported by a grant from the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness to the second author (PSI2012-37764).

The experiment reported in the paper was part of the Doctoral Thesis by the first author.

7.5. References

- Artuso, C., & Palladino, P. (2011). Content–context binding in verbal working memory updating: On-line and off-line effects. *Acta psychologica*, 136, 363-369. doi: 10.1016/j.actpsy.2011.01.001
- Artuso, C., & Palladino, P. (2013). Binding and content updating in working memory tasks. *British Journal of Experimental Psychology*, 105, 226-242. doi: 10.1111/bjop.12024
- Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004). Time constraints and resource sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 83-100. doi: 10.1037/0096-3445.133.1.83
- Barrouillet, P., Bernardin, S., Portrat, S., Vergauwe, E., & Camos, V. (2007). Time and cognitive load in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 33, 570-585. doi: 10.1037/0278-7393.33.3.570

- Barrouillet, P., Gavens, N., Vergauwe, E., Gaillard, V., & Camos, V. (2009). Working memory span development: A Time-Based Resource Sharing Model account. *Developmental Psychology*, 45, 477–490. doi: 10.1037/a0014615
- Barrouillet, P., Portrat, S., & Camos, V. (2011). On the law relating processing to storage in working memory. *Psychological Review*, 118, 175-192. doi: 10.1037/a0022324.
- Belacchi, C., Carretti, B. & Cornoldi C. (2010). The role of working memory and updating in Coloured Raven Matrices performance in typically developing children. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22, 1010-1020. doi:10.1177/0022219410371676
- Carretti, B., Cornoldi C., De Beni R., & Romano, M. (2005). Updating in working memory: A comparison of poor and good comprehenders. *Journal of Experimental Child Psychology*, 91, 45-66. doi:10.1016/j.jecp.2005.01.005
- Carretti, B., Cornoldi, C. & Pelegrina, S. (2007). Which factors influence number updating in working memory? The effects of size distance and suppression. *British Journal of Psychology*, 98, 45-60. doi:10.1348/000712606X104175
- Cornoldi, C., Drusi, S., Tencati, C., Giofrè, D., & Mirandola, C. (2012). Problem solving and working memory updating difficulties in a group of poor comprehenders. *Journal of Cognitive Education and Psychology*, 11, 39-44. doi: 10.1891/1945-8959.11.1.39
- Cowan, N. (1992). Verbal memory span and the timing of spoken recall. *Journal of Memory and Language*, 31, 668–684.
- Cowan, N. (1995). *Attention and memory. An integrated framework*. New York: Oxford University Press.
- Cowan, N. (1999). An embedded-processes model of working memory. In A. Miyake & P. Shah (Eds.), *Models of Working Memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 62-101). Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
- Cowan, N., Towse, J. N., Hamilton, Z., Saults, J. S., Elliott, E. M., Lacey, J. F., et al. (2003). Children's working-memory processes: A response-timing analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132, 113-132. doi: 10.1037/0096-3445.132.1.113
- Cowan, N., Wood, N. L., Wood, P. K., Keller, T. A., Nugent, L. D., & Keller, C. V. (1998). Two separate verbal processing rates contributing to short-term memory span. *Journal of Experimental Psychology: General*, 127, 141–160. doi:10.1037/0096-3445.127.2.141

- Dorbath, L., Hasselhorn, M., & Titz, C. (2011). Aging and executive functioning: A training study on focus-switching. *Frontiers in Psychology, 2*, 1-12. doi: 10.3389/fpsyg.2011.00257
- Dorbath, L., & Titz, C. (2011). Dissociable age effects in focus-switching: Out of sight, out of mind. *GeroPsych: The Journal of Gerontopsychology and Geriatric Psychiatry, 24*, 103-109. doi 10.1024/1662-9647/a000034
- Ecker, U. K. H., Lewandowsky, S., & Oberauer, K. (2014). Removal of information from working memory: a specific updating process. *Journal of Memory and Language, 74*, 77-90. doi: 10.1016/j.jml.2013.09.003
- Ecker, U. K. H., Lewandowsky, S., Oberauer, K., & Chee, A. E. H. (2010). The components of working memory updating: An experimental decomposition and individual differences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition, 36*, 170-189. doi: 10.1037/a0017891
- Friedman, N. P., Miyake, A., Corley, R. P., Young, S. E., DeFries, J. C., & Hewitt, J. K. (2006). Not all executive functions are related to intelligence. *Psychological Science, 17*, 172-179. doi: 10.1111/j.1467-9280.2006.01681.x
- Garavan, H. (1998). Serial attention within working memory. *Memory & Cognition, 26*, 263–276.
- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I.M. (2008). Executive function in preschoolers: A review using an integrative framework. *Psychological Bulletin, 134*, 31-60. doi: 10.1037/0033-2909.134.1.31
- Göthe, K., Esser, G., Gendt, A., & Kliegl, R. (2012). Working memory in children: Tracing age differences and special educational needs to parameters of a formal model. *Developmental Psychology, 48*, 459-476. doi: 10.1037/a0025660
- Hazy, T. E., Frank, M. J., & O'Reilly, R. C. (2006). Banishing the homunculus: making working memory work. *Neuroscience, 139*, 105–118. doi:10.1016/j.neuroscience.2005.04.067
- Huizinga, M., Dolan, C., & Van der Molen, M.V. (2006). Age-related change in executive function: Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia, 44*, 2017-2036. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2006.01.010
- Kessler, Y., & Meiran, N. (2006). All updateable objects in working memory are updated whenever any of them are modified: evidence from the memory updating paradigm. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition, 32*, 570–585. doi:10.1037/0278-7393.32.3.570

- Kessler, Y., & Meiran, N. (2008). Two dissociable updating processes in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 34, 13339-1348. doi:10.1037/a0013078
- Kessler, Y., & Oberauer, K. (2014). Working memory updating latency reflects the cost of switching between maintenance and updating modes of operation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 40, 738-754. doi:10.1037/a0035545
- Kwon, H., Reiss, A. L., & Menon, V. (2002). Neural basis of protracted developmental changes in visuo-spatial working memory. *The Proceedings of the National Academy Sciences*, 99, 13336-13341. doi: 10.1073/pnas.162486399
- Lechuga, M. T., Moreno, V., Pelegrina, S., Gómez-Ariza, C., & Bajo, M. T. (2006). Age differences in memory control: Evidence from updating and retrieval- practice tasks. *Acta Psychologica*, 123, 279- 298. doi:10.1016/j.actpsy.2006.01.006
- Lendínez, C., Pelegrina, S., & Lechuga, M. T. (2011). The distance effect in numerical memory-updating tasks. *Memory & Cognition*, 39, 675–685. doi:10.3758/s13421-010-0047-y
- Lendínez, C., Pelegrina, S., & Lechuga, M. T. (2014). The role of similarity in updating numerical information in working memory: decomposing the numerical distance effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67, 16-32. doi: 10.1080/17470218.2013.793375
- Magimairaj, B., & Montgomery, J. (2012) Children's verbal working memory: relative importance of storage, general processing speed, and domain-general controlled attention, *Acta Psychologica*, 140, 196–207. doi: 10.1016/j.actpsy.2012.05.004
- McElree, B. (2001). Working memory and focal attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 27, 817-835. doi:10.1037//0278-7393.27.3.817
- McElree, B. & Doshier, B. A. (1989). Serial position and set size in short-term memory: Time course of recognition. *Journal of Experimental Psychology: General*, 18, 346-373.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M.J., Witzki, A. H. & Howerter, A. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex “Frontal Lobe” tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41, 49-100. doi:10.1006/cogp.1999.0734

- Morris, N. & Jones, D. M. (1990). Memory updating in working memory: the role of central executive. *British Journal of Psychology*, 81, 111-12. doi: 10.1111/j.2044-8295.1990.tb02349.x
- Nairne, J. S. (1990). A feature model of immediate memory. *Memory and Cognition*, 18, 251-269.
- Nairne, J. S. (2002). Remembering over the short term: The case against the standard model. *Annual Review of Psychology*, 53, 53-81. doi:10.1146/annurev.psych.53.100901.135131
- Neath, I. (2000). Modeling the effects of irrelevant speech on memory. *Psychonomic Bulletin and Review*, 7, 403-423
- Oberauer, K. (2002). Access to information in working memory: Exploring the focus of attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 28, 411-421. doi:10.1037//0278-7393.28.3.411
- Oberauer, K. (2003). Selective attention to elements in working memory. *Experimental Psychology*, 50, 257- 269. doi:10.1027//1618-3169.50.4.257
- Oberauer, K. & Kliegl, R. (2006). A formal model of capacity limits in working memory. *Journal of Memory and Language*, 55, 601-626. doi:10.1016/j.jml.2006.08.009
- O'Reilly, R., & Frank, M. (2006). Making working memory work: a computational model of learning in the prefrontal cortex and basal ganglia. *Neural computation*, 18, 283-328. doi: 10.1162/089976606775093909
- Palladino, P., Cornoldi, C., De Beni, R., & Pazzaglia, F. (2001). Working memory and updating processes in reading comprehension. *Memory & Cognition*, 29, 344-354. doi:10.3758/BF03194929
- Passolunghi, M. C. & Pazzaglia, F. (2004). Individual differences in memory updating in relation to arithmetic problem solving. *Learning and Individual Differences*, 14, 219-230. doi:10.1016/j.lindif.2004.03.001
- Passolunghi, M. C. & Pazzaglia, F. (2005). A comparison of updating processes in children good or poor in arithmetic word problem-solving. *Learning and Individual Differences*, 15, 257-269. doi:10.1016/j.lindif.2005.03.00
- Pelegrina, S., Borella, E., Carretti, B., & Lechuga, M. T. (2012). Similarity-based interference in a numerical memory-updating task: Age-related differences between young and older adults. *Experimental Psychology*, 59, 183-189. doi:10.1027/1618-3169/a000142

- Pelegrina, S., Capodieci, A., Carretti, B., & Cornoldi, C. (2014). Magnitude representation and working memory updating in children with arithmetic and reading comprehension disabilities. *Journal of Learning Disabilities*. Advance online publication. doi:10.1177/0022219414527480
- Rodríguez-Villagra, O. A., Göthe, K., Oberauer, K. & Kliegl, R. (2013). Working memory capacity in a go/no-go task: Age differences in interference, processing speed, and attentional control. *Developmental Psychology*, 49, 1683-1696. doi:10.1037/a0030883
- Schneider, W., Eschman, A., & Zuccolotto, A. (2002). *E-Prime users's guide*. Pittsburgh: Psychology Software Tools, Inc.
- Swanson, H. L. & Beebe-Frankenberger, M. (2004). The relationship between working memory and mathematical problem solving in children at risk and not at risk for serious math difficulties. *Journal of Educational Psychology*, 96 (3), 471-491. doi:10.1037/0022-0663.96.3.471
- Schleepe, T. M. J., & Jonkman L. M. (2010). The development of non-spatial working memory during childhood and adolescence and the role of interference control; an N-back task study. *Developmental Neuropsychology*, 35, 37-56. doi:10.1080/87565640903325733
- Tamnes, C. K., Ostby, Y., Walhovd, K. B., Westlye, L. T., Due-Tønnessen, P. & Fjell, A. M. (2010). Neuroanatomical correlates of executive functions in children and adolescents: A magnetic resonance imaging (MRI) study of cortical thickness. *Neuropsychologia*, 48, 2496-2508. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2010.04.024
- Vaughan, L., Basak, C., Hartman, M., & Verhaeghen, P. (2008). Aging and working memory inside and outside the focus of attention: Dissociations of availability and accessibility. *Aging, Neuropsychology and Cognition*, 15, 1-22. doi:10.1080/13825580802061645
- Verhaeghen, P., & Basak, C. (2005). Aging and switching of the focus of attention in working memory: Results from a modified n-back task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 58, 134-154. doi:10.1080/02724980443000241
- Verhaeghen, P., & Hoyer, W. J. (2007). Aging, focus switching and task switching in a continuous calculation task: Evidence toward a new working memory control process. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 14, 22-39. doi:10.1080/138255890969357
- Vuontela, V., Steenari, M. R., Carlson, S., Koivisto, J., Fjallberg, M. & Aronen, E. T. (2003). Audiospatial and Visuospatial Working Memory in 6-13 Year Old School Children. *Learning and Memory*, 10, 74-81. doi:10.1101/lm.5350

DISCUSIÓN

8. DISCUSIÓN

8.1. Principales resultados

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral consistía en analizar los mecanismos que subyacen al proceso de actualización en la memoria de trabajo. Se ha planteado que este proceso no es unitario sino que en él pueden distinguirse distintos componentes (Ecker et al., 2010). Uno de estos componentes es el de sustitución, relacionado con la modificación de los contenidos que han quedado obsoletos en la memoria de trabajo por información nueva. Esta Tesis pretendía estudiar el modo en que tiene lugar la sustitución de una información por otra en la memoria de trabajo. Se ha propuesto que la información en la memoria de trabajo puede actualizarse de manera selectiva, es decir únicamente se sustituiría parte de la información almacenada en la memoria de trabajo (Kessler y Meiran, 2008).

Uno de los principales objetivos de este trabajo era obtener evidencias de que la actualización implica la sustitución selectiva de partes de una representación. El primer estudio de esta Tesis pretendía determinar si la sustitución es un proceso selectivo, no ya a nivel de elementos, sino también al nivel de las representaciones asociadas a cada elemento (Lendínez et al., 2011). Para ello, se analizó en qué medida la sustitución selectiva dependía de la similitud entre los elementos a sustituir. Dicha similitud se operacionalizaba a través de la distancia existente entre los números implicados en la sustitución. En definitiva, se pretendía comprobar si la distancia numérica entre la información almacenada y la nueva influye en la actualización.

En un primer experimento se empleó una tarea de comparación numérica en la que los participantes debían memorizar el número más pequeño que aparecía en dos figuras diferentes. Esta tarea permitía manipular la distancia en ambas condiciones de actualización: cuando había que sustituir el número almacenado en la memoria por otro número más pequeño y cuando no era necesario. Así entre los números implicados en la comparación la distancia podría ser baja (1 ó 2 unidades) o alta (5 ó 6 unidades).

Tal y como se esperaba cuando los números estaban más próximos entre sí la actualización se llevaba a cabo más rápidamente que cuando estos estaban más distantes. Estos resultados no podrían explicarse por la dificultad de las operaciones puesto que el efecto de la distancia encontrado iba en una dirección opuesta al que se esperaría si fuese la dificultad de las operaciones la que explicase este efecto. Los estudios sobre aritmética mental muestran que la comparación de números se realiza más rápidamente cuanto mayor sea la

distancia entre los dos números implicados (Dehaene, Dupoux, y Mehler, 1990; Moyer y Landauer, 1967). Por otra parte, los resultados obtenidos muestran que la distancia tenía un efecto diferente en cada condición de actualización. Cuando era necesario actualizar la información por otra nueva, el efecto de la distancia era claro mientras que cuando no se debía sustituir la información en memoria, el efecto era menos evidente. Por tanto, este resultado también apoya la idea de que el efecto de la distancia no se debe a la dificultad puesto que las comparaciones numéricas que se llevaban a cabo en cada una de las condiciones eran las mismas. Si la dificultad explicase dicho efecto, éste debería haber sido similar en ambas condiciones.

En la condición de no actualización el efecto de la distancia podría entenderse como un efecto de facilitación que se produciría al estar ya previamente activadas algunas características del número. Esta preactivación sería mayor en el caso en el que los números implicados en la comparación son más similares, es decir cuando la distancia es baja. Este efecto podría relacionarse con el efecto de *priming* obtenido en otros estudios que han empleado tareas numéricas. Por ejemplo, Brysbaert (1995) encontró que los tiempos de respuesta para nombrar números arábigos eran más rápidos cuando estos números estaban antecidos por *primes* de números de una magnitud cercana que cuando estaban precedidos por números más distantes (véase también: Den Heyer y Briand, 1986; Koechlin, Naccache, Block, y Dehaene, 1999; Naccache y Dehaene, 2001; Reynvoet y Brysbaert, 1999, 2004; Reynvoet, Brysbaert, y Fias 2002).

Dado que en la tarea de actualización utilizada se empleaban operaciones, cabía la posibilidad de que estas afectaran en algún sentido al proceso de actualización. Por tanto, el objetivo del segundo experimento era descartar que la comparación numérica determinase el efecto de la distancia en la actualización. Para ello, se utilizó una tarea similar a la empleada en el primer experimento con la diferencia de que la necesidad de actualizar o no venía determinada por una señal externa, y no por el resultado de una comparación numérica que debía realizar el participante ante cada ítem. Los resultados revelaron que, del mismo modo que en el Experimento 1, la distancia numérica tenía un efecto en la actualización: cuando los números estaban más próximos entre sí, la actualización se llevaba a cabo más rápidamente. El hecho de que el efecto de la distancia fuese diferente en ambos experimentos y además se produjese de la misma manera, independientemente de las características de la tarea (comparaciones numéricas en el Experimento 1 o señal externa en el Experimento 2), podría indicar que este efecto estaría relacionado con la manera en la que se representa y se sustituye la información en la memoria.

El primer estudio de esta Tesis apunta a que la similitud de la información implicada en la actualización influye en este proceso. La similitud entre dos estímulos puede producirse a lo largo de distintas dimensiones, que podrían influir en la actualización. De hecho, el efecto de la distancia obtenido en los experimentos previos podría estar mediado al menos por dos dimensiones de similitud: la distancia numérica por una parte, y por otra, los dígitos compartidos. En un segundo estudio se planteó la posibilidad de determinar en qué medida estas dos dimensiones contribuían al efecto de la distancia (Lendínez et al. 2014). Para tal fin, se realizaron tres experimentos en los que se intentaba determinar separadamente el efecto de cada dimensión de similitud en la actualización. En todos los experimentos se empleó la tarea de comparación numérica empleada en el primer estudio en la que los participantes tenían que ir sustituyendo los números según su magnitud numérica.

En el primer experimento del segundo estudio se manipuló, por una parte, la distancia numérica entre los números implicados en la comparación y, por otra, la coincidencia o no en la decena, con el objeto de analizar su contribución en el efecto de facilitación. Por tanto, se manipulaban simultáneamente dos condiciones de similitud. En este experimento se volvió a obtener el efecto de la distancia de la misma manera que en el primer estudio (Lendínez et al., 2011). Además, también se encontró el efecto de facilitación esperado asociado a la segunda dimensión de similitud que se manipulaba. Así, se empleaba menos tiempo cuando los números implicados en la comparación coincidían en la decena que cuando pertenecían a decenas diferentes. Estos resultados corroboran que a medida que la información es más similar la actualización se lleva a cabo más rápidamente. Además se comprobó que el efecto de la distancia se producía aun cuando se controlaba la decena a la que pertenecían los números. Esto demostraba que ambas dimensiones contribuían de manera independiente al efecto de facilitación en la actualización.

En los experimentos anteriores, siempre se manipulaba la distancia entre los números empleando rangos relativamente limitados, 1 ó 2 unidades cuando la distancia entre los números era baja, y 5 ó 6 unidades cuando era alta. Por tanto, resultaba conveniente determinar el efecto de la distancia a lo largo de un rango continuo y más amplio de distancias. Por ello, se realizó otro experimento en este segundo estudio en el que se pretendía analizar el efecto de la distancia numérica empleando un rango comprendido entre 1 y 9. Los resultados obtenidos indicaron que independientemente del cambio de decena, el coste de actualización se incrementaba a medida que lo hacía la distancia entre los números. Además en este experimento también se encontró que los tiempos de respuesta aumentaban cuando la decena de los números cambiaba.

A la luz de estos resultados, cabía la posibilidad de que el efecto de la decena se debiese al hecho que los números coincidiesen específicamente en la decena, aunque también podría producirse por la repetición de un dígito cualquiera que fuese su posición en el número. Para dilucidar esta cuestión, se requería determinar qué ocurriría si se repitiese un dígito en otra posición distinta a la decena, por ejemplo las unidades. Para ello, se diseñó un tercer experimento en este segundo estudio que iba dirigido a investigar si el hecho de que los números compartiesen la unidad tenía el mismo efecto que la coincidencia en la decena. Si fuese así, los números coincidentes en la unidad se deberían actualizar más rápidamente que aquellos que no compartiesen ningún dígito. A partir de este planteamiento, se manipularon distintas distancias con el objeto de que los dígitos de los dos números implicados en la actualización coincidiesen bien en la decena (distancias 1 y 2), bien en la unidad (distancias 10 y 20) o no compartiesen ningún dígito (11, 12, 21 y 22). Las distintas condiciones utilizadas permitían comparar el efecto de compartir los dígitos en cada posición del número. En este experimento se replicó el resultado de que el cambio de decena implica un incremento de los tiempos de respuesta. Además se encontró que el cambio de la unidad también producía un coste temporal. No obstante, el coste que supone el cambio de unidad era de menor magnitud que el producido por el cambio de decena. Además, un resultado relevante es que una vez que se producía el cambio de dígito bien de la decena, bien de la unidad, la distancia numérica no influía en la actualización (por ejemplo, no existían diferencias entre las distancias 10 y 20). Esto podría indicar que a partir de determinadas distancias la similitud asociada a la distancia “*per se*” deja de influir en la sustitución de la información.

En resumen, los resultados obtenidos en este segundo estudio apoyan la implicación de ambas dimensiones de similitud en el componente de sustitución. Por un lado, se encontró que el coste de actualización aumentaba a medida que lo hacía la distancia entre los números. Respecto a la segunda dimensión relacionada con la influencia de los dígitos compartidos se encontró que cuando los números coincidían en la decena también disminuían los tiempos de respuesta. Además se observó que este efecto no sólo ocurría con la decena sino también cuando los números compartían la unidad. Estos resultados vuelven a corroborar que la similitud entre los números afecta al proceso de actualización. Además, la similitud influye principalmente cuando se requiere la sustitución de la información. Esto es así dado que ambas dimensiones de similitud (distancia y dígitos compartidos) producían un mayor efecto en la condición de actualización que en la de no actualización.

En todos los experimentos descritos se observó que la similitud de la información asociada a un mismo objeto producía facilitación, es decir la sustitución se llevaba a cabo más

rápidamente cuando el ítem almacenado en la memoria y aquel que viene a sustituirlo eran más similares. Una vez constatado este efecto de facilitación en la actualización, interesaba comprobar si, en la misma tarea, la información más similar vinculada a objetos diferentes, produciría, por el contrario, un efecto de interferencia. La existencia de este efecto de interferencia se analizará en el tercer estudio de esta Tesis.

El interés del tercer estudio (Lendínez, et al., en prensa) residía en determinar si las diferencias evolutivas en el proceso de actualización podrían atribuirse, al menos en parte, al funcionamiento específico de algunos de los componentes implicados en la actualización. Para ello, se analizaron los posibles cambios evolutivos en dos de los componentes de la actualización, la sustitución de información obsoleta por información nueva y el cambio de un elemento a otro en la memoria de trabajo en diferentes grupos de edad: niños de 8 años, niños de 11, adolescentes de 14 y jóvenes universitarios. Además, se pretendía analizar si la interferencia generada por la similitud entre distintos elementos mantenidos en la tarea de actualización experimenta cambios con la edad.

Para ello, en este último estudio se empleó una tarea de comparación numérica similar a la empleada en los estudios previos (Lendínez et al., 2011, 2014) en la que los participantes tenían que recordar el número más pequeño asociado a cada una de las figuras. Esta tarea permitía manipular el cambio de objeto y la sustitución de la información. Además, como ya se ha descrito anteriormente, con esta tarea era posible examinar la existencia de un efecto de interferencia manipulando la coincidencia en la decena de los números de los distintos objetos.

Respecto al componente de sustitución, se encontró un coste de actualización del mismo modo que los estudios previos (Lendínez et al., 2011, 2014). Sin embargo, no se encontraron diferencias entre los grupos de edad en este componente. Además, aunque el efecto de facilitación mediado por la distancia se encontraba en todos los grupos no se observaron diferencias significativas relacionadas con la edad.

Otro objetivo de este estudio era analizar si la similitud entre los números asociados a objetos diferentes generaba interferencia. La tarea empleada en este estudio permitía comprobar esto ya que los números asociados a los distintos objetos podían coincidir en la decena (condición de solapamiento) o pertenecer a decenas diferentes (condición de no solapamiento). En este experimento se encontró que la similitud de los ítems influía negativamente en los tiempos de respuesta y en el recuerdo. Este resultado concuerda con lo obtenido en investigaciones previas (Pelegrina et al., 2012). Por tanto, mientras que la

similitud entre los números pertenecientes a un mismo objeto genera un efecto de facilitación, cuando los números más similares están vinculados a objetos diferentes se produciría, por el contrario, un efecto de interferencia.

En cuanto a los posibles efectos evolutivos, no se observaron diferencias en los tiempos de respuesta entre los grupos por el hecho de que los números de los distintos objetos fuesen más o menos similares. Sin embargo, se comprobó que el recuerdo de todos los grupos de edad, a excepción del grupo de niños de 8 años, se veía afectado por la mayor similitud de los números pertenecientes a objetos diferentes. Así se encontró que el solapamiento en la misma decena producía un deterioro similar en el recuerdo en los niños de 11, 14 años y los adultos.

En relación al componente de cambio, se constató la existencia de un coste temporal asociado al cambio de un objeto a otro, al igual que en los estudios previos (Lendínez et al., 2011, 2014). Un resultado relevante de este estudio fue el descenso gradual que se producía a medida que aumentaba la edad de los participantes, en el tiempo empleado en cambiar de un elemento a otro. Así, aunque sí se observó que los niños de 11 años eran más lentos a la hora de llevar a cabo el cambio de un elemento a otro en comparación con los adolescentes (14 años) y los adultos, no se encontraron diferencias en la velocidad de acceso a la información entre ambos grupos de niños (8 y 11 años). También se encontraron diferencias significativas en la velocidad con la que se realiza el cambio entre los niños de 8 años y los adultos.

En resumen, este último estudio permite demostrar la existencia de una tendencia evolutiva en el acceso a la información que ha de ser actualizada. Los resultados obtenidos muestran que este componente experimenta mejoras significativas durante la niñez y la adolescencia. Este hallazgo es relevante ya que las diferencias evolutivas encontradas en la actualización podrían deberse, al menos en parte, a la mayor dificultad de los niños para acceder a los elementos en la memoria de trabajo.

8.2. Implicaciones teóricas

En esta Tesis Doctoral se pretendía especificar cómo se produce el proceso de sustitución en las tareas de actualización. Algunos investigadores han demostrado que cuando es necesario sustituir un elemento por otro en la memoria de trabajo, no siempre se sustituye toda la información mantenida en la memoria sino únicamente una parte de la misma (Kessler y Meiran, 2008). Un planteamiento central de esta Tesis es que este proceso de sustitución

selectiva puede aplicarse no solo a elementos completos almacenados en la memoria de trabajo sino a unidades más básicas de información como sus características.

Según algunas teorías, la información se representa mediante conjuntos de características que se activan al mismo tiempo (Lewandowsky y Farrell, 2008; Nairne, 1988, 1990; Neath, 2000; Oberauer y Kliegl, 2001, 2006). Inicialmente, esta forma de entender cómo se representa la información se utilizó para explicar la interferencia. Según los modelos representacionales mencionados anteriormente, cuando dos ítems que deben mantenerse simultáneamente en la memoria comparten características, se produce una competición entre ellos por las características compartidas y al final uno de ellos pierde algunas de esas características. La pérdida proporcional de características debido a la interferencia resulta así en una degradación de las representaciones y en la pérdida equivalente de la activación del ítem en la memoria de trabajo lo que repercute en la ejecución. En esta Tesis Doctoral se encontró que la similitud entre los ítems almacenados en la memoria y asociados a objetos diferentes afectaba negativamente a la ejecución de la tarea.

Esta idea sobre cómo se representa la información en la memoria de trabajo explicaría no solo los fenómenos de interferencia clásicos, sino también el efecto de facilitación en la actualización observado en los experimentos de este trabajo. Así, cuando hay que actualizar información que comparte muchas características con aquella que le precede, la actualización se llevará a cabo más rápidamente ya que será necesario activar un menor número de características del nuevo ítem porque ya estarían previamente activadas todas aquellas que comparte con el primero. En definitiva, el efecto de facilitación encontrado se relacionaría con el solapamiento entre las representaciones almacenadas en el foco atencional y la información nueva, de manera que cuando se llevase a cabo la sustitución de la información se sustituirían sólo aquellas características nuevas que no estuvieran presentes en la representación previa. En este trabajo, este efecto de facilitación en la actualización se ha comprobado con información numérica. Así, se encontró que a medida que dos números estaban más próximos entre sí, la actualización se llevaba a cabo más rápidamente.

Otra consecuencia de esta manera de representarse la información en la memoria de trabajo sería la necesidad de establecer un vínculo (*binding*) de bajo nivel que se encargaría de asociar unas características con otras (Oberauer y Lange, 2009). De este modo, la actualización exigiría deshacer los vínculos no necesarios entre algunas características y formar otros nuevos con las características del nuevo ítem. No obstante, algunas características se mantendrían integradas como una unidad, lo que permitiría dar continuidad a la representación de ese objeto en la memoria en tareas que exigen actualizaciones sucesivas. En última instancia,

podría pensarse que las características que permanecen activadas son las que permiten la existencia de un objeto mental que se mantiene en el tiempo con cierta estabilidad a pesar de modificaciones eventuales.

Este proceso de vínculo de bajo nivel sería distinto del que se ha planteado a un nivel más alto como el que se produce entre los elementos implicados en la sustitución y el contexto (Artuso y Palladino, 2011; Ecker et al., 2010; Kessler y Meiran, 2006, 2008). Por ejemplo, este tipo de vínculos se producirían en una tarea de recuerdo serial de una lista de ítems entre cada ítem y su posición en la lista. Este mecanismo que permite vincular las distintas representaciones resulta fundamental, por tanto, para mantener más de un objeto en la memoria de trabajo.

Otra de las implicaciones teóricas de los resultados de esta Tesis tiene que ver con la naturaleza de la similitud de los contenidos mantenidos en la memoria. Se ha comprobado que dimensiones de distinta índole influyen en el proceso de actualización. El hecho de que la menor distancia entre los números almacenados en la memoria produzca una disminución del coste de actualización se relacionaría con una dimensión semántica. Mientras que el hecho de que la actualización se lleve a cabo más rápidamente cuando los números implicados en la comparación comparten dígitos, bien la decena o bien la unidad, podría estar relacionado además de con una dimensión semántica, con una dimensión fonológica o visual.

En relación a la similitud semántica, algunas teorías plantean que los números se representan en una línea numérica ocupando una posición específica (Dehaene y Cohen, 1995; Verguts, Fias y Stevens, 2005). Las representaciones de los números situados más próximos en esa línea se solapan en cierta medida. Así, la representación semántica de un número puede ser parcialmente preactivada por otro número próximo debido a que ambos números se solapan representacionalmente. Por tanto, cuando aparece un nuevo ítem, este se activará más rápidamente si ha estado precedido por un número más próximo. Por otra parte, los resultados que muestran que el cambio de la decena y de la unidad afectan al proceso de la actualización son compatibles con la idea de que los números de dos cifras son descompuestos en sus decenas y unidades cuando se accede a la representación de su magnitud (Nuerk, Weger y Willmes, 2001; Nuerk y Wilmes, 2005).

La similitud fonológica o visual también podría influir en el efecto de facilitación en la actualización (Dehaene, 1992; Dehaene y Cohen, 1995). En los números que comparten un dígito, la primera sílaba en el caso de la decena, o la última sílaba si lo que comparten es la unidad, se pronuncia de la misma manera en ambos números, por lo que la similitud

fonológica es mayor. Además, estos números también son visualmente similares por el hecho de compartir dígito. Algunos estudios recientes han encontrado que la similitud perceptiva de los números de una sola cifra podría explicar parte del efecto de la distancia (Cohen, 2009; García-Orza, Perea, Mallouh, y Carreiras, 2012).

Ambas dimensiones de similitud se combinan en un espacio multidimensional (Shepard, 1964). Esta idea es compartida por ciertos modelos de categorización (Logan, 2002; Nosofsky, 1986) y por algunos modelos de memoria a corto plazo (p. ej. Nairne, 1990; Neath, 2000). Estos modelos asumen que la similitud se relacionaría con la distancia de los objetos en un espacio multidimensional. De este modo, a medida que las representaciones fuesen más similares y por tanto estuviesen más próximas en este espacio multidimensional, más fácil resultaría la actualización.

Una última implicación teórica de estos resultados tiene que ver con las diferencias evolutivas encontradas en el acceso a la información. Así, el tiempo empleado por los niños en realizar el cambio de un objeto a otro era mayor que en los adolescentes y los adultos. Este resultado contrasta con los obtenidos en los estudios que han analizado el cambio de objeto en personas mayores en los que no se encontraron diferencias en el tiempo que tardaban en cambiar de un objeto a otro (Dorbath, Hasselhorn, y Titz, 2001; Vaughan et al., 2008; Verhaeghen y Basak, 2005, Verhaeghen y Hoyer, 2007). Estos estudios revelaron diferencias entre los jóvenes y las personas mayores en la exactitud con la que se accede a un elemento en el foco atencional (disponibilidad) pero no en la velocidad con la que un ítem es traído al foco (accesibilidad) (Mc Elree, 2001). En este sentido, los cambios en la accesibilidad parecen ocurrir durante la niñez y en la adolescencia permaneciendo estables con la edad, mientras que la disponibilidad de la información en la memoria sí disminuiría en las personas de mayor edad.

El cambio de un objeto a otro en la memoria de trabajo podría relacionarse con otros procesos como, por ejemplo, con el mecanismo atencional que se encargaría de ir cambiando la atención del procesamiento al almacenamiento (Barrouillet, Bernardin, y Camos, 2004; Barrouillet, Bernardin, Portrat, Vergauwe, y Camos, 2007; Barrouillet, Portrat, y Camos, 2011). La activación de un ítem va disminuyendo a medida que se deja de focalizar la atención sobre éste, por lo que, según estos investigadores, el mecanismo atencional evitaría el decaimiento de los ítems y los reactivaría focalizando la atención en ellos. Barrouillet et al. (2004) observaron que este mecanismo, encargado de reactivar los ítems para impedir que estos decaigan, va mejorando su eficacia hasta la adolescencia tardía. Esto podría explicar parte de las diferencias evolutivas encontradas en la memoria de trabajo. Además, en un estudio

posterior encontraron que la velocidad con que la atención va cambiando de un proceso a otro también experimenta cambios con la edad (Barrouillet, Gavens, Vergauwe, Gaillard, y Camos, 2009). Por otro lado, el cambio de un objeto a otro en la memoria de trabajo también podría estar relacionado con el acceso a la información para su recuperación. En este sentido, se han encontrado diferencias evolutivas en la velocidad con la que se recupera la información en la memoria de trabajo cuando tiene que llevarse a cabo el recuerdo (Cowan, 1992; Cowan et al., 1998; Cowan et al., 2003). Los resultados de todos estos estudios podrían relacionarse con la mayor velocidad de acceso a los ítems que muestran los adolescentes y los adultos en este estudio.

En definitiva, los resultados de esta Tesis Doctoral permiten demostrar la existencia de cambios evolutivos en la velocidad con la que se accede a la memoria de trabajo. Este proceso puede desempeñar una función relevante en aquellas tareas complejas de memoria de trabajo que requieren el cambio de un elemento a otro. En la medida en que este proceso se realice de manera menos eficiente, la ejecución en dichas tareas se vería afectada.

Por otra parte, no se han obtenido diferencias relacionadas con la edad ni en la eficacia con la que se realiza la sustitución de la información, ni en la interferencia que produce la similitud de la información mantenida en la memoria. La ausencia de diferencias entre los grupos en el componente de sustitución indicaría que ya los niños de estas edades son capaces de sustituir una información por otra tan eficazmente como lo hacen los adultos. En otros trabajos tampoco se ha encontrado que la interferencia se viese afectada por la edad (Göthe, Esser, Gendt y Kliegl, 2012). Aunque estos investigadores encontraron una tendencia a la disminución del efecto de solapamiento de características en una de las tareas de actualización, no obtuvieron diferencias significativas entre los niños más pequeños (8 años) y los de mayor edad (11 años). Investigaciones posteriores han confirmado la ausencia de diferencias entre los niños y los adultos en este tipo de interferencia (Rodríguez-Villagra, Göthe, Oberauer y Kliegl, 2013). Sin embargo, se han obtenido resultados diferentes con otros grupos de edad. Así, Pelegrina et al. (2012) encontraron que las personas mayores eran más susceptibles a la interferencia que los adultos jóvenes. Por tanto, este proceso se produce de manera distinta en personas mayores y en niños.

8.3. Conclusiones y perspectivas futuras

Los estudios de esta Tesis Doctoral aportan resultados relevantes para la comprensión del proceso de actualización en la memoria de trabajo. Por una parte, proporcionan nueva información sobre el funcionamiento de dos componentes de la actualización: la sustitución de la información y el cambio de objeto.

En relación, al componente de sustitución los diferentes experimentos realizados muestran que cuando se sustituye la información, no se hace en su totalidad sino de manera selectiva. Esta sustitución selectiva se realiza sobre elementos de más bajo nivel como son las representaciones de las características asociadas a los objetos mantenidos en la memoria. En los distintos estudios realizados se demuestra que el grado de similitud entre estas representaciones influye en la eficacia con la que se realiza el proceso de actualización. Esta similitud podría provenir de distintas dimensiones (por ejemplo, semántica o fonológica).

Los experimentos realizados permiten disociar la dimensión semántica de otras dimensiones (por ejemplo, los dígitos compartidos). En futuros trabajos podría ser interesante disociar la influencia por separado de otras dimensiones en la actualización (p.ej. la dimensión fonológica de la visual). Además, podría estudiarse si los efectos encontrados respecto a la similitud se producen también en tareas en las que se emplee otro tipo de material, por ejemplo, léxico o visoespacial.

Por otra parte, en esta Tesis Doctoral se observan diferencias evolutivas en el proceso de acceso a la información contenida en la memoria de trabajo durante la niñez y la adolescencia. Muchas tareas cotidianas exigen realizar de manera continua un cambio de un contenido a otro en la memoria. La existencia de diferencias en la eficacia con la que se realiza el acceso a estos contenidos podría explicar, al menos en parte, las diferencias evolutivas encontradas en las tareas de actualización.

Además del cambio de objeto, otros mecanismos podrían influir en las diferencias evolutivas encontradas en las tareas de actualización. Es posible que los niños más pequeños también tengan una mayor dificultad a la hora de modificar y establecer nuevos vínculos con un nuevo elemento y otros elementos y/o el contexto. Además, la actualización implica el cambio entre el modo de mantenimiento de la información y la actualización en sí misma (Ecker, Oberauer, et al., 2014; Kessler y Oberauer, 2014; O'Reilly y Frank, 2006). Es posible que los niños más pequeños sean menos hábiles o tarden más tiempo en realizar el cambio entre estos dos modos de funcionamiento. Por ello, futuras investigaciones podrían tener como

objetivo el estudio de las diferencias evolutivas en estos procesos específicos de la actualización.

REFERENCIAS

9. REFERENCIAS

- Allport, D. A. (1987). Selection for action: Some behavioural and neurophysiological considerations of attention and action. En H. Heuer y D. F. Saunders (Eds.), *Perspectives on perception and action* (pp. 395-419). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Artuso, C., y Palladino, P. (2011) Content-context binding in verbal working memory updating: Online and off-line effects. *Acta Psychologica*, 136, 363-369. doi:10.1016/j.actpsy.2011.01.00
- Baddeley, A. D. (1966). Short-term memory for word sequences as a function of acoustic, semantic, and formal similarity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 18, 362-365.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford: Clarendon.
- Baddeley, A. D. (1996). Exploring the central executive. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 49A, 5-28.
- Baddeley, A. D. (1998). Recent developments in working memory. *Current Opinion in Neurobiology*, 8, 234-238.
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory? *Trends in Cognitive Science*, 4, 417-423.
- Baddeley, A.D., Della Sala, S., Papagno, C., y Spinnler, H. (1997). Dual task performance in dysexecutive and non-dysexecutive patients with a frontal lesion. *Neuropsychology*, 11, 187-194.
- Baddeley, A. D., Emslie, H., Kolodny, J., y Duncan, J. (1998). Random generation and the executive control of working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 51A, 819-852.
- Baddeley, A. D., Gathercole, S. E., y Papagno, C., (1998). The phonological loop as a language learning device. *Psychological Review*, 105, 158-173.
- Baddeley, A. D., y Hitch, G. (1974). Working memory. En G. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (Vol. 8, pp. 47-90). New York, NY: Academic Press.
- Baddeley, A. D., y Hitch, G. (1994). Developments in the concept of working memory. *Neuropsychology*, 8, 485-493.

- Baddeley, A. D., y Logie, R. H. (1999) Working memory: The multiple component model. En A. Miyake y P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 28-61). New York: Cambridge University Press.
- Bao, M., Li, Z., y Zhang, D. (2007). Binding facilitates attention switching within working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, memory and cognition*, 33, 959-969. doi: 10.1037/0278-7393.33.5.959
- Barrouillet, P., Bernardin, S., y Camos, V. (2004). Time constraints and resource sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 83-100. doi: 10.1037/0096-3445.133.1.83
- Barrouillet, P., Bernardin, S., Portrat, S., Vergauwe, E., y Camos, V. (2007). Time and cognitive load in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 33, 570-585. doi: 10.1037/0278-7393.33.3.570
- Barrouillet, P., y Fayol, M. (1998). From algorithmic computing to direct retrieval: Evidence from number and alphabetic arithmetic in children and adults. *Memory and Cognition*, 26, 355-368.
- Barrouillet, P., Gavens, N., Vergauwe, E., Gaillard, V., y Camos, V. (2009). Working memory span development: A Time-Based Resource Sharing Model account. *Developmental Psychology*, 45, 477-490. doi: 10.1037/a0014615
- Barrouillet, P., Portrat, S., y Camos, V. (2011). On the law relating processing to storage in working memory. *Psychological Review*, 118, 175-192. doi: 10.1037/a0022324.
- Bayliss, D.M., Jarrold, C., Baddeley, A.D., Gunn, D.M., y Leigh, E. (2005) Mapping the developmental constraints on working memory in span performance. *Developmental Psychology*, 41, 579-597.
- Belacchi, C., Carretti, B., y Cornoldi C. (2010). The role of working memory and updating in Coloured Raven Matrices performance in typically developing children. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22, 1010-1020. doi:10.1177/0022219410371676
- Bialkova, S., y Oberauer, K. (2010). Direct Access to working memory contents. *Experimental Psychology*, 57, 383-389. doi:10.1027/1618-3169/a000046
- Borella, E., Carretti, B., y Pelegrina, S. (2010). The specific role of inhibition in reading comprehension in good and poor comprehenders. *Journal of Learning Disabilities*, 43, 541-552. doi: 10.1177/0022219410371676

- Borgo, F., Giovannini, L., Moro, R., Semenza, C., Arcicasa, M., y Zaramella, M. (2003). Updating and inhibition processes in working memory: A comparison between Alzheimer's type dementia and frontal lobe focal damage. *Brain and Cognition*, 53, 197-201. doi:10.1016/S0278-2626(03)00109-X
- Brydges, C., Reid, C., Fox, A., y Anderson, M. (2012). A unitary executive function predicts intelligence in children. *Intelligence*, 40, 458-469. doi:10.1016/j.intell.2012.05.006
- Brysbaert, M. (1995). Arabic number reading: On the nature of the numerical scale and the origin of phonological recoding. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124, 434-452. doi:10.1037/0096-3445.124.4.434
- Cain, K. (2006). Children's reading comprehension: the role of working memory in normal and impaired development. En S. Pickering (Ed.), *Working Memory and Education* (pp. 61-91). Amsterdam: Academic Press.
- Carretti, B., Borella, E., Cornoldi, C., y De Beni, R. (2009). Role of working memory in explaining poor comprehenders performance: A meta-analysis. *Learning and Individual Differences*, 19, 246-251. doi:10.1016/j.lindif.2008.10.002
- Carretti, B., Cornoldi C., De Beni R., y Romano, M. (2005). Updating in working memory: A comparison of poor and good comprehenders. *Journal of Experimental Child Psychology*, 91, 45-66. doi:10.1016/j.jecp.2005.01.005
- Carretti, B., Cornoldi, C., y Pelegrina, S. (2007). Which factors influence number updating in working memory? The effects of size distance and suppression. *British Journal of Psychology*, 98, 45-60. doi:10.1348/000712606X104175
- Case, R., Kurland, M., y Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory span. *Journal of Experimental Child Psychology*, 33, 386-404.
- Chen, T., y Li, D. (2007). The roles of working memory updating and processing speed in mediating age related differences in fluid intelligence. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 14, 631-646. doi: 10.1080/13825580600987660
- Cohen, D. J. (2009). Integers do not automatically activate their quantity representation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16, 332-336. doi:10.3758/PBR.16.2.332
- Conlin, J. A., Gathercole, S. E. y Adams, J. W. (2005). Stimulus similarity decrements in children's working memory span. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 58A, 1434-1446. doi: 10.1080/02724980443000683

- Conrad, R. (1964). Acoustic confusions in immediate memory. *British Journal of Psychology*, 55, 75-84.
- Cornoldi, C., Drusi, S., Tencati, C., Giofrè, D., y Mirandola, C. (2012). Problem solving and working memory updating difficulties in a group of poor comprehenders. *Journal of Cognitive Education and Psychology*, 11, 39-44. doi: 10.1891/1945-8959.11.1.39
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information processing system. *Psychological Bulletin*, 104, 163-191.
- Cowan, N. (1992). Verbal memory span and the timing of spoken recall. *Journal of Memory and Language*, 31, 668-684.
- Cowan, N. (1995). *Attention and memory. An integrated framework*. New York: Oxford University Press.
- Cowan, N. (1999). An embedded-processes model of working memory. En A. Miyake y P. Shah (Eds.), *Models of Working Memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 62-101). Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
- Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 87-185. doi: 10.1017/S0140525X01003922
- Cowan, N., Towse, J. N., Hamilton, Z., Sauls, J. S., Elliott, E. M., Lacey, J. F., et al. (2003). Children's working-memory processes: A response-timing analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132, 113-132. doi: 10.1037/0096-3445.132.1.113
- Cowan, N., Wood, N. L., Wood, P. K., Keller, T. A., Nugent, L. D., y Keller, C. V. (1998). Two separate verbal processing rates contributing to short-term memory span. *Journal of Experimental Psychology: General*, 127, 141-160. doi:10.1037/0096-3445.127.2.141
- Daneman, M. y Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in integrating information between and within sentences. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19, 450-466.
- De Beni, R., y Palladino, P. (2004). Decline in working memory updating through ageing. Intrusion errors analyses. *Memory*, 12, 75-89. doi:10.1080/09658210244000568
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1-42. doi:10.1016/0010-0277(92)90049-N

- Dehaene, S., y Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1, 83-120.
- Dehaene, S., Dupoux, E., y Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in twodigit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 626-641. doi:10.1037/0096-1523.16.3.626
- Dehn, M. J. (2008). Working memory and academic learning: assessment and intervention. Wiley.
- Den Heyer, K., y Briand, K. (1986). Priming single digit numbers: automatic spreading activation dissipates as a function of semantic distance. *The American Journal of Psychology*, 99, 315-340.
- Deschuyteneer, M., Vandierendonck, A., y Myullaert, I. (2006). Does solution of mental arithmetic problems such as $2 + 6$ and 3×8 rely on the process of "memory updating"? *Experimental Psychology*, 53, 198-208. doi:10.1027/1618-3169.53.3.198
- Dorbath, L., Hasselhorn, M., y Titz, C. (2011). Aging and executive functioning: A training study on focus-switching. *Frontiers in Psychology*, 2, 1-12. doi: 10.3389/fpsyg.2011.00257
- Duan, X. J., Wei, S. W., Wang, G. Q., y Shi, J. N. (2010). The relationship between executive function and intelligence on 11- to 12-year-old children. *Psychological Test and Assessment Modeling*, 52, 419-431.
- Ecker, U. K. H., Lewandowsky, S., y Oberauer, K. (2014). Removal of information from working memory: a specific updating process. *Journal of Memory and Language*, 74, 77-90. doi: 10.1016/j.jml.2013.09.003
- Ecker, U. H. K., Lewandowsky, S., Oberauer, K., y Chee, A. E. H. (2010). The components of working memory updating: An experimental decomposition and individual differences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36, 170-189. doi:10.1037/a0017891
- Ecker, U. H. K., Oberauer, K., y Lewandowsky, S. (2014). Working memory updating involves item-specific removal. *Journal of Memory and Language*, 74, 1-15. doi:10.1016/j.jml.2014.03.006
- Engle, R. W., Tuholski, S. W., Laughlin, J. E., y Conway, A. R. A. (1999). Working memory, short-term memory and general fluid intelligence: A latent variable approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, 128, 309-331.

- Friedman, N. P., Miyake, A., Corley, R. P., Young, S. E., DeFries, J. C., y Hewitt, J. K. (2006). Not all executive functions are related to intelligence. *Psychological Science*, 17, 172-179. doi: 10.1111/j.1467-9280.2006.01681.x
- Galletly, C. A., MacFarlane, A. C., y Clark, C. R. (2007). Impaired updating of working memory in schizophrenia. *International Journal of Psychophysiology*, 63, 265-274. doi:10.1016/j.ijpsycho.2006.11.004
- Garavan, H. (1998). Serial attention within working memory. *Memory & Cognition*, 26, 263-276.
- Garavan, H., Ross, T. J. Li, S. J., y Stein, E. A. (2000). A parametric manipulation of central executive functioning. *Cerebral Cortex*, 10, 585-592.
- García-Orza, J., Perea, M., Mallouh, R. A., y Carreiras, A. (2012). Physical similarity (and not quantity representation) drives perceptual comparison of numbers: Evidence from two Indian notations. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19, 294-300. doi:10.3758/s13423-011-0212-8
- Garon, N., Bryson, S. E., y Smith, I.M. (2008). Executive function in preschoolers: A review using an integrative framework. *Psychological Bulletin*, 134, 31-60. doi: 10.1037/0033-2909.134.1.31
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge B., y Wearing, H. (2004). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental Psychology*, 40, 177-190. doi:10.1037/0012-1649.40.2.177
- Gehring, W. J., Bryck, R. L., Jonides, J., Albin, R. L., y Badre, D. (2003). The mind's eye, looking inward? In search of executive control in internal attention shifting. *Psychophysiology*, 40, 572-585. doi:10.1111/1469-8986.00059
- Gilchrist, A. L., y Cowan, N. (2011). Can the focus of attention accommodate multiple, separate items? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 37, 1484-1502. doi: 10.1037/a0024352
- Göthe, K., Esser, G., Gendt, A., y Kliegl, R. (2012). Working memory in children: Tracing age differences and special educational needs to parameters of a formal model. *Developmental Psychology*, 48, 459-476. doi: 10.1037/a0025660
- Harvey, P. O., Bastard, G. L., Pochon, J. B., Levy, R., Allilaire, J. F., Dubois, B. et al. (2004). Executive functions and updating of the contents of working memory in unipolar

- depression. *Journal of Psychiatric Research*, 38, 567-576.
doi:10.1016/j.jpsychires.2004.03.003
- Hasher, L., Zacks, R. T., y May, C. P. (1999). Inhibitory control, circadian arousal, and age. En D. Gopher y A. Koriat (Eds.), *Attention and performance XVIII: Cognitive regulation of performance: Interaction of theory and application* (pp. 653-675). Cambridge: MIT Press.
- Hitch, G.J. (1978). The role of short-term working memory in mental arithmetic. *Cognitive Psychology*, 10, 302-323.
- Huizinga, M., Dolan, C., y Van der Molen, M. V. (2006). Age-related change in executive function: Developmental trends and a latent variable analysis. *Neuropsychologia*, 44, 2017-2036. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2006.01.010
- Hulme, C., Newton, P., Cowan, N., Stuart, G., y Brown, G. (1999). Think before you speak: Pauses, memory search, and trace reintegration processes in verbal memory span. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 25, 447-463.
- Joormann, J., y Gotlib, I. H. (2008). Updating the contents of working Memory in depression: interference from irrelevant negative material. *Journal of Abnormal Psychology*, 117, 182-192. doi: 10.1037/0021-843X.117.1.182
- Just, M. A., y Carpenter, P. A. (1992). A capacity theory of comprehension: Individual differences in working memory. *Psychological Review*, 99, 122-149.
- Kessler, Y., y Meiran, N. (2006). All updateable objects in working memory are updated whenever any of them are modified: Evidence from the memory updating paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 32, 570-585. doi:10.1037/0278 7393.32.3.570
- Kessler, Y., y Meiran, N. (2008). Two dissociable updating processes in working memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34, 1339-1348. doi:10.1037/a0013078
- Kessler, Y., y Oberauer, K. (2014). Working memory updating latency reflects the cost of switching between maintenance and updating modes of operation. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 40, 738-754. doi:10.1037/a0035545
- Kirchner, W. K. (1958). Age differences in short-term retention of rapidly changing information. *Journal of Experimental Psychology*, 55, 352-358.

- Koechlin, E., Naccache, L., Block, E., y Dehaene, S. (1999). Primed numbers: exploring the modularity of numerical representations with masked and unmasked priming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1882-1905. doi:10.1037/0096-1523.25.6.1882
- Kolkman, M. E., Hoijtink, H. J. A., Kroesbergen, E. H., y Leseman, P. P. M. (2013): The role of executive functions in numerical magnitude skills. *Learning and Individual Differences*, 24, 145-151. doi: 10.1016/j.lindif.2013.01.004
- Kübler, A., Murphy, K., Kaufman, J., Stein, E. A., y Garavan, H. (2003). Co-ordination within and between verbal and visuospatial working memory: network modulation and anterior frontal recruitment. *Neuroimage*, 20, 1298-1308. doi: 10.1016/S1053-8119(03)00400-2
- Kwon, H., Reiss, A. L., y Menon, V. (2002). Neural basis of protracted developmental changes in visuo-spatial working memory. *The Proceedings of the National Academy Sciences*, 99, 13336-13341. doi: 10.1073/pnas.162486399
- Kyllonen, P. C., y Christal, R. E. (1990). Reasoning ability is (little more than) working-memory capacity. *Intelligence*, 14, 389-433. doi:10.1016/S0160-2896(05)80012-1
- Lechuga, M. T., Moreno, V., Pelegrina, S., Gómez-Ariza, C., y Bajo, M. T. (2006). Age differences in memory control: Evidence from updating and retrieval- practice tasks. *Acta Psychologica*, 123, 279-298. doi:10.1016/j.actpsy.2006.01.006
- Lendínez, C., Pelegrina, S., y Lechuga, M. T. (2011). The distance effect in numerical memory-updating tasks. *Memory & Cognition*, 39, 675–685. doi:10.3758/s13421-010-0047-y
- Lendínez, C., Pelegrina, S., y Lechuga, M. T. (2014). The role of similarity in updating numerical information in working memory: decomposing the numerical distance effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67, 16-32. doi:10.1080/17470218.2013.793375
- Lendínez, C., Pelegrina, S., y Lechuga, M. T. (en prensa). Age differences in working memory updating. The role of interference, focus switching and substituting information. *Acta Psychologica*. doi: 10.1016/j.actpsy.2015.02.015
- Lewandowsky, S., y Farrell, S. (2008). Short-term memory. New data and a model. En B. H. Ross (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 49, pp. 1–48). London: Elsevier. doi:10.1016/S0079-7421(08)00001-7

- Li, Z. H., Bao, M., Chen, X. C., Zhang, D. R., Han, S. H., He, S., et al. (2006). Attention shift in human verbal working memory: priming contribution and dynamic brain activation. *Brain Research*, 1078, 131-142. doi:10.1016/j.brainres.2006.01.032
- Li, Z. H., Sun, X. W., Wang, Z. X., Zhang, H. C., Zhang, D. R., He, S., et al. (2004). Behavioral and functional MRI study of attention shift in human verbal working memory. *Neuroimage*, 21, 181-191. doi: 10.1016/j.neuroimage.2003.08.043
- Lilienthal, L., Tamez, E., Shelton, J. T., Myerson, J., y Hale, S. (2013). Dual n-back training increases the capacity of the focus of attention. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20, 135-141. doi: 10.3758/s13423-012-0335-6
- Logan, G. D. (2002). An instance theory of attention and memory. *Psychological Review*, 109, 376-400. doi:10. 1037/0033-295X. 109.2.376
- Logie, R. H. (1995). *Visuo-spatial working memory*. Hove, UK: Erlbaum
- McElree, B. (1998). Attended and non-attended states in working memory: Accessing categorized structures. *Journal of Memory & Language*, 38, 225-252.
- McElree, B. (2001). Working memory and focal attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 27, 817-835. doi:10.1037//0278-7393.27.3.817
- McElree, B. (2006). Accessing recent events. En B. H. Ross (Ed.), *The Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 46, pp. 155-200). San Diego, CA: AcademicPress.
- McElree, B. y Doshier, B. A. (1989). Serial position and set size in short-term memory: Time course of recognition. *Journal of Experimental Psychology: General*, 18, 346-373.
- Meiran, N., Diamond, G. M., Toder, D., y Nemets, B. (2011). Cognitive rigidity in unipolar depression and obsessive compulsive disorder: Examination of task switching, Stroop, working memory updating and post-conflict adaptation. *Psychiatry Research*, 185, 149-156. doi:10.1016/j.psychres.2010.04.044
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M.J., Witzki, A. H., y Howerter, A. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "Frontal Lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41, 49-100. doi:10.1006/cogp.1999.0734
- Miyake, A., y Shah, P. (1999). Toward unified theories of working memory: Emerging general consensus, unresolved theoretical issues, and future research directions. En A. Miyake

- y P. Shah (Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 442–481). New York: Cambridge University Press.
- Morris, N., y Jones, D. M. (1990). Memory updating in working memory: The role of central executive. *British Journal of Psychology*, 81, 111-121. doi:10.1111/j.2044-8295.1990.tb02349.x
- Moyer, R. S., y Landauer, T. K. (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature*, 215, 1519-1520. doi:10.1038/2151519a0
- Naccache, L., y Dehaene, S. (2001). Unconscious semantic priming extends to novel unseen stimuli. *Cognition*, 80, 223-237. doi:10.1016/S0010-0277(00)00139-6
- Nairne, J. S. (1988). A framework for interpreting recency effects in immediate serial recall. *Memory & Cognition*, 16, 343-352. doi:10.3758/BF03197045
- Nairne, J. S. (1990). A feature model of immediate memory. *Memory & Cognition*, 18, 251-269. doi:10.3758/BF03197045
- Neath, I. (2000). Modeling the effects of irrelevant speech on memory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 7, 403–423. doi:10.3758/BF03214356
- Norman, D., y Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behavior. En R.J. Davidson, G. E. Schwartz, y D. E. Shapiro (Eds.), *Consciousness and self-regulation: Advances in research and theory* (Vol. 4, pp. 1-18). New York: Plenum.
- Nosofsky, R. M. (1986). Attention, similarity, and the identification–categorization relationship. *Journal of Experimental Psychology: General*, 115, 39-57. doi:10.1037/0096-3445.115.1.39
- Nuerk, H. C., Weger, U., y Willmes, K. (2001). Decade breaks in the mental number line? Putting the tens and units back in different bins. *Cognition*, 82, B25-B33. doi:10.1016/S0010-0277(01)00142-1
- Nuerk, H. C., y Willmes, K. (2005). On the magnitude representation of two digit numbers. *Psychology Science*, 47, 52-72.
- Oberauer, K. (2002). Access to information in working memory: exploring the focus of attention. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 28, 411-421. doi:10.1037//0278-7393.28.3.411
- Oberauer, K. (2003). Selective attention to elements in working memory. *Experimental Psychology*, 50, 257-269. doi:10.1027//1618-3169.50.4.257

- Oberauer, K. (2005). Binding and inhibition in working memory: individual and age differences in short-term recognition. *Journal of Experimental Psychology*, 134, 368-387. doi:10.1037/0096-3445.134.3.368
- Oberauer, K. (2006). Is the focus of attention in working memory expanded through practice? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, 32, 197-214. doi: 10.1037/0278-7393.32.2.197
- Oberauer, K. (2013). The focus of attention in working memory from metaphors to mechanisms. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 673. doi: 10.3389/fnhum.2013.00673
- Oberauer, K., y Bialkova, S. (2009). Accessing information in working memory: Can the focus of attention grasp two elements at the same time? *Journal of Experimental Psychology: General*, 138, 64-87. doi:10.1037/a0014738
- Oberauer, K., y Bialkova, S. (2011). Observation serial and parallel processes in working memory after practice. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37, 606-614. doi: 10.1037/a0020986
- Oberauer, K., Demmrich, A., Mayr, U., y Kliegl, R. (2001). Dissociating retention and access in working memory: An age-comparative study of mental arithmetic. *Memory & Cognition*, 29, 18-33. doi:10.3758/BF03195737
- Oberauer, K., y Kliegl, R. (2001). Beyond resources: Formal models of complexity effects and age differences in working memory. *European Journal of Cognitive Psychology*, 13, 187-215. doi:10.1080/09541440042000278
- Oberauer, K., y Kliegl, R. (2006). A formal model of capacity limits in working memory. *Journal of Memory and Language*, 55, 601-626. doi:10.1016/j.jml.2006.08.009
- Oberauer, K., y Lange, E. (2009). Activation and binding in verbal working memory: A dual process model for the recognition of nonwords. *Cognitive Psychology*, 58, 102-136. doi:10.1016/j.cogpsych.2008.05.003
- Oberauer, K., Süß, H. -M., Schulze, R., Wilhelm, O., y Wittmann, W. W. (2000). Working memory capacity: Facets of a cognitive ability construct. *Personality and Individual Differences*, 29, 1017-1045. doi:10.1016/S0191-8869(99)00251-2
- Oberauer, K., Wendland, M., y Kliegl, R. (2003). Age differences in working memory. The roles of storage and selective access. *Memory & Cognition*, 31, 563-569.

- O'Reilly, R., y Frank, M. (2006). Making working memory work: a computational model of learning in the prefrontal cortex and basal ganglia. *Neural computation*, 18, 283-328. doi: 10.1162/089976606775093909
- Palladino, P., Cornoldi, C., De Beni, R., y Pazzaglia, F. (2001). Working memory and updating processes in reading comprehension. *Memory & Cognition*, 29, 344-354. doi:10.3758/BF03194929
- Passolunghi, M. C. y Pazzaglia, F. (2004). Individual differences in memory updating in relation to arithmetic problem solving. *Learning and Individual Differences*, 14, 219-230. doi:10.1016/j.lindif.2004.03.001
- Passolunghi, M.C. y Pazzaglia, F. (2005). A comparison of updating processes in children good or poor in arithmetic word problem solving. *Learning and Individual Differences*, 15, 257-269. doi:10.1016/j.lindif.2005.03.001
- Pelegrina, S., Borella, E., Carretti, B., y Lechuga, M. T. (2012). Similarity-based interference in a numerical memory-updating task: Age-related differences between young and older adults. *Experimental Psychology*, 59, 183-189. doi:10.1027/1618-3169/a000142
- Pelegrina, S., Capodieci, A., Carretti, B., y Cornoldi, C. (2014). Magnitude representation and working memory updating in children with arithmetic and reading comprehension disabilities. *Journal of Learning Disabilities*. Advance online publication. doi:10.1177/0022219414527480
- Raghubar, K. P., Barnes, M. A., y Hecht, S. A. (2010). Working memory and mathematics: A review of developmental, individual difference, and cognitive approaches. *Learning and Individual Differences*, 20, 110-122. doi: 10.1016/j.lindif.2009.10.005
- Reynvoet, B., y Brysbaert, M. (1999). Single-digit and two-digit Arabic numerals address the same semantic number line. *Cognition*, 72, 191-201. doi:10.1016/S0010-0277(99)00048-7
- Reynvoet, B., y Brysbaert, M. (2004). Cross-notation number priming investigated at different stimulus onset asynchronies in parity and naming tasks. *Experimental Psychology*, 51, 81-90. doi:10.1027/1618-3169.51.2.81
- Reynvoet, B., Brysbaert, M., y Fias, W. (2002). Semantic priming in number naming. The *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55A, 1127-1139. doi:10.1080/02724980244000116

- Rodríguez-Villagra, O. A., Göthe, K., Oberauer, K., y Kliegl, R. (2013). Working memory capacity in a go/no-go task: Age differences in interference, processing speed, and attentional control. *Developmental Psychology*, 49, 1683-1696. doi:10.1037/a0030883
- Ruiz, M., Elosua, M. R., y Lechuga, M. T. (2005). Old-fashioned responses in an updating memory task. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 58A, 887-908. doi:10.1080/02724980443000395
- Salthouse, T. A. (1996). The processing speed theory of adult age differences in cognition. *Psychological Review*, 103, 403-428.
- Salthouse, T. A., Babcock, R. L., y Shaw, R. J. (1991). Effects of adult age on structural and operational capacities in working memory. *Psychology and Aging*, 6, 118-127.
- Schleepen, T. M. J., y Jonkman L. M. (2010). The development of non-spatial working memory during childhood and adolescence and the role of interference control; an N-back task study. *Developmental Neuropsychology*, 35, 37-56. doi:10.1080/87565640903325733
- Shah, P., y Miyake, A. (1996). The separability of working memory resources for spatial thinking and language processing: An individual differences approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, 125, 4-27.
- Shallice, T., Marzocchi, G. M., Coser, S., Del Savio, M. Meuter, R. F., y Rumiat, R. I. (2002). Executive function profile of children with attention deficit hyperactivity disorder. *Developmental neuropsychology*, 21, 43-71. doi:10.1207/S15326942DN2101_3
- Shepard, R. N. (1964). Attention and the metric structure of the stimulus space. *Journal of Mathematical Psychology*, 1, 54-87. doi:10.1016/0022-2496(64)90017-3
- Soriano, M. F. Jiménez, J. F., Román, P., y Bajo, M. T. (2009). Intentional inhibition in memory and hallucinations: Directed forgetting and updating. *Neuropsychology*, 23, 61-70. doi:10.1037/a0013739
- Spieler, D. H., Balota, D. A., y Faust, M. E. (1996). Stroop performance in healthy younger and older adults and in individuals with dementia of Alzheimer's type. *Journal of Experimental Psychology: Human, Perception and Performance*, 22, 461-479.
- St. Clair-Thompson, H. L. y Gathercole, S. E. (2006). Executive functions and achievements in school: Shifting, updating, inhibition, and working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59, 745-759. doi:10.1080/17470210500162854

- Swanson, H. L. y Beebe-Frankenberger, M. (2004). The relationship between working memory and mathematical problem solving in children at risk and not at risk for serious math difficulties. *Journal of Educational Psychology*, 96, 471-491. doi:10.1037/0022-0663.96.3.471
- Van der Sluis, S., de Jong, P.F., y van der Leij, A. (2004). Inhibition and shifting in children with learning deficits in arithmetic and reading. *Journal Experimental Child Psychology*, 87, 239-266. doi:10.1016/j.jecp.2003.12.002
- Van der Sluis, S., de Jong, P.F., y van der Leij, A. (2007). Executive functioning in children, and its relations with reasoning, reading and arithmetic. *Intelligence*, 35, 427-449. doi:10.1016/j.intell.2006.09.001
- Van Gerven, P. W. M., Meijer, W. A. y Jolles, J. (2007). Education does not protect against age-related decline of switching focal attention in working memory. *Brain and Cognition*, 64, 158-163. doi:10.1016/j.bandc.2007.02.005
- Vaughan, L., Basak, C., Hartman, M., y Verhaeghen, P. (2008). Aging and working memory inside and outside the focus of attention: Dissociations of availability and accessibility. *Aging, Neuropsychology and Cognition*, 15, 1-22. doi:10.1080/13825580802061645
- Verguts, T., Fias, W., y Stevens, M. (2005). A model of exact small-number representation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 66-80. doi:10.3758/BF03196349
- Verhaeghen, P., y Basak, C. (2005). Aging and switching of the focus of attention in working memory: Results from a modified n-back task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 58A, 134-154. doi:10.1080/02724980443000241
- Verhaeghen, P., Cerella, J., y Basak, C. (2004). A working memory workout: How to expand the focus of serial attention from one to four items in 10 hours or less. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 30, 1322-1337. doi:10.1037/0278-7393.30.6.1322
- Verhaeghen, P., Cerella, J., Basak, C., Bopp, K. L., Zhang, Y., y Hoyer, W. J. (2007). The ins and outs of working memory: Dynamic processes associated with focus switching and search. En N. Osaka, R. Logie, y M. D'Esposito. (Eds.), *Working Memory: Behavioural & Neural Correlates* (pp. 81-98), Oxford, UK: Oxford University Press.
- Verhaeghen, P., y Hoyer, W. J. (2007). Aging, focus switching and task switching in a continuous calculation task: Evidence toward a new working memory control process. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 14, 22-39. doi:10.1080/1382558090969357

- Vockenber, K. (2006). *Updating of representations in working memory*. Unpublished doctoral dissertation, University of Potsdam.
- Voigt, S., y Hagendorf, H. (2002). The role of task context for component processes in focus switching. *Psychologische Beiträge*, 44, 248-274.
- Vuontela, V., Steenari, M. R., Carlson, S., Koivisto, J., Fjallberg, M. y Aronen, E. T. (2003). Audiospatial and visuospatial working memory in 6-13 year old school children. *Learning and Memory*, 10, 74-81. doi:10.1101/lm.53503
- White, H. A., y Marks, W. (2004). Updating memory in list-method directed forgetting: Individual differences related to adult attention-deficit/hyperactivity disorder. *Personality and Individual Differences*, 37, 1453-1462. doi:10.1016/j.paid.2004.02.002
- Wickelgren, W. A. (1965). Acoustic similarity and retroactive interference in short-term memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 4, 53-61.
- Yntema, D. B. (1963). Keeping track of several things at once. *Human Factors*, 5, 7-17.
- Yntema, D. B., y Mueser, G. E. (1962). Keeping track of variables that have few or many states. *Journal of Experimental Psychology*, 63, 391-395.